

**Ekologizacja
współczesnych pojazdów wojskowych –
główne kierunki rozwojowe
oraz zasadnicze wyzwania i ograniczenia
Wybrane zagadnienia**

Jarosław Brach

**Ekologizacja
współczesnych pojazdów wojskowych –
główne kierunki rozwojowe
oraz zasadnicze wyzwania i ograniczenia
Wybrane zagadnienia**



Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu
Wrocław 2023

Recenzja naukowa
Przemysław Simiński

Redakcja wydawnicza
Dorota Pitulec

Korekta
Aleksandra Śliwka

Skład i łamanie
Małgorzata Myszkowska

Projekt okładki
Beata Dębska

Zdjęcia na okładce pochodzą z archiwów prasowych firm: Arquus, UTAC, Oshkosh, British MoD

Projekt finansowany w ramach programu Ministra Edukacji i Nauki
pod nazwą „Regionalna Inicjatywa Doskonałości” w latach 2019-2023
nr projektu 015/RID/2018/19; kwota finansowania 10 721 040,00 zł

© Copyright by Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu
Wrocław 2023

Nota copyright obowiązuje do 31 maja 2024 roku.
Kopiowanie i powielanie w jakiegokolwiek formie wymaga pisemnej zgody Wydawcy

Od 1 czerwca 2024 roku publikacja dostępna na licencji Creative Commons
Uznanie autorstwa-Na tych samych warunkach 4.0 Międzynarodowe (CC BY-SA 4.0).
Skrócona treść licencji na <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.pl>



ISBN 978-83-67400-48-0 (dla wersji papierowej)
ISBN 978-83-67400-49-7 (dla wersji elektronicznej)

DOI: 10.15611/2023.49.7

Cytuj jako: Brach, J. (2023). *Ekologizacja współczesnych pojazdów wojskowych – główne kierunki rozwojowe oraz zasadnicze wyzwania i ograniczenia. Wybrane zagadnienia*. Wrocław: Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu.

Jarosław Brach ORCID: 0000-0002-7615-3893

Druk i oprawa: TOTEM

Spis treści

Wstęp	7
1. Ekologizacja pojazdów wojskowych poprzez ich elektryfikację	13
1.1. Założenia wstępne	13
1.2. Rozważania teoretyczne	42
2. Realizowane projekty w dziedzinie hybrydyzacji układów napędowych różnych rodzajów pojazdów wojskowych	70
2.1. Prace i wdrożenia w Europie	70
2.2. Prace nad pojazdami zelektryfikowanymi – hybrydowymi prowadzone w Stanach Zjednoczonych	88
2.3. Prace dotyczące hybrydowych lekkich gąsienicowych wozów bojowych prowadzone w Japonii	101
3. Pełna elektryfikacja	103
3.1. Projekt Holenderskiej Królewskiej Marynarki Wojennej – Koninklijke Marine i jego ocena.....	103
3.2. Problematyka przedłużaczy – zwiększaczy zasięgu.....	105
3.3. Prace australijskie nad pojazdem w pełni elektrycznym	107
3.4. Prace amerykańskie nad lekkim pojazdem terenowym z ogniwami paliwowymi.....	108
3.5. Porównanie przez specjalistów amerykańskich pojazdów z klasycznym układem napędowym, hybrydowych, elektrycznych ze zwiększaczem zasięgu i w pełni elektrycznych.....	110
3.6. DURO-e – pierwszy całkowicie elektryczny pojazd terenowy 4×4 wprowadzony przez GDELS (General Dynamics European Land Systems)..	118
Wnioski.....	119
Wskazania i rekomendacje	133
Literatura.....	145
Spis tabel.....	149
Abstract.....	150

Wstęp

Mimo że tematyka paliw alternatywnych i alternatywnych zespołów napędowych nie jest nowa, szczególnie głośno wybrzmiewa w ciągu ostatnich kilku lat. Wpływ na to miały cztery czynniki. Przede wszystkim zaczęły obowiązywać coraz bardziej restrykcyjne normy w zakresie czystości spalin, a Unia Europejska już ponad dekadę temu postanowiła, m.in. w ramach polityki uniezależniania się od importu ropy, że w 2020 roku 23% pojazdów powinno mieć napędy na paliwa alternatywne, w tym około 50% powinno być dostosowane do zasilania gazem ziemnym. Poza tym społeczeństwa bogatych państw Zachodu cechują się realnie wysoką troską o środowisko naturalne i chcą żyć w otoczeniu pozbawionym zanieczyszczeń i hałasu. Poziom wiedzy technicznej, na skutek znacznego postępu w wielu kluczowych dziedzinach, pozwolił też już na przygotowanie nowoczesnych systemów napędowych, konkurencyjnych pod względem osiągnięć oraz ceny. W efekcie problematyka alternatywnych paliw i zespołów napędowych w dalszym ciągu należy do aktualnych, a najważniejsi ze światowych i europejskich producentów pojazdów użytkowych muszą dysponować stosownymi rozwiązaniami proekologicznymi. Tymi rozwiązaniami są silniki przystosowane do spalania paliw innych niż olej napędowy czy benzyna, czyli generalnie gazów różnego rodzaju, oraz hybrydowe spalinowo-elektryczne bądź nawet czysto elektryczne układy napędowe. Nieco przekornie można jednak stwierdzić, że takie dysponowanie stosownymi technologiami, jeśli pominie się przytoczone wyżej argumenty, stanowi także niewątpliwą spuściznę po sytuacji na rynku paliw po 2008 roku. Przy wspomnianych wysokich cenach ropy bowiem wytwórcy aut musieli zacząć mocno inwestować w rozwój technik i technologii pozwalających na ograniczenie jej zużycia lub nawet jej całkowitą eliminację. Co gorsza, gdy w następnej dekadzie ceny paliw należały do niskich, a prace badawczo-rozwojowe trwały i kosztowały немало, trzeba było zacząć komercjalizować te konstrukcje. Niemniej, ponieważ okres tej komercjalizacji zbiegł się z perturbacjami w gospodarce światowej – najpierw od 2014 i potem od 2022 roku spowodowanymi działaniami wojennymi Rosji na Ukrainie, wciąż istnieje prawdopodobieństwo, że przy braku zachęt sprzedaż będzie się kształtować na niezwykle niskim poziomie.

Mimo tych oczywistych zalet i zachęt w poszczególnych krajach realne zyskiwanie na popularności przez alternatywne paliwa i napędy zależy od kilku istotnych uwarunkowań natury prawnej, ekonomicznej, eksploatacyjnej, społecznej, technicznej i infrastrukturalnej. Przede wszystkim to prawo w sposób obligatoryjny narzuca pewne rozwiązania lub czyni je bardziej konkurencyjnymi przez system dotacji, subwencji, ulg czy innych zachęt lub/i zakazuje bądź ogranicza stosowanie pewnych propozycji. Jednocześnie by sam nabywca wybrał pojazd użytkowy zasilanym zamiennikiem oleju napędowego, bazujący na paliwie gazowym ewentualnie

wyłącznie na układzie elektrycznym czy systemie opartym jeszcze na mieszanym układzie z silnikiem wysokoprężnym, musi widzieć szeroko rozumiane, namacalne korzyści z tego tytułu, do tego w całym przewidywanym okresie eksploatacji. Pod względem ekonomicznym (pro)ekologiczny tabor musi więc być odpowiednio tańszy w użytkowaniu – tzn. wyższą cenę zakupu i możliwe dodatkowe nakłady na obsługę winny z nawiązką rekompensować ewentualne ulgi w podatkach i opłatach oraz mniejsze wydatki na paliwo/energię, uwzględniające też występujące w przypadku gazu jego wyższe jednostkowe zużycie, ale przy niższej cenie jednostkowej. W przypadku czynnika eksploatacyjnego ważne pozostaje, by jazda pojazdem nie odbiegała na minus od jazdy porównywalnym wariantem tradycyjnym. Do tego kluczowe jest to, by pojazd na paliwa alternatywne czy z alternatywnym zespołem napędowym nie wymagał wielu dodatkowych usług, uzupełnianie paliwa/energii odbywało się w jak najprostszy sposób, a zamontowane zbiorniki/akumulatory zapewniały zasięg na akceptowalnym poziomie. Element społeczny oznacza, że zakupowi bardziej proekologicznych, w szczególności zasilanych gazem aut nie powinny towarzyszyć wyimaginowane i niemające pokrycia w rzeczywistości uprzedzenia, jak te dotyczące bezpieczeństwa.

Uwarunkowanie natury technicznej z kolei oznacza, że parametry, w tym głównie osiąganą moc i moment obrotowy, muszą być porównywalne z parametrami, jakimi w danej klasie samochodów charakteryzują się jednostki diesla. Ostatni punkt oznacza zaś, że dostęp do paliw alternatywnych i energii musi być taki sam bądź przynajmniej zbliżony do dostępu do paliw tradycyjnych.

Te elementy ekologizacyjne ze sfery napędów pojazdów drogowych są powoli przenoszone z segmentu cywilnego do sektora wojskowego – wojskowych pojazdów kołowych i gąsienicowych różnych klas i typów. Przy tym armia, ze względu na stawiane jej zadania, jest kompletnie innym użytkownikiem, o całkowicie odmiennych wymaganiach eksploatacyjnych niż tradycyjny przeciętny odbiorca cywilny. Dlatego proces ekologizacji jej sprzętu i taboru pojazdowego będzie przebiegał zupełnie inaczej. Będzie to proces, jak można obecnie uważać, o wiele dłuższy, opóźniony – i to w pewnych obszarach nawet znacznie – oraz wybiórczy, tzn. na tym etapie swojego rozwoju nie wszystkie propozycje cywilne da się łatwo przenieść – zmilitaryzować do pojazdów wojskowych. Być może w przyszłości, wraz z postępem technicznym, nastąpi zwrot w tej sprawie. Niemniej na razie, w aktualnych uwarunkowaniach, niewiele na to wskazuje.

Zasadniczymi celami tej pracy są:

- analiza obecnych głównych tendencji zachodzących w kwestii ekologizacji pojazdów drogowych – tzn. wprowadzania do nich paliw i napędów alternatywnych,
- analiza i określenie, które z paliw i technologii napędów alternatywnych i przy jakich uwarunkowaniach mogą być przenoszone do pojazdów wojskowych teraz i w najbliższych latach,
- analiza najważniejszych koncepcji ekologizacji pojazdów wojskowych prezentowanych przez przedstawicieli renomowanych zagranicznych instytutów ba-

dawczych, uczelni wyższych, sił zbrojnych państw NATO oraz producentów – dostawców pojazdów,

- analiza przykładów pierwszych wdrożeń,
- analiza, czy w naszym kraju mogą być prowadzone analogiczne prace w tej sferze jak w innych państwach oraz wskazanie, kto ewentualnie mógłby je prowadzić,
- uporządkowanie aktualnej wiedzy na temat ekologizacji pojazdów wojskowych, głównie kołowych, o dopuszczalnej masie całkowitej od 3500 do 5000 kg.

Omawianą tematykę rozpatrywano głównie w ujęciu ekonomiczno-wdrożeniowym, a nie techniczno-konstrukcyjno-politechnicznym.

Zasadnicza teza badawcza brzmi, że pojazdy wojskowe mogą już być ekologizowane przez wprowadzanie w nich (do ich napędu) paliw alternatywnych oraz alternatywnych zespołów napędowych. Niemniej jest to proces przebiegający kompletnie odmiennie niż w przypadku sektora cywilnego, ze względu na odmienność samych sił zbrojnych jako użytkownika.

W kwestii określenia luki badawczej trzeba stwierdzić, że – ze względu na bardzo dynamiczny postęp zachodzący w tej dziedzinie – luka między badaniami prowadzonymi *ex post* a praktyką zawsze będzie istnieć. Niniejsza monografia jest jednym z pierwszych zwartych opracowań w naszym kraju dotyczących tej tematyki oraz omawiających ją we względnie szeroki sposób. Jednocześnie autor pragnie zwrócić uwagę na kilka powiązanych kwestii. Po pierwsze, nie omawia w tej monografii samej ekologizacji – jej wymiarów, przebiegu i rodzajów, gdyż temu zagadnieniu poświęcił niezwykle obszerną, odrębną monografię¹. W takim razie to opracowanie można traktować jako pewne uzupełnienie – dopełnienie wcześniejszej monografii o ekologizacji pojazdów towarowych na rynku cywilnym. Powtarzanie pewnych kwestii autor uznał więc za bezcelowe. W tej książce skupia się zatem na samej ekologizacji pojazdów przeznaczonych dla wojska. Po drugie, przez wyrażenie „ekologizacja pojazdów wojskowych” autor rozumie ich elektryfikację czy gazo-/wodoroelektryfikację (technologia ogniw paliwowych), gdyż czyste technologie oparte na metanie do zasilania napędu pojazdów wojskowych – poza nielicznymi wyjątkami – praktycznie się nie nadają. Po trzecie, w pracy omawiana jest ekologizacja wyłącznie pojazdów o dopuszczalnej masie całkowitej od 3500-5000 kg wzyż. I po czwarte, ponieważ – na co jeszcze zostanie zwrócona uwaga – zmiany i postęp w omawianej dziedzinie zachodzą niezwykle szybko, pewne zaprezentowane tu poglądy mogą bardzo szybko się zdezawuować, analogicznie jak przybliżane oceny, wnioski, wskazania i przewidywania co do przyszłości. Tym bardziej,

¹ J. Brach, *Zastosowanie paliw alternatywnych i alternatywnych zespołów napędowych w samochodach ciężarowych klas tonażowych średniej i ciężkiej w warunkach zachodnioeuropejskich. Wyzwania i ograniczenia – aspekty praktyczne*, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, Wrocław 2022, s. 612 oraz w sferze samych ciężarówek wojskowych: J. Brach, *Nowoczesna europejska ciężarówka wojskowa w przyszłości – implikacje dla Polski*, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, Wrocław 2017, s. 276.

że otaczająca nas rzeczywistość cechuje się niezwykle nieliniarnym przebiegiem zachodzących w niej zjawisk i procesów. Trudno w takim razie stawiać niezwykle jednoznaczne tezy, bo nawet pojedyncze wydarzenia mogą spowodować znaczne turbulencje i zacząć tak kształtować przybliżane procesy, że zaczną one przebiegać w inny sposób – tzn. równie dobrze mogą one zostać jeszcze zdynamizowane lub, wręcz odwrotnie, całkowicie zastopowane.

W układzie metodologicznym książka ta opiera się głównie na analizie stosownych materiałów pochodzących ze źródeł zagranicznych – instytutów badawczych, uczelni wyższych, sił zbrojnych, niezależnych analityków i obserwatorów, zaangażowanych w te prace przedsiębiorstw. Do tego dochodzą wnioski i przemyślenia z rozmów, jakie na temat poruszanego zagadnienia autor przeprowadził z producentami pojazdów pracującymi nad elektryfikacją swoich wyrobów dla sił zbrojnych. Całość uzupełniają własne konkluzje i rozważania autora. Należy zaznaczyć, że omawiane zagadnienie zalicza się nie tyle do nowych, ile do niezwykle aktualnych i podejmowanych w ostatnim okresie coraz częściej, zarówno w czystych rozważaniach teoretycznych, jak i realizowanych pracach koncepcyjno-analityczno-studialnych oraz ukierunkowanych na przygotowanie pierwszych funkcjonalnych prototypów i ich wdrożenia. W szczególności odnosi się to do sprzętu typowo bojowego i po części wsparcia logistycznego, pomijając pewne proste przypadki użycia w ruchu wewnątrzobiektywnym czy lokalnym. Zainteresowani *de facto* dopiero się uczą tego, jak należy wprowadzać elektryfikację w układach napędowych kołowego taboru wojskowego – jakie mają być jej zakres, wymiar, tempo oraz sensowność wprowadzania. Przy tym znaczna część materiałów ma klauzulę niejawną. W rezultacie o ile mianowicie w sektorze cywilnym cele zostały jasno postawione, w zasadniczej mierze przez polityków, o tyle w sektorze militarnym, zanim zacznie się prowadzić analogiczną elektryfikację, trzeba odpowiedzieć sobie na wiele kluczowych pytań, w tym:

- Jakie rodzaje pojazdów wybrać do elektryfikacji i w jakim zakresie przeprowadzać tę elektryfikację układu napędowego – hybrydyzacja, pełna elektryfikacja, gazo-/wodoroelektryfikacja?
- Jakie ma być tempo tego procesu elektryfikowania układu napędowego?
- Jak zabezpieczyć zwiększone niezakłócone dostawy energii elektrycznej nie tylko w kraju macierzystym, ale i w trakcie wykonywania przez siły zbrojne zadań poza nim?
- Jakie nowe wyzwania operacyjne i logistyczne pojawią się w związku z tym?
- Jakie będą dodatkowe koszty i ewentualne korzyści czysto ekonomiczne związane z taką elektryfikacją w porównaniu z kosztami, jakie w analogicznym okresie poniesiono by na sprzęt i tabor tradycyjny – z tradycyjnym układem napędowym?
- Czy elektryfikacja układów napędowych pojazdów lądowych nie wpłynie negatywnie na możliwość wykonywania przez siły zbrojne postawionych przed nimi zadań? A może – wręcz przeciwnie – zwiększy te możliwości?

Są to pytania badawcze, które postawił sobie autor, a na które postara się udzielić odpowiedzi w oparciu o obecny stan jawnej wiedzy w przybliżanej tematyce.

Praca składa się z trzech rozdziałów. W rozdziale pierwszym omówiono ekologizację pojazdów wojskowych poprzez ich elektryfikację – rozdział ten zawiera założenia wstępne oraz rozważania teoretyczne. W rozdziale drugim omówiono projekty w dziedzinie hybrydyzacji układów napędowych różnych rodzajów pojazdów wojskowych realizowane w Europie oraz w Stanach Zjednoczonych. Natomiast rozdział trzeci odnosi się do pełnej elektryfikacji taboru. Przedstawiono w nim: projekt Holenderskiej Królewskiej Marynarki Wojennej – Koninklijke Marine i jego ocenę, problematykę przedłużaczy – zwiększaczy zasięgu, prace australijskie nad pojazdem w pełni elektrycznym oraz prace amerykańskie nad lekkim pojazdem terenowym z ogniwami paliwowymi.

Monografia ta jest przeznaczona dla dosyć specyficznego, wąskiego grona odbiorców. Są to głównie decydenci w naszym Ministerstwie Obrony Narodowej oraz inspektoratach, departamentach i innych wojskowych instytucjach, jak Wojskowy Instytut Techniki Pancernej i Samochodowej w Sulejówku koło Warszawy, odpowiedzialni za rodzimą politykę zbrojeniową w sferze zakupów sprzętu kołowego i gąsienicowego oraz jego eksploatacji. Do tej grupy zainteresowanych dochodzą dowódcy przede wszystkim jednostek logistycznych, pancernych, zmotoryzowanych oraz zwiadu. Osobną grupę związaną z siłami zbrojnymi tworzą kadra i studenci uczelni wojskowych – technicznej (WAT – Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie) oraz kształcącej kadry dla formacji zmotoryzowanych, pancernych i logistycznych (AWL – Akademia Wojsk Lądowych we Wrocławiu). Powyższe nie oznacza, że pewne poruszane kwestie i zagadnienia nie mogą zaciekać grona naukowego z cywilnych politechnik. Pozycją tą mogą się także zainteresować studenci uczelni cywilnych uczący się na kierunkach związanych z logistyką i transportem. Ostatnia kategoria głównych odbiorców obejmuje zaś miłośników wojskowej motoryzacji i osoby chcące być na bieżąco z postępem zachodzącym w tej dziedzinie.

Ekologizacja pojazdów wojskowych poprzez ich elektryfikację

1.1. Założenia wstępne

Energia zawsze należała do kluczowych elementów przekładających się na możliwość sprawnego i skutecznego funkcjonowania armii. Jej znaczenie zaczęło dodatkowo wzrastać wraz z postępem technicznym, immanentnie wiążącym się z dalszym wzrostem zapotrzebowania na energię. Dlatego nawet mówi się o energii jako o wrażliwym punkcie dla armii i wrażliwości armii na dostępność wystarczających ilości energii w wymaganych miejscu i czasie. Jeden z wielu przypadków, w których energia spowodowała kryzys, miał miejsce latem i jesienią 1944 roku, kiedy brak benzyny doprowadził do tego, że generał Patton zatrzymał natarcie swojej 3. Armii, co skłoniło niektórych historyków do zastanowienia się, czy mogło to opóźnić koniec II wojny światowej¹. Poza tym sama idea bardziej masowego wprowadzenia w siłach zbrojnych pojazdów nie tylko na paliwa alternatywne, jak gaz drzewny w czasie II wojny światowej, ale i pojazdów zelektryfikowanych nie zalicza się do nowych oraz dotyczy nie tylko pojazdów kołowych, ale i gąsienicowych². Na przykład taki zelektryfikowany czołg Saint-Chamond w latach 1916-1918 powstał we Francji i był używany w I wojnie światowej. Podczas II wojny światowej Niemcy zbudowali zaś i rozmieścili działo samobieżne Ferdinand (Elephant) ze zelektryfikowanym układem napędowym³. Również USA opracowały w 1943 roku czołg T23 z napędem elektrycznym i oceniły jego osiągi. Jednak te pionierskie pojazdy były napędzane silnikami prądu stałego (DC) i nie stosowano akumulatorów trakcyjnych

¹ G. Bailey, *The Red Ball Express – The unknown link in winning World War Two?*, http://www.historyisnowmagazine.com/blog/2015/8/12/the-red-ball-express-the-unknown-link-in-winning-world-war-two#.Y_J2EXbMJPY.

² H. Taira, T. Yoshikawa, K. Jumonji, *Development of tracked combat hybrid-electric vehicle*, Mobility Research Division, Ground Systems Research Center Acquisition, Technology and Logistics Agency, Ministry of Defense of Japan (ATLA-MOD) Sagamihara-shi, Kanagawa, Japan, https://www.dst.defence.gov.au/sites/default/files/basic_pages/documents/ICSILP18Thu1430_Taira_et_al-Tracked_Hybrid-Electric_Combat_vehicle.pdf; R. Ogorkiewicz, *Electric transmission for tanks*, Int. Defense Review, Vol. 2, s. 196-197, 1990; G. Khalil, *Challenges of hybrid electric vehicles for military applications*, Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf., September, 2009, s. 1-3.

³ Napęd zapewniały dwa 12-cylindrowe silniki benzynowe Maybach HL 120 TRM o mocy 530 KM każdy, zasilające dwa silniki elektryczne Porsche/Siemens-Schuckert o mocy 300 KM. Prędkość maksymalna pojazdu dochodziła do 20 km/h na drodze i 11 km/h w terenie. Z racji olbrzymiej masy zużycie paliwa dochodziło jednak aż do 1200 l/100 km.

ze względu na niedojrzałość – niedoskonałości odpowiednich technologii. W efekcie ostatecznie zrezygnowano z tych programów.

Obecnie głównymi czynnikami, tzw. driverami techniczno-eksploatacyjnymi charakteryzującymi pojazdy wojskowe, są względna prostota użytkowania, niezawodność oraz układ napędowy w dużej mierze uzależniony od komponentów komercyjnych – cywilnych. Niemniej transformacja ekologiczna i złożoność dostarczania energii stanowią wyzwanie dla architektury pojazdów wojskowych oraz obozów wojskowych. Zasadnicza kwestia dotyczy podążania do pełnej energetycznej autonomii dzięki wprowadzaniu nowych technologii napędowych i paliwowych – technologii związanych z energią: jej pozyskiwaniem, konsumpcją, odzyskiwaniem oraz magazynowaniem, w tym w tzw. energetycznym obiegu zamkniętym, także na pokładzie.

Rozważania na temat transformacji energetycznej pojazdów wojskowych dotyczą sektora nie tylko cywilnego, ale i wojskowego. Ekomobilność i w jej ramach elektromobilność bywa bowiem coraz częściej wprowadzana na rynek w ścisłym połączeniu z transformacją energii odnawialnej w komercyjnym łańcuchu dostaw energii elektrycznej. W dodatku po latach pewnego zastoju, „zawieszenia” w dziedzinie ekologizacji taboru niektóre siły zbrojne czołowych armii świata/NATO zaczynają coraz przychylniej spoglądać na to zjawisko. Wpłyne to nie tylko na zakup nowych jednostek sprzętu/taboru, ale przede wszystkim na dostawy części zamiennych oraz transfer niezbędnej wiedzy technicznej do napraw i konserwacji.

Transformacja energetyczna – ekologizacja poprzez ekomobilność⁴ – w sektorze transportowym ze względów politycznych, ideologicznych, wdrożeniowych,

⁴ Elektryfikacja przewozów oznacza, że przewozy są realizowane z pomocą pojazdów ze zelektryfikowanym układem napędowym, czyli przynajmniej hybrydowych – spalinowo-elektrycznych czy ewentualnie gazowo-elektrycznych, z silnikiem spalinowym zasilanym gazem, oraz w pełni elektrycznych i gazowo-/wodoroelektrycznych. Tym samym zelektryfikowany transport da się zdefiniować jako zarówno przewozy wykonywane taborami zelektryfikowanym, jak i konieczność wykonywania niezbędnych operacji doładowania, wraz planowaniem tych operacji i czasem niezbędnym na ich wykonanie. W takim układzie wyrażenie „ekomobilność” ma szerszy wymiar niż jedynie sama „elektromobilność”. Przede wszystkim obejmuje tę elektromobilność – czyli mobilność dokonywaną za pomocą zelektryfikowanych środków przemieszczania – oraz wszelkie inne uznane i dostępne w danym czasie i na danym terenie formy ekomobilności. Jedną z głównych z tych form, poza wspomnianą elektromobilnością, pozostaje gazomobilność, czyli mobilność oparta na pojazdach gazowych – zasilanych gazem. W tej gazomobilności da się wyróżnić mobilność gazową opartą na CNG i LNG oraz biogazomobilność, czyli mobilność opartą na biogazie, z perspektywą redukcji emisji CO₂ nawet o ponad 100%. Osobną kwestię stanowi wodoromobilność, czyli mobilność bazująca na wodrze. W jej ramach można wydzielić czystą wodoroelektromobilność, gdy wodór jako gaz służy do zasilania silników spalinowych, oraz wodoroelektromobilność, gdy elektrycznemu układowi napędowemu towarzyszą wodorowe ogniwa paliwowe i zbiorniki wodoru w formie magazynów energii. Tak szeroko i głęboko zdefiniowana ekomobilność dotyczy zatem nie tylko pojazdów elektrycznych i niskoemisyjnych, lecz także wszystkiego, co ułatwia korzystanie z nich, tak by zmniejszyć wpływ transportu na środowisko. Są to zatem systemy nadzoru i zarządzania, kierujące/prowadzące ludzi i ładunki z jednego miejsca do drugiego, chroniąc przy tym przyrodę i środowisko mieszkalne. Zobacz J. Brach,

strategicznych oraz teoretycznie ekologicznych i po części ekonomicznych dotyczy zastępowania paliw powstałych na bazie kopalnej, takich jak głównie różne rodzaje benzyn i oleju napędowego, ich ekologicznymi zamiennikami, takimi jak:

- biopaliwa w stanie ciekłym i ciekłe e-paliwa,
- gaz ziemny w formie sprężonej (CNG) i skroplonej (LNG),
- biogaz – biometan – także w formie sprężonej i skroplonej (bioLNG/bioCNG)
- wodór w silniku spalinowym spalany jako gaz,
- elektryfikacja układu napędowego.

W przypadku tej ostatniej, oznaczającej ekologizację w formie elektryfikacji, czyli ekomobilność poprzez elektromobilność (mobilność dokonywaną pojazdami ze zelektryfikowanymi układami napędowymi), wyróżnia się trzy jej rodzaje:

- hybrydyzację, polegającą na połączeniu w układzie hybrydowym szeregowym lub równoległym silnika spalinowego i elektrycznego. Przy tym do zasilania silnika spalinowego mogą służyć tradycyjne paliwa ciekłe lub gazowe – wówczas występuje tzw. gazo(wa)-hybrydyzacja;
- pełną elektryfikację, z układami czysto bateryjnymi w formie magazynów energii;
- gazoelektryfikację, która polega na wprowadzaniu silników elektrycznych oraz w formie paliwa wodoru i technologii ogniwi paliwowych do pokładowego wytwarzania energii w oparciu o wodór. Funkcję zasadniczego magazynu energii pełnią tu mianowicie zbiorniki wodoru, jedynie uzupełnione przez akumulatory w liczbie i o pojemności zdecydowanie niższej niż w przypadku układów w pełni elektrycznych.

Obecnie na rynku cywilnym, zgodnie z podejściem „tu i teraz” w ramach tzw. szerokiego ujęcia zagadnienia, polegającego na paliwowym miksie energetycznym, uważa się, że nie ma jednego dobrego wyjścia, ale konkretne propozycje trzeba elastycznie dopasowywać do lokalnych okoliczności/uwarunkowań – tzn. do miejscowej dostępności po akceptowalnej cenie określonych paliw/technologii alternatywnych, ekologicznej świadomości użytkowników i ich chęci do płacenia więcej za alternatywne propozycje, eksploatacyjnego sensu wdrażania paliw i technologii w określonych aplikacjach przewozowych, stosunku TCO pojazdów opartych na technologiach alternatywnych do TCO w tym samym miejscu i czasie (okolicznościach) notowanego przez klasyczne odpowiedniki. Przy czym większość z tych propozycji obarczona jest pewnymi wadami, co właśnie powoduje, że trudno wybrać spośród nich tę najlepszą. Raczej stawia się na lokalizacyjną zindywidualizowaną suboptymalizację, gdyż:

- Podaż biogazów i wszelkich biopaliw ciekłych jest i będzie ograniczona, co w naturalny sposób limituje ich pełniejsze upowszechnianie. W związku z tym raczej odgrywają one i będą odgrywać jedynie rolę uzupełniającą w stosunku do innych paliwowych opcji.

- Metan kopalny pozostaje jednak paliwem opartym na związkach węgla. Dlatego chociaż w trakcie jego spalania dochodzi do emisji mniejszej ilości substancji szkodliwych niż przy spalaniu tradycyjnych paliw ciekłych, to taka emisja nadal zachodzi. W związku z tym nawet na rynku cywilnym metan kopalny uważa się wyłącznie za paliwo przejściowe, używane tak długo, jak długo elektryfikacja nie zacznie wykazywać tzw. naturalnej opłacalności ekonomicznej, oraz w tych zastosowaniach, gdzie wciąż łatwiej da się używać gazu, a nie napędów elektrycznych/napędowych układów zelektryfikowanych.
- Elektryfikacja wciąż pozostaje droga i kłopotliwa głównie ze względu na wyzwania związane z bateriami, odnoszące się do ich nadal relatywnie zbyt małej pojemności oraz zbyt dużej masy własnej, co negatywnie rzutuje na ładowność użyteczną oraz uzyskiwany zasięg. Do tego dochodzą wysokie koszty baterii, ich ograniczona żywotność oraz problemy z ostateczną utylizacją. Doładowanie na trasie, możliwe w przypadku hybryd *plug-in* i odmian w pełni elektrycznych, częściowo likwiduje problemy i ograniczenia wynikające ze zbyt małego zasięgu i zbyt dużej masy baterii, lecz rodzi nowe wyzwania, stanowiące pochodną konieczności wdrożenia na trasie takich pojazdów stacji szybkiego ładowania – szybkich ładowarek. O ile zatem w warunkach pokojowych i zachodnioeuropejskich sieć takich ładowarek powstaje, o tyle już poza Europą Zachodnią dostęp do nich trzeba uważać za ograniczony bądź wręcz żaden. Do tego w warunkach wojennych sieć elektryczna może zostać łatwo zniszczona, co praktycznie dyskwalifikuje wówczas ten typ napędu.

Zarazem istnieje pogląd⁵, że gdy pewna liczba pojazdów cywilnych zostanie wyposażona w częściowo lub w pełni elektryczny napęd, producenci pojazdów prawdopodobnie zmniejszą obecną różnorodność silników spalinowych lub nawet wycofają się z rynku układów napędowych z silnikami spalinowymi z powodu spadającej sprzedaży. Ta tendencja do odchodzenia od silnika spalinowego jest obecnie ugruntowana, również dzięki toczącym się i obserwowanym na arenie międzynarodowej dyskusjom politycznym, które w przyszłości mogą dotyczyć kwestii zakazów rejestracji dla nowych pojazdów z silnikiem z zapłonem wewnętrznym.

Niezależnie od tendencji na rynku cywilnym w przypadku sił zbrojnych, ze względu na specyfikę ich funkcjonowania, część z możliwości paliwowych nie może być powszechnie wdrożona lub może być wdrożona jedynie na ograniczoną skalę⁶. W pierwszym rzędzie dotyczy to gazów, w tym wodoru, które co najwyżej mogą zasilać szosowe pojazdy logistyczne, eksploatowane do zaopatrzenia baz w kraju macierzystym – na terenach pozbawionych *de facto* w ogóle możliwości operowania przez wroga. Niemniej przy obecnych możliwościach technicznych, w tym wyko-

⁵ <https://eda.europa.eu/docs/default-source/posters/11---hybrid-drive-trains-for-military-purpose--hybridt.pdf>.

⁶ Porównaj <https://www.ffi.no/en/publications-archive/hybrid-electric-propulsion-for-military-vehicles-overview-and-status-of-the-technology>.

rzystywaniu do ataku dronów, takie wyjście nie wydaje się odpowiednie. W takiej sytuacji ciekłe biopaliwa są oczywiście rozwiązaniem sensowym użytkowo, lecz pomijając ich cenę, przeważnie wyższą niż ciekłych paliw standardowych, jako zasadniczy problem wskazany wyżej jawi się ich mocno ograniczona dostępność. Co gorsza, tej bariery nie da się realnie usunąć nawet w ciągu kilku najbliższych dekad. Przy tym, w przeciwieństwie do rozwiązań zelektryfikowanych, rozwiązania biopaliwowe mogą być również wdrażane na całym świecie oraz w częściach świata, w których wyzwania związane z kosztami i brak infrastruktury uniemożliwiają pełną elektryfikację. Dlatego obecnie bardziej realistyczna wydaje się wizja częściowej elektryfikacji pojazdów wojskowych, w tym ciężarówek. Taki tabor zelektryfikowany będzie – jak wskazano wyżej – występował jako hybrydy, wersje w pełni elektryczne oraz odmiany gazo-/wodoroelektryczne – odmiany z ogniwami paliwowymi.

Już na samym wstępie tych rozważań trzeba postawić tezę kardynalną – zakres, charakter, sposób, kierunki i tempo elektryfikacji pojazdów wojskowych będą silnie uzależnione od zakresu, charakteru, kierunków i tempa elektryfikacji pojazdów na rynku cywilnym i w związku z tym dostępności odpowiednich technologii komercyjnych – tzw. technologii *civilian/commercial-off-the shelf* – COTS – tzn. cywilny/komercyjny, ale z półki. Powyższe będzie wynikać z kilku zasadniczych faktów. W pierwszym rzędzie dyfuzja elektryfikacji w sektorze cywilnym przełoży się na jakże istotne z punktu widzenia sił zbrojnych zjawiska:

- konkurencyjna cena dostępnych propozycji – sam segment zbrojeniowy pozostaje za mały pod względem popytu – poza Stanami Zjednoczonymi – by pod jego kątem od podstaw opracowywać konkretne systemy i układy. Będą one więc zasadniczo powstawać na potrzeby odbiorców cywilnych, gdzie rynek jest teraz kreowany w sposób nieco sztuczny. Niemniej powoduje to wzrost produkcji oraz dostaw i w rezultacie relatywny spadek kosztu jednostkowego, wskutek zachodzenia efektów skali – korzyści skali oraz krzywej uczenia się i doświadczenia;
- trafiające do pojazdów wojskowych cywilne opracowania będą się już cechować odpowiednim stopniem nie tylko zaawansowania konstrukcyjnego, ale i dopracowania, co może redukować pojawianie się tzw. chorób wieku dziecięcego;
- wraz z upowszechnianiem elektryfikacji w sektorze cywilnym i przewyciężaniem kolejnych związanych z tym barier kosztowych/tzw. mas krytycznych będzie następowała poprawa w zakresie dostępności niezbędnej infrastruktury do ładowania oraz sieci obsługowo-naprawczej.

Trzeba tu bowiem zaznaczyć, że technologie gazowe – silniki na gaz w postaci (bio) CNG/LPG w siłach zbrojnych raczej nie będą rozpowszechnione. O ile w sektorze cywilnym ich wdrożenie może wykazywać pewne zalety ekonomiczne i ekologiczne – szczególnie w odniesieniu do biogazów – biometanu, o tyle w sektorze wojskowym ta kwestia prezentować się będzie zgoła odmiennie. Gazy zawierające metan są i będą niezbyt bezpieczne w sytuacjach zagrożeń i pola walki. Dlatego zaopatrzone w nie pojazdy mogą co najwyżej służyć w jednostkach logistycznych

wykonujących swoje zadania w kraju macierzystym czy innych państwach, gdzie nie istnieje żadne ryzyko ataku ze strony wroga czy ryzyko to zalicza się do przynajmniej minimalnych. Dlatego problematyka napędów gazowych opartych na metanie i biometanie nie będzie stanowiła przedmiotu dalszych rozważań. Kompletnie inaczej ta kwestia prezentuje się w zakresie elektryfikacji oraz gazo-/wodoroelektryfikacji, w odniesieniu do których już od lat pojawiają się pewne propozycje oraz są pierwsze, jeszcze próbne wdrożenia. W związku z tym dalsza część monografii została poświęcona wyłącznie tej tematyce.

W tej absorpcji i implementacji technologii elektryfikacyjnych siły zbrojne pozostaną opóźnione w stosunku do rynku cywilnego o co najmniej dekadę oraz nie będą wdrażać wszystkich występujących na nim rozwiązań. To opóźnienie wynika nie tylko z pewnego sceptycyzmu wojskowych, ale ma także inne przyczyny. Pomijając elementy czysto kosztowe – ekonomiczne, tymi przyczynami są:

- konieczność wcześniejszego zbadania, jakie rodzaje pojazdów nadają się w ogóle do elektryfikacji oraz – jeśli mają już być zelektryfikowane – w jakiej kolejności, w jakim wymiarze i z jaką szybkością elektryfikacja ta powinna zachodzić;
- zdefiniowanie nowych scenariuszy użycia – scenariuszy taktycznych wdrażania poszczególnych typów pojazdów zelektryfikowanych, tak by maksymalnie na poziomie zarówno operacyjnym, jak i strategicznym określić sposób eksploatacji i odmiennego ewentualnego użycia bojowego, szczególnie że pojazdy zelektryfikowane, ze względu na swoje pewne przymioty, na powyższe pozwalają;
- rozpatrzenie scenariuszy wdrożenia nie tylko w stosunku do bliskiego teatru działań wojennych, ale także zwrócenie uwagi na czynniki takie jak uniwersalność i elastyczność wykorzystania, oznaczające możliwość w miarę bezproblemowego wdrożenia danego wydania sprzętu – taboru zelektryfikowanego w dowolnym otoczeniu klimatycznym i geograficznym oraz w scenariuszach prowadzonych działań;
- konieczność określenia niezbędnych zmian w infrastrukturze wspomagającej, w tym w odniesieniu do koszar/miejsc stacjonowania, miejsc ewentualnego przetrzutu operacyjnego i strategicznego, koniecznych zmian w systemie zabezpieczenia logistycznego, łącznie z obrotem częściami zamiennymi i zaopatrzenia w paliwo/energię w różnych scenariuszach i warunkach otoczenia bliższego i dalszego;
- potrzeba wypracowania nowych reguł postępowania w sytuacjach zagrożenia i krytycznych, jak zapłon baterii.

Te właśnie ostatnie składowe powodują, że nie wszystkie typy pojazdów wojskowych nadają się obecnie do każdego sposobu elektryfikacji. Pojazd zelektryfikowany w obszarze licznych rozpatrywanych czynników nie może być bowiem gorszy niż jego aktualny klasyczny odpowiednik. A tymi czynnikami w tej sferze są co najmniej analogiczne (nie gorsze):

- cena nabycia oraz rozpatrywana w całym cyklu życia – tzw. pełne wojskowe TCO,
- masa własna i dostępna nośność/ładowność użyteczna oraz ewentualne zapasy nośności,

- bezpieczeństwo eksploatacyjne w pełnym spektrum możliwych wdrożeń,
- dynamika/mobilność taktyczna i strategiczna,
- bieżące wymagania obsługowe,
- wypełnienie określonych zadań logistycznych, bojowych czy wsparcia,
- zasięg – autonomia paliwowa/energetyczna,
- łatwość zaopatrzenia w paliwo/energię,
- komfort pracy i obsługi przez żołnierzy i inny włączony personel,
- podatność modernizacyjna – uwzględnienie faktu, że pojazdy wojskowe mogą służyć nawet przez 30-40 lat, a nie 10-15, jak na rynku cywilnym,
- łatwość ewakuacji z pola walki,
- łatwość naprawy w warunkach polowych i wojennych,
- bezpieczeństwo eksploatacji i ewakuacji
- dostępność i pewność eksploatacyjna.

Samo zagadnienie stosowania zelektryfikowanych ciężarówek hybrydowych przez siły zbrojne nie zalicza się do nowych – kwestia ta jest na dobre poruszana od co najmniej dwóch dekad. O ile jednak w sektorze transportu kołowego stale postępująca hybrydyzacja i elektryzacja wiąże się z wdrażaniem strategii tzw. zielonej mobilności – ekomobilności, o tyle w odniesieniu do sektora militarnego w tym kontekście należy mówić o militarnej elektromobilności⁷.

Ogólnie hybrydy w drogowym transporcie towarowym znane są od co najmniej 40 lat, ale mimo to nie udało się ich rozpowszechnić na większą skalę. W modelach tych silnik (silniki) elektryczny, dzięki wysokiemu momentowi obrotowemu, już od chwili swojego uruchomienia potrafi skutecznie rozpędzić wielotonowy pojazd, a w trakcie hamowania pracuje jako generator, uzupełniając energię zgromadzoną w akumulatorach. Silnik spalinowy, niezależnie od rodzaju hybrydy, najczęściej pracuje z kolei w optymalnym dla siebie zakresie obrotów, czyli tak jakby auto stale jechało długą, płaską prostą, bez przyspieszeń i hamowań. Dodatkowo w hybrydach równoległych istnieje możliwość czasowego wyłączenia silnika spalinowego i chwilowego poruszania się przez pojazd, a przynajmniej samego przyspieszania, w trybie w pełni elektrycznym. Powyższe skutkuje niższym zużyciem paliwa, przekładającym się na niższą emisję substancji szkodliwych. W modelach w pełni elektrycznych silnika spalinowego zaś w ogóle nie ma, wskutek tego za całość napędu odpowiada jednostka elektryczna.

Na przeszkodzie w bardziej masowym rozpowszechnieniu hybryd i tym bardziej odmian w pełni elektrycznych czy gazowo-elektrycznych stanęło jednak wiele kluczowych elementów, takich jak:

- niezwykle wysoka cena zakupu w następstwie wysokiej ceny samego hybrydowego czy szczególnie elektrycznego zespołu napędowego;
- wzrost masy własnej hybrydowego czy w pełni elektrycznego środka transportu, przekładający się na proporcjonalny spadek jego ładowności użytecznej.

⁷ Porównaj P. Dalsjø, *Hybrid electric propulsion for military vehicles. Overview and status of the technology*, Norwegian Defence Research Establishment (FFI), June 24, 2008, s. 9-79.

Wzrost masy własnej wynika z dużej masy zespołu hybrydowego bądź w pełni elektrycznego wraz z modułem baterii. Tego wzrostu nie są w stanie naturalnie skompensować ani silnik spalinowy – wysokoprężny o mniejszej pojemności i tym samym masie własnej, ani mniejszy i lżejszy zbiornik paliwa czy nawet – w wykonaniach w pełni elektrycznych – brak tego silnika i towarzyszącego mu zbiornika paliwa. Poza tym, jeśli kompensacja wyższej masy własnej w układzie prawnym odbywa się poprzez dopuszczenie do ruchu pojazdów o wyższej dopuszczalnej kodeksowo masie całkowitej, to z punktu widzenia sił zbrojnych wielokrotnie lepiej tę wyższą dopuszczalną kodeksowo masę własną spożytkować na montaż opancerzenia w ogóle/odporniejszego pancerza (wyższe zabezpieczane stopnie ochrony zgodnie z normą STANAG 4569) czy instalację dodatkowego wyposażenia, jak dachowe systemy antidostępowe/antydrone, niż tracić ją na więcej baterii;

- ograniczony zasięg – w trybie w pełni elektrycznym klasyczna hybryda jest dzisiaj w stanie pokonać maksymalnie 40-60 km, a wariant w pełni elektryczny – jedynie z elektrycznym zespołem napędowym – do 200-250 km, w zależności od rodzaju wykonywanych prac, sposobu eksploatacji, natężenia ruchu i topografii pokonywanych tras. Z punktu widzenia sił zbrojnych w wielu przypadkach może się to okazać zdecydowanie za mało;
- konieczność zapewnienia fachowej obsługi dla nowych, nieraz pionierskich technologii w obszarze nośników energii elektrycznej (akumulatory, ultrakondensatory) oraz elektrycznych systemów wysokonapięciowych (większa wydajność układów elektrycznych). Pewnym wyzwaniem może się tu też okazać tworzenie od podstaw wojskowych stałych i mobilnych warsztatów odpowiedzialnych za przeglądy i naprawy taboru zelektryfikowanego. Kwestia dotyczy m.in. konieczności znalezienia fachowców oraz odpowiedniego zabezpieczenia pracy z wysokimi napięciami, szczególnie w warunkach polowych;
- wymaganie w pełni niezawodnego działania w całym okresie i zakresie eksploatacji, w tym przy bardzo niskich temperaturach i bardzo wysokiej wilgotności;
- konieczność efektywnego wkomponowania – wbudowania – „upakowania” układu hybrydowego czy modułu baterii w pojeździe ze względu na ograniczoną nieraz dostępną przestrzeń.

W segmencie cywilnym hybrydy i wersje w pełni elektryczne wykazują bazowe atuty głównie przy wykonywaniu prac, w których swoje zalety może wykazać silnik elektryczny – nieemitujący substancji szkodliwych, cichobieżny w porównaniu ze spalinowym odpowiednikiem i cechujący się wysokim momentem obrotowym już od samego startu. W efekcie w pierwszym rzędzie hybrydy sprawdzają się przy operacjach wymagających częstego zatrzymywania się i ruszania, gdy wyróżniają się poprawionymi własnościami dynamicznymi, oraz wtedy, kiedy wskazane jest ograniczenie hałasu. Powyższe w praktyce odnosi się głównie do jazd wykonywanych w miastach, w tym w ich ścisłych centrach albo w dzielnicach domów jednorodzinnych, bądź w porze nocnej. Zagadnienie dotyczy więc przede wszystkim klasycznej

dystrybucji oraz służb komunalnych przy wywozie nieczystości śmieciarkami. Inne opcje to wybrane zadania w budownictwie czy biznesie przeprowadzkowym. Poza tym do kluczowych kosztowych i eksploatacyjnych zalet hybryd zalicza się ich niższe zużycie paliwa, przeciętnie dochodzące do 25-30% w porównaniu z tradycyjnymi spalinowymi substytutami. Tym samym, oprócz względów czysto ekologicznych, ma ono wymiar ekonomiczny – w pewnym zakresie pozwala skompensować wyższe koszty zakupu. Wyznacznikiem hybryd są też niższe koszty użytkowania ze względu m.in. na rzadsze korzystanie z układu hamulcowego, co przekłada się na wydłużenie okresu do wymiany okładzin hamulcowych.

Ogólnie, w trakcie cywilnej eksploatacji w ruchu miejskim, przyjmując, że do jednej ciężarówki będzie przypisanych dwóch lub trzech kierowców, odmiana hybrydowa może pracować praktycznie przez całą dobę w dystrybucji, przy zbieraniu odpadów lub innych typowych pracach zaopatrzeniowych i porządkowych. 2/3 oszczędności na paliwie pochodzi w niej z odzysku energii hamowania. Spalanie spada również dzięki wyłączaniu silnika przy małej prędkości oraz pomocniczemu elektrycznemu układowi napędowemu. Pojazd może jechać z jego pomocą nawet do prędkości 45 km/h. W tym czasie silnik spalinowy może być wyłączony bądź pracować na biegu jałowym, napędzając podzespoły auta, przykładowo sprężarkę powietrza.

Inna kluczowa kwestia dotyczy tego, że rozwój ciężarówek w obszarze zwiększania stopnia ich proekologiczności miał bardzo duży wpływ na kierunki rozwoju konstruowania opon. Przede wszystkim wraz z wchodzeniem w życie coraz bardziej restrykcyjnych norm czystości spalin (Euro 0/1 – Euro 6) przód pojazdów stawał się coraz cięższy, co oznaczało sukcesywne zwiększanie obciążeń statycznych i dynamicznych, jakim musiały podołać opony. Obecnie dla wytwórców opon do ciężarówek jedno z podstawowych wyzwań stanowi przygotowanie odpowiedniego ogumienia dla wariantów hybrydowych i w pełni elektrycznych. Warianty te bowiem wykorzystują silniki elektryczne o kompletnie innej charakterystyce pracy, w tym przebiegu krzywej momentu obrotowego, niż tradycyjne jednostki spalinowe. To natomiast oznacza konieczność opracowania całkowicie odmiennych opon, w wielu wymiarach różniących się w sferze kluczowych parametrów pracy.

W przypadku odmian z tradycyjnymi silnikami spalinowymi cechy tych silników rzutują na cechy opon w takim zakresie, że wymuszają przygotowanie opon spełniających całe spektrum różnych wymagań. Opony w takich pojazdach służą mianowicie do przyspieszania, hamowania i zatrzymywania się. W związku z tym ich budowę dostosowuje się do przenoszenia bardzo dużych sił wzdłużnych i poprzecznych przy ruszaniu i hamowaniu. Sprawa dotyczy m.in. tego, że w tradycyjnym aucie opona wydatnie wspomaga układ hamulcowy – okładziny hamulcowe. Oczywiście we współczesnych pojazdach użytkowych wykorzystywane są także hamulce silnikowe, a niekiedy dodatkowo retardery – zwalniacze, ale i tak opony muszą wtedy zachowywać swoje podstawowe właściwości. Nie mogą uwzględniać faktu użycia tych elementów, gdyż elementy te mogą być używane relatywnie czę-

to, jak i równie dobrze mogą nie być wcale wykorzystywane przez kierującego. Dlatego opony te muszą brać pod uwagę kluczowy konflikt celów. Opona, która się ściera, wydawnie ułatwiając hamowanie, jest miękka i wobec tego nie uzyska dużych przebiegów. Jednocześnie opona, która może uzyskać takie przebiegi, powinna być wystarczająco twarda, czyli teoretycznie mieć gorsze osiągi przy hamowaniu – powodować wydawnie wydłużenie drogi hamowania.

Tymczasem w odniesieniu do odmian hybrydowych i głównie w pełni elektrycznych omawiane zagadnienie prezentuje się zgoła odmiennie. Podstawowa różnica polega na tym, że opony do takich odmian od razu mogą być optymalizowane, głównie pod kątem redukcji oporów toczenia, czyli zmniejszenia zużycia paliwa. Wynika to z tego, że odmiany te, ze względu na swoją konstrukcję, do hamowania wykorzystują silnik elektryczny, wówczas pracujący jako prądnicą, zasilająca układ elektryczny gromadzący uzyskaną wtedy energię w akumulatorach. Energia ta w tradycyjnych pojazdach tracona jest bezpowrotnie przy hamowaniu jako energia cieplna. W systemach hybrydowych i w pełni elektrycznych odzyskuje się ją zaś w procesie rekuperacji. Pozwala to na wydawnie zwiększenie okresów między wymianami okładzin hamulcowych, a dla samych opon oznacza, że nie muszą współodpowiadać za hamowanie, lecz za to hamowanie odpowiada silnik elektrycznego modułu – zespołu napędowego.

Obecnie na rynku nie ma jeszcze specjalnych opon dedykowanych jedynie do użytkowych samochodów hybrydowych i w pełni elektrycznych. Powód tego należy do prozaicznych – pojazdów tych wciąż jest zbyt mało, by wytwórcom ogumienia opłacało się skomercjalizować odpowiednie produkty. Jednak w najbliższych latach, wraz z postępującą elektryfikacją drogowego transportu osobowego i towarowego, sytuacja zapewne się zmieni. O wiele większa niż dzisiaj liczba egzemplarzy hybryd i całkowitych elektryków spowoduje, iż na rynku pojawi się ogumienie przeznaczone wyłącznie dla nich. Osobna kwestia odnosi się do tego, że w dotychczasowych rozważaniach o oponach poruszono jedynie kwestię ogumienia dla odmian typowo szosowych. Tymczasem siły zbrojne użytkują także niemałe ilości taboru uterenowionego i o wysokiej mobilności taktycznej – wysokiej dzielności w pokonywaniu bezdroży. Jego elektryfikacja będzie zatem oznaczała w pewnym momencie konieczność przygotowania jeszcze innych, bardziej złożonych konstrukcyjnie opon – z jednej strony umożliwiających efektywne i skuteczne działanie taboru poza drogami publicznymi, z drugiej uwzględniających w swojej budowie – jak wskazano – kompletnie inne charakterystyki pracy układu napędowego.

Do tego w segmencie cywilnym testowane są inne, jeszcze bardziej skomplikowane rozwiązania i technologie, jak ogniwa paliwowe w wykonaniach z napędem elektrycznym. Podczas ruchu samochodu silniki elektryczne zasilają dwa dodatkowe źródła energii: ogniwo paliwowe pozwala osiągnąć określoną moc maksymalną, a powyżej tej wartości niezbędną moc gwarantują akumulatory. W czasie postoju ogniwo paliwowe umożliwia, w razie potrzeby, doładowanie akumulatorów. Ponadto ciepło wytwarzane przez ogniwo paliwowe wykorzystuje się do ogrzewania kabiny,

co przekłada się na uniknięcie pobierania energii z akumulatora i w rezultacie na utrzymanie zasięgu auta. Trzeba bowiem pamiętać, że ogniwo paliwowe działa na zasadzie odwróconej elektrolizy. Tworząca wodę reakcja tlenu z powietrza z wodorem zmagazynowanym w zbiornikach stanowi źródło energii elektrycznej oraz ciepła, zgodnie właśnie z zasadą odwróconej elektrolizy. Przy czym w armii użycie wodoru w przypadku ciężarówek mogących mieć styczność z wrogiem nie jest wskazane. Dlatego układy hybrydowe lub w pełni elektryczne obecnie i w najbliższej przyszłości wydają się maksymalnie „awangardowym” – rewolucyjnym wyjściem.

W dziedzinie pojazdów militarnych czynniki stojące za wdrażaniem hybryd należą jednak do częściowo odmiennych niż w odniesieniu do pojazdów cywilnych, chociaż nadal ekonomika paliwowa – oszczędności w zużyciu paliwa – jest kluczowym elementem eksploatacyjnym dla obu sektorów: wojskowego i cywilnego. Militarne zapotrzebowanie – potrzeba posiadania pojazdów hybrydowych wynika także z ich możliwości dostarczania „na pokładzie” przez sam pojazd wystarczającej ilości energii elektrycznej w celu sprostania zwiększonemu zapotrzebowaniu na nią na współczesnym, głównie asymetrycznym polu walki. Ogólnie dochodzi do wzrostu zdolności do wykonywania przez pojazdy szerszego spektrum powierzonych misji w zakresie mobilności, wytrzymałości i przeżywalności. W takim układzie siły zbrojne widzą możliwość i opłacalność zastosowania hybryd zarówno do zadań taktycznych, bojowych, jak i do klasycznego wsparcia logistycznego. Niemniej wprowadzenie wojskowych pojazdów hybrydowych odbywa się wolniej niż w sektorze cywilnym z powodu wielu technicznych wyzwań i problemów, jakie muszą zostać przezwyciężone, zanim ta technologia będzie mogła być rozpatrywana jako opłacalna i celowa dla zastosowań typowo militarnych.

Przyjmując zatem, że generalnie zastosowanie napędów hybrydowych w pojazdach wojskowych ma nieco inne podłoże niż w pojazdach komercyjnych, należy wskazać, iż wiąże się ono z⁸:

- korzystnymi charakterystykami momentu obrotowego silników elektrycznych – mobilność,
- znacznie zmniejszonym zużyciem paliwa (nawet o 30-40%) – logistyka,
- podwójnym źródłem napędu (silnik elektryczny i akumulatory lub silnik spalinowy) – zdolność przetrwania,
- mniejszą emisją hałasu i mniejszym śladem cieplnym – maskowanie,
- mniejszą emisją substancji szkodliwych – ekologia,
- możliwością elastycznego rozmieszczenia zespołów układu napędowego w pojeździe – ergonomia,
- możliwością zasilania broni elektromagnetycznej oraz innych rodzajów uzbrojenia i osprzętu energią elektryczną wytworzoną przez generator i zakumulowaną na pokładzie pojazdu.

⁸ M. Janiszewski, *Hybrydowe pojazdy wojskowe*, rozdz. XII, [w:] P. Simiński (red.), *Rozwój pojazdów wojskowych*, BEL Studio, Warszawa 2013, s. 177.

W efekcie pojazdy hybrydowe oznaczają poprawę skuteczności i komfortu wykonywanych zadań oraz przekładają się na redukcję (militarnego) TCO wskutek notowanych polepszonych – w porównaniu z tradycyjnymi odpowiednikami z silnikami spalinowymi – mobilności, logistyki – niezbędnego wsparcia logistycznego, zdolności przetrwania, maskowania, ergonomii i elastyczności eksploatacyjnej. Dlatego w przypadku armii za eksploatacją hybryd oraz wariantów w pełni elektrycznych mogą przemawiać następujące argumenty:

- mniejsze zużycie paliwa – przy zbiorniku o zadanej pojemności oznacza ono zwiększenie zasięgu – przykładowo ograniczenie zużycia paliwa o 25% przekłada się nawet na 30-procentowy wzrost zasięgu;
- poprawa własności dynamicznych przy ruszaniu, przejeździe przez przeszkody terenowe oraz wjeździe na wzniesienia, wynikająca z korzystnej charakterystyki momentu obrotowego silników elektrycznych;
- korzystna sygnatura akustyczna – cichobieżność – możliwa do osiągnięcia w sytuacji przebywania i poruszania się w trybie w pełni elektrycznym, oznaczająca niemal skryte przebywanie i poruszanie się w strefach bezpośredniej styczności z przeciwnikiem;
- większa zdolność do zasilania rozbudowanych systemów elektroniki pokładowej, zgłaszających wyższe zapotrzebowanie na energię elektryczną;
- możliwość sprostania wyższemu zapotrzebowaniu na energię przez liczne systemy pokładowe, w tym systemy uzbrojenia, łączności czy zakłócające;
- obniżona sygnatura termalna przy poruszaniu się w trybie w pełni elektrycznym – redukuje ona możliwość wykrycia ruchu pojazdu na skutek stwierdzenia jego o wiele wyższej temperatury niż temperatura otoczenia;
- możliwość wykorzystania – co w pierwszym rzędzie odnosi się do wykonania hybrydowych – zespołu napędowego w roli stacjonarnego generatora do napędu i/czy zasilania urządzeń zewnętrznych (tzw. eksport napędu – zasilania na zewnątrz);
- zmiana koncepcji budowy odmian o wysokiej dzielności terenowej – zamiast klasycznego układu napędowego z ciężkimi skrzynią biegów, skrzynią rozdzielczą i mostami napędowymi mogą one mieć małe silniki elektryczne zainstalowane w piastach każdego z kół, poprzez generator zasilane z silnika spalinowego o mniejszej mocy i pojemności. Silniki te mogą być uruchamiane sukcesywnie w przypadku wzrostu zapotrzebowania na moment obrotowy, pojawiającego się przykładowo w trakcie pokonywania bardziej wymagających przeszkód terenowych czy ruszania albo nagłego przyspieszania. Takie rozwiązanie pozwoliłoby też zresztą na znaczne skompensowanie wyższej masy własnej hybrydowego zespołu napędowego;
- powiązana z punktem poprzednim duża (większa) objętość użytkowa wnętrza właśnie dzięki wyprowadzeniu elementów napędowych do kół i braku wałów, przekładni itp.

Przy tym może być jeszcze rozważone wprowadzenie zasilania z punktów zewnętrznych, realizowanego na postoju. Kwestia dotyczy technologii *plug-in*, czyli zasilania za pomocą przyłączy 400-woltowych przykładowo z połowych generato-

rów. Wówczas na postoju ciężarówka hybrydowa czy szczególnie z w pełni elektrycznym systemem napędowym byłaby zasilana w taki sposób z takiego generatora. Zwiększałoby to jej efektywny zasięg, a w przypadku samych hybryd oznaczało możliwość skrytego poruszania się na dłuższym odcinku jedynie za pomocą samego napędu elektrycznego, z wyłączoną jednostką spalinową. Wersje z w pełni elektrycznym napędem poruszają się mianowicie wyłącznie w taki „skryty” sposób, ponieważ w ogóle nie są zaopatrzone w jednostkę spalinową.

Bariery są zaś analogiczne jak w przypadku sektora cywilnego. Do najważniejszych z nich należą⁹:

- Przewidywana wyższa cena nabycia – dla hybryd przeciętnie wyższa nawet o 30-50%, ze względu na małoskalowy charakter produkcji. Aczkolwiek większe upowszechnianie hybryd na rynku cywilnym może przynieść zmniejszenie tej ceny – o ile, trudno obecnie wyrokować. Tym bardziej, że aktualnie niewiele czynników wskazuje, aby hybrydy i odmiany w pełni elektryczne stały się bardziej popularne na rynku cywilnym przed 2025-2030 rokiem – pewien wzrost ich znaczenia jest przewidywany dopiero po tej dacie, przy czym informacje te należy teraz rozpatrywać wyłącznie jako czysto orientacyjne.
- Wzrost stopnia skomplikowania budowy, oznaczający wzrost wymagań obsługowych i w efekcie utrudnienie wykonywania przeglądów czy napraw w warunkach polowych czy na misjach zagranicznych.
- Konieczność wkomponowania układu hybrydowego w podwozie, co przy modelach terenowych może stanowić pewne wyzwanie.
- Wyższa masa własna negatywnie przekładająca się na użyteczną ładowność.
- Ograniczony zakres – sens zastosowania; hybrydy sprawdzą się w armii głównie w zastosowaniach terenowych oraz do realizacji misji zwiadowczych czy innych wymagających skrytego poruszania się. Natomiast w klasycznej logistyce sama idea ich wdrożenia wydaje się mocno dyskusyjna. Da się jednak wydzielić pewne zadania, w których warianty hybrydowe mogą się sprawdzić, jak w odniesieniu do kategorii HET (*Heavy Equipment Transporter* – tzw. transporter ciężkiej techniki bojowej).
- Pogorszenie zasięgu wraz ze starzeniem się akumulatorów oraz w sytuacji zmiany warunków pracy.
- Możliwość eksplozji zespołu akumulatorów wskutek wypadku czy ostrzału.
- Możliwość porażenia prądem o dużym natężeniu.
- Konieczność wprowadzenia układu stabilizacji temperatury.
- Zwiększenie zawodności.
- Konieczność dokładnego uszczelnienia – zabezpieczenia w modelach terenowych, zdolnych do pokonywania z marszu przeszkód wodnych o głębokości od 750-1200 mm (głębokość brodzenia) wzwyż, akumulatorów oraz układów elektrycznych i elektronicznych przed zalaniem, mogącym unieruchomić samo-

⁹ Zobacz m.in. M. Janiszewski, wyd. cyt., s. 184-185.

chód. W rezultacie systemy elektroniczne i niektóre elektryczne albo muszą być umieszczone wysoko, albo mają być odpowiednio chronione przed dostaniem się wody. Tym samym wydaje się tu problematyczne osiągnięcie dostatecznie dobrego poziomu ochrony – z jednoczesnym zachowaniem warunku, aby wozy te były przystosowane do transportu lotniczego samolotami C-130, ze względu na konieczność zachowania masy poniżej 19 000 kg¹⁰.

- Duża liczba układów elektroenergetycznych powodujących wzrost zakłóceń elektromagnetycznych.
- W przypadku instalacji silników elektrycznych w piastach kół znaczne zwiększenie masy nieresorowanej pojazdu.
- Zagrożenie pożarem czy wybuchem akumulatorów w sytuacji trafienia w nie czy trafienia w sam pojazd. Realnie pojazd taki można już spisać na straty, gdyż w warunkach bojowych praktycznie nie ma – czy pozostaje ona mocno ograniczona – możliwości skutecznego zgaszenia takich palących się akumulatorów. Dodatkowo w przypadku trafienia w akumulatory i ich wybuchu straty mogą być od razu bardzo wysokie, wyższe niż w sytuacji trafienia w klasyczny zbiornik paliwa.
- Fakt, że napędy elektryczne w wojsku muszą być projektowane z uwzględnieniem specyficznych wymagań bezpieczeństwa, w tym zagrożeń związanych z możliwością wybuchu. Konstrukcje i zastosowane w nich materiały mają zabezpieczać przed ryzykiem eksplozji i pożarów. W przypadku baterii litowo-jonowych, często używanych w napędach elektrycznych pojazdów wojskowych, konstruktorzy stosują różne zabezpieczenia. W celu zminimalizowania ryzyka wybuchu baterie te są nierzadko podzielone na mniejsze jednostki, z których każda jest zabezpieczona przeciwprzeciążeniowo i przeciwzwarceniowo. Do tego wewnątrz baterii są zastosowane systemy chłodzenia, zapobiegające przegrzaniu, a tym samym zmniejszające ryzyko wybuchu¹¹. Niemniej, z drugiej strony, wprowadzanie tego rodzaju dodatkowych zabezpieczeń powoduje:
 - wzrost stopnia skomplikowania budowy takich układów;
 - wzrost kosztów takich układów na skutek m.in. wskazanego wzrostu skomplikowania budowy. Pakiety akumulatorów, specjalnie zabezpieczone do celów wojskowych, będą bowiem stanowiły wersje rozwojowe – zmilitaryzowane pakiety przeznaczone na rynek cywilny. Z tego będzie właśnie wynikał wzrost nakładów na ich nabycie – z powiązanych relatywnie niewielkiej skali powstawania oraz konieczności zastosowania innych rozwiązań, być może innych materiałów bądź/i większej ilości tradycyjnych materiałów itd.;

¹⁰ P. Simiński, *Hybryda wojskowa*, <http://www.militaryrok.pl/index.php/technika/159-hybryda-wojskowa.html>.

¹¹ P. Simiński, recenzja wydawnicza monografii dr. hab. J. Bracha, *Ekologizacja współczesnych pojazdów wojskowych – główne kierunki rozwojowe oraz zasadnicze wyzwania i ograniczenia. Wybrane zagadnienia*”, maszynopis na prawach rękopisu, Siedlce, 21 marca 2023.

- wzrost masy, co negatywnie wpływa na dostępne ładowność/nośność i tym samym może się źle przekładać na masę możliwego do instalacji wyposażenia bądź założenia pancerza (stopnia opancerzenia danego pojazdu), lub – by zachować dane opancerzenie – konieczność szukania oszczędności masowych w innych sferach;
- wzrost zajmowanej powierzchni/przestrzeni, w pojazdach wojskowych zawsze w jakimś zakresie deficytowej.
- Tym samym takie dodatkowo zabezpieczone moduły akumulatorów dla pojazdów wojskowych, by zagwarantować odpowiedni minimalny poziom bezpieczeństwa ich funkcjonowania w warunkach bojowych, muszą być droższe, cięższe, większe i bardziej skomplikowane konstrukcyjnie. To zaś w naturalny sposób ogranicza ich komercjalizację.
- Fakt, że system hybrydowy również zwiększa masę, chociaż w dużej mierze można to zrekompensować zmniejszonymi rozmiarami silnika wysokoprężnego, jeśli dojdzie do tzw. downsizingu (zamiany silnika większego, cięższego i mocniejszego na mniejszy, lżejszy i słabszy). Oprócz ogniw baterii system regulacji termicznej, zarządzanie energią i komponenty napędu elektrycznego zwiększają masę systemu. Komponenty te zwiększają też złożoność i problemy związane z konserwacją. Technik terenowy musi więc być specjalnie przeszkolony, aby móc diagnozować i naprawiać te systemy w trudnych warunkach. Zatem w sytuacji, gdy do wielu nowoczesnych pojazdów wojskowych dodano nową technologię, każda taka technologia wymaga szkolenia. Tymczasem z punktu widzenia sił zbrojnych dodana technologia HEV (*Hybrid-Electric Vehicles*) nie powinna być eksploatacyjnie i naprawczo zdecydowanie inna i w tym kontekście nie powinna być użytkowo uciążliwa¹².
- Wysokie ceny akumulatorów i ich wciąż relatywnie niska pojemność, oznaczająca ograniczony zasięg w sytuacji poruszania się w trybie w pełni elektrycznym. Zarazem na rynku cywilnym użytkowe pojazdy w pełni elektryczne o dopuszczalnej masie całkowitej od 8000 kg wżwyż powoli, ale systematycznie zyskują na znaczeniu. Początkowo, głównie ze względu na zbyt mały zasięg (pomijając elementy kosztowe), były one wykorzystywane do realizacji zadań na krótkich dystansach – w dystrybucji miejskiej, sektorze komunalnym (zasadniczo jako śmieciarki) oraz w sektorze kuriersko-pocztowym (KEP). Niemniej problem zasięgu/pojemności akumulatorów, dzięki także potężnym kwotom inwestowanym w technologie elektryfikacyjne, z czasem udało się przezwyciężyć. Dlatego już w latach 2020-2022 na rynku zaczęły się pojawiać wersje cechujące się nominalnym zasięgiem ponad 150-200 czy wręcz 220-250 km. To z kolei dało możliwość wprowadzenia pojazdów

¹² I. Miedema, *Hybrid-electric military vehicles for the canadian army*, Her Majesty the Queen in Right of Canada, as represented by the Minister of National Defence, 2016 Canadian Forces College – Collège Des Forces Canadiennes JCSP 42 – PCEMI 42 2015 – 2016 JCSP Service Paper – PCEMI Étude Militaire.

w pełni elektrycznych do kolejnych zastosowań, zarówno w przewozach tzw. *general cargo* (dystrybucja lokalna i regionalna), jak i w zastosowaniach specjalizowanych i specjalistycznych. W tych ostatnich przypadkach warianty zelektryfikowane zaczęto przygotowywać do wykonywania zadań, jakie jeszcze kilka lat temu wydawały się mało prawdopodobne do realizacji przez tabor elektryczny ze względu na relatywnie duże zapotrzebowanie samej zabudowy na energię czy też konieczność zabezpieczenia długotrwałego pewnego działania. Z takich sektorów i zabudów wymienić można:

- komunalny – nadwozia zmiatarek i do czyszczenia kanalizacji,
- budowlany i wydobywczy – żurawie, wywrotki, w tym nawet ciężkie kopalnie, hakowe systemy załadownicze, a nawet betonmieszarki,
- pożarniczy – nadwozia ratowniczo-gaśnicze i autodrabiny (Rosenbauer),
- autotransportery.

Co więcej, od lat 2021-2022 w Szwecji zaczynają być realizowane próby z w pełni elektrycznymi ciężarówkami wchodzącymi w skład zestawów nie tylko kategorii EMS, czyli o długości do 25,25 m i dopuszczalnej masie całkowitej do 60 000-64 000 kh, ale i HCT-HCV, czyli o długości od 25,25 do 32-34,5 m i dopuszczalnej masie całkowitej powyżej 60 000-64 000 kg (realnie obecnie 64 000-72 000 kg). W dodatku zestawy takie już wykonują przewozy nie tylko *general cargo* (DHL) i dystrybucyjne (żywności – przykładowo Dagab) oraz dowozowo-odwozowe na ostatniej mili w kombinowanych przewozach drogowo-kolejowych (Jula), ale przeznaczono je także do przemieszczania ładunków niebezpiecznych (Wibax), rudy żelaza (kopalnie odkrywkowe – Boliden) oraz drewna z lasu (SCA). Niemniej problemem, ze względu na relatywnie niską pojemność baterii, pozostaje w takich sytuacjach rzeczywisty zasięg. W zależności m.in. od masy zestawu, topografii przejeżdżanych tras, natężenia ruchu, warunków pogodowych na tym etapie długość pokonywanych odcinków dochodzi do 80-120 km. Z punktu widzenia sił zbrojnych są to oczywiście wartości nie do przyjęcia. Tym bardziej, że mowa tu o klasycznym ruchu powtarzalnym – wahadłowym, na zadanych znanych trasach, gdzie da się przeprowadzić optymalizację stylu jazdy oraz gdzie do mało prawdopodobnych zaliczają się sytuacje nieprzewidziane czy nietypowe. Tymczasem wojskowy tabor musi uwzględniać możliwość eksploatacji specyficznej, środowiskowo jednorazowej, w dodatku w otoczeniu dotąd nieznanym czy słabo rozpoznanym. Poza tym użycie na polu bitwy rządzi się swoimi prawami ze względu na możliwość pojawienia się przez cały czas różnych specyficznych jednostkowych scenariuszy zajścia pewnych sytuacji. Bezpieczny zapas zasięgu odgrywa tu w takim razie niebagatelną rolę.

W tym kontekście trzeba zwrócić uwagę, że obecnie żołnierze – obsługa pojazdów, dla zwiększenia zasięgu taboru, zabierają do tych pojazdów dodatkowe kanistry z paliwem, zazwyczaj 20-litrowe. Tym bardziej, że pojazdy wojskowe konstrukcyjnie są przygotowane do bezpiecznego zabrania tych kanistrów, gdyż zostały zaopatrzone w specjalne stelaże. Pozwala to wydłużyć zasięg, w zależności od licznych czynników, w tym liczby zabranych dodatkowych kanistrów, rodzaju pojazdu i no-

towanego średniego zużycia paliwa, nawet o ponad 100 km. W przypadku natomiast konieczności zagwarantowania autonomii paliwowej na dłuższych dystansach (*longer operations*) są wykorzystywane ciężarówki cysterny, poruszające się w danym konwoju lub – rzadziej – samodzielnie, i zabezpieczające, że ten konwój nie stanie na dłuższy czas z powodu braku paliwa. Czas postoju *de facto* jest limitowany czasem tankowania w warunkach polowych określonej liczby pojazdów. Wychodzi się tu z założenia, że jakikolwiek (dłużej) stojący pojazd stanowi niezwykle łatwy cel ataku dla sił wroga. Jednocześnie z logistyczno-organizacyjnego punktu widzenia takie mobilne tankowanie pozostaje o wiele łatwiejsze i szybsze do przygotowania niż doładowywanie na trasie pojazdów w pełni elektrycznych. Pojazdy takie muszą bowiem: albo być obsługiwane przez stacjonarny punkt ładowania, co w warunkach wojennych może się realnie okazać trudne czy wręcz niemożliwe do wykonania, albo mieć zabezpieczony dostęp do:

- następnego pojazdu z mobilnym (kontenerowym) magazynem energii,
- innych naładowanych baterii, jeśli szybka wymiana takich baterii okazuje się możliwa,
- mobilnego bądź stacjonarnego generatora prądu.

Do tego dochodzi sam czas ładowania. Taki proces może się więc okazać niezwykle czasochłonny, co naraża pojazdy i ich załogi na atak – szczególnie stojący dłużej pojazd zawsze stanowi łatwiejszy cel ataku niż pojazd poruszający się.

W związku z tym, bazując także na argumentach i faktach przytoczonych we wcześniejszej części pracy, obecnie pełna elektryfikacja pojazdów wojskowych nie tyle nie jest w ogóle możliwa, o ile jest możliwa na ograniczoną skalę. W pierwszym rzędzie, z powodów zaznaczonych wcześniej, pomijając już problem samych kosztów dotyczących wad współczesnych technologii akumulatorowych i ładowania, objąć ona może:

- pojazdy lżejsze, jak lekkie terenowe,
- pojazdy cięższe, ale szosowe i eksploatowane w typowym zabezpieczeniu logistycznym baz materiałowych, gdy nie okazuje się konieczne pokonywanie znacznych dystansów oraz nie ma oczywiście opcji styczności z wrogiem
- wybrane rodzaje wozów bojowych, w tym transportery opancerzone czy nawet czołgi.

I takie pierwsze wdrożenia są już realizowane.

Niemniej generalnie warto podkreślić, iż ceny akumulatorów – krytycznego i negatywnego czynnika – przez kilka lat spadały średnio o jeden punkt procentowy co cztery tygodnie (do 2021-2022 roku). Ponadto notowano inne pozytywne tendencje, jak wzrost pojemności akumulatorów oraz długości okresu ich eksploatacji – użytkowego życia. Cykl użytkowego życia najbardziej popularnych akumulatorów litowych rośnie w tym samym tempie – stopniu, co spada ich cena. Przykładowo specjaliści z koncernu Daimler Trucks przewidywali, że w latach 1997-2025 koszty nabycia akumulatorów spadną 2,5-krotnie – z przeciętnie 500 do 200 EUR/kWh, podczas gdy w tym samym czasie ich pojemność/wydajność wzrośnie o ten sam

współczynnik – 2,5 razy, z 80 do 200 kWh/1000 kg. Powyższe zjawisko określono nawet mianem współczynnika 2,5. Przy czym w tej analizie nie uwzględniono faktu, że sam proces produkcji akumulatorów może z czasem znacznie podrożeć, ze względu m.in. na wzrost kosztów wytwarzania, w tym kosztów energii, oraz kosztów wykorzystywanych surowców, w tym litu. Powyższe oznacza zatem wzrost ceny za każdą kilowatogodzinę pojemności. W związku z tym analiza dokonana przez Mercedesa dosyć szybko stała się nieaktualna. Przykładowo w latach 2021-2023 cena za 1 kWh nowoczesnych baterii wzrosła z 300 do 500 EUR¹³, co czyni kompletnie bezużytecznymi wiele wcześniejszych analiz i obliczeń. To z kolei może oznaczać konieczność przemyślenia czy redefiniowania pewnych posunięć.

W rzeczywistości koszty są czynnikiem decydującym o możliwości przyjęcia przez armię pojazdów taktycznych i bojowych z napędem elektrycznym. Koszty obejmują początkowe koszty zakupu, koszty operacyjne (połączenie kosztów paliwa w przypadku pojazdów tradycyjnych i kosztów akumulatorów w przypadku pojazdów napędzanych elektrycznie), koszty cyklu życia (konserwacja i utylizacja) oraz koszty przejściowe. Zarazem oczekuje się, że koszty cyklu życia pojazdów elektrycznych będą nadal wykazywać tendencję spadkową, podczas gdy systemy hybrydowe zbliżają się lub są obecnie uważane za neutralne pod względem kosztów w porównaniu z tradycyjnymi systemami paliwowymi¹⁴. Co ważne, względne koszty pojazdów zelektryfikowanych sukcesywnie spadają, podczas gdy oczekuje się, że przyszłe koszty pojazdów z silnikiem spalinowym będą nadal rosły wraz z inflacją i niższym popytem. Względny spadek kosztów pojazdów zelektryfikowanych wynikał przede wszystkim z niższych kosztów akumulatorów, które stanowią znaczną część początkowych kosztów pojazdu oraz kosztów długoterminowych¹⁵.

Niemniej jednocześnie pojazdy taktyczne i bojowe z napędem elektrycznym mają znacznie mniej ruchomych części i będą z natury bardziej niezawodne niż te z tradycyjnymi układami napędowymi napędzanymi silnikami spalinowymi (ICE). Zmniejszona liczba ruchomych części wynika z tego, że pojazdy elektryczne nie potrzebują skomplikowanych skrzyń biegów i układów smarowania, dystrybucji paliwa i zarządzania powietrzem. To ta prostota znacznie zmniejsza właśnie liczbę ruchomych i niezbędnych części. Ogólnie biorąc, pojazd elektryczny może mieć zaledwie 20 ruchomych części w układzie napędowym, podczas gdy porównywalny pojazd z silnikiem spalinowym (dostępny na rynku lekki pojazd dostawczy) może mieć nawet 2000 ruchomych części. Do tego bardziej modułowe komponenty (komputery, wyświetlacze, akumulatory) będą miały wyraźny wpływ na niezawodność

¹³ Dane wewnętrzne pozyskane od polskiego producenta baterii elektrycznych – firmy BMZ, 2023 rok.

¹⁴ A. Winston, *Inside UPS's electric vehicle strategy*, Harvard Business Review, March 29, 2018, https://hbr.org/2018/03/inside-upss-electric-vehiclestrategy?utm_source=feedburner&utm_medium=feed&utm_campaign=Feed%3A+harvardbusiness+%28HBR.org%29.

¹⁵ L. Goldie-Scot, *A behind the scenes take on lithium-ion battery prices*, March 5, 2019, Bloomberg NEF, <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/>.

pojazdów elektrycznych i łańcuch logistyczny niezbędny do ich obsługi. Jeśli na przykład rozmieszczony taktyczny pojazd elektryczny ma 100 części zużywalnych lub podatnych na awarie, podczas gdy jego tradycyjny odpowiednik ICE ma 1000 porównywalnych części, pakiet logistyczny (LOGPAC) obsługujący ten pojazd może zostać zmniejszony nawet o 90%. To zmniejszenie rozmiaru LOGPAC do jednostek wysyłkowych redukuje ryzyko taktyczne i operacyjne dla logistycznego łańcucha dostaw. Efekt tej zwiększonej niezawodności generuje zmniejszenie zapotrzebowania na wsparcie logistyczne. Większa niezawodność przekłada się zaś bezpośrednio na mniejsze powierzchnie magazynowe i mniej roboczogodzin obsługi technicznej, zredukowane wymagania warsztatowe, mniej przestrzeni ładunkowej potrzebnej do przewożenia części zamiennych i naprawczych, mniejsze obszary wsparcia logistycznego i więcej dostępnych w danym momencie systemów bojowych. Wszystkie te korzyści pozwolą jednostkom bojowym działać dłużej, szybciej, przy mniejszej zależności od wsparcia zewnętrznego, w tym logistycznego, oraz osłabią zdolność wroga do namierzania ich, prowadząc do poprawy przeżywalności. Oszczędności te można również ponownie wykorzystać¹⁶.

Ponadto za stosowaniem energii elektrycznej – podstawowego źródła energii w ramach pakietu militarnej elektromobilności – przemawia kilka zalet, w tym to, że jest ona czysta oraz może powstawać ze źródeł odnawialnych w sposób ekologicznie czysty. Do takich źródeł należą: ogniwa paliwowe, solary, elektrownie wiatrowe i wodne oraz kontrowersyjne elektrownie atomowe. Kwestią dyskusyjną pozostaje natomiast cena energii. Do czasu kryzysu energetycznego spowodowanego wojną na Ukrainie przyjmowano, że energia jest tania. Od przełomu lat 2021-2022 argument ten się nieco już zdezaktualizował.

Niemniej zarazem da się wyróżnić dwie zasadnicze wady energii elektrycznej jako podstawowego paliwa w ramach pakietu wojskowej elektromobilności – są nimi kwestie bezprzewodowej dystrybucji oraz trudności w jej gromadzeniu. Kluczowymi z najważniejszych problemów ograniczających rozwój elektryfikacji napędów wojskowych są mianowicie efektywne i pojemne urządzenia do przesyłu – dystrybucji oraz akumulacji energii¹⁷. Obecnie przesyła się ją za pomocą sieci (militarnie łatwych do uszkodzenia) oraz gromadzi głównie w akumulatorach, relatywnie ciężkich i o względnie niskiej pojemności, szczególnie w porównaniu z pojemnością zbiorników tradycyjnego paliwa oraz wartością energetyczną paliwa w nich zgromadzonego. A mała pojemność akumulatorów – zbiorników negatywnie przekłada

¹⁶ J. McMahon, *More electric cars mean fewer mechanical jobs*, Forbes, May 30, 2019, <https://www.forbes.com/sites/jeffmcMahon/2019/05/30/more-electric-cars-fewer-manufacturing-jobs/#6ad250ff3378>; P. Hummel, Q-Series Reports, UBS Global Research, *USB Evidence Lab Electric Car Teardown-Disruption Ahead?*, May 18, 2017, <https://neo.ubs.com/shared/d1wkuDIEbYPjF/>; *Drive Electric Inc., What is an EV?*, <https://driveelectric.org.nz/individuals/what-is-an-ev/>; *Market Watch*, <https://www.marketwatch.com/story/10-things-that-make-the-tesla-a-great-car-2016-08-19>.

¹⁷ P. Simiński, *Hybryda wojskowa*, <http://www.militaryrok.pl/index.php/technika/159-hybryda-wojskowa.html>.

się właśnie na zasięg, podczas gdy wysoka masa własna ogranicza ładowność. Poza tym mogą być rozważane superkondensatory/ultrakondensatory, też niepozbawione pewnych wad, ale w układach kosztowym i użytkowym stanowiące sensowną alternatywę w stosunku do akumulatorów. Inne teoretycznie możliwe propozycje to akumulatory – mechaniczne – koła zamachowe i hydrauliczne – gazowe oraz hydrauliczne napędy hybrydowe¹⁸. Te ostatnie umożliwiają też korzystanie z efektu Boost, czyli dodatkowego chwilowego zwiększania mocy przy wyższym zapotrzebowaniu na nią, co zazwyczaj oferują tylko drogie napędy elektryczne. Funkcja chwilowego, dodatkowego przyspieszenia jest realizowana w wyniku współpracy klasycznego silnika spalinowego z elementami hydraulicznymi oraz akumulatora ciśnieniowego z azotem. System hybrydowy oferuje wspomaganie silników benzynowych lub wysokoprężnych w obszarze, w którym nie mogą one pracować z optymalną efektywnością. Hydrauliczno-mechaniczny układ napędowy umożliwia również realizację niedrogich, wytrzymałych i łatwych w serwisowaniu napędów hybrydowych, niewymagających specjalnej infrastruktury, i może być stosowany na całym świecie. W dodatku, w porównaniu z akumulatorem litowo-jonowym auta elektrycznego, akumulator ciśnieniowy ma wprawdzie niższą pojemność i zapewnia mniejszy zasięg, ale ładuje się znacznie szybciej i może bardziej efektywnie wykorzystywać dodatkową energię silnika spalinowego.

Oprócz tego wykorzystanie pojazdów napędzanych elektrycznie zapewnia możliwość częściowego lub całkowitego „tankowania” pojazdów przy użyciu systemów wytwarzania energii organicznych dla rozmieszczonych sił¹⁹. Ta lokalizacja logistyki energetycznej, nie pozbawiona jednak szeregu wyzwań, zasadniczo oddziela siły lądowe od słabych punktów logistycznych w teatrach strategicznych i operacyjnych. Znacznie zwiększa niezależność i wytrzymałość jednostek, działając jednocześnie jako strategiczny środek odstraszający. Przejście od strategicznej do taktycznej logistyki energetycznej ma tendencję do negowania skuteczności strategicznych systemów A2/AD (systemy „antydośćepowe” A2/AD – *Access Denial/Area Denial* – definiowane jako połączenie ogółu możliwych środków, które mogą wielowarstwowo ograniczyć dostęp potencjalnego przeciwnika do danego obszaru – teatru działań), poprzez usunięcie dużych strategicznych celów energetycznych, przy jednoczesnym zwiększeniu operacyjnej odporności energetycznej. Ta zwiększona odporność wynika ze zdolności do dostarczania energii elektrycznej przez większą liczbę zdecentralizowanych źródeł, w tym infrastrukturę kraju gospodarza i wstępnie rozmieszczone węzły energetyczne ładowane przez różne systemy energii odnawialnej lub alternatywnej.

Poza tym należy zwrócić uwagę na element dotychczas niezwykle rzadko poruszany w opracowaniach fachowych, w tym naukowych. Obecnie (stan na 2023 rok) przyjmuje się, że akumulator w pojeździe może być wykorzystywany

¹⁸ <http://www.bosch-prasa.pl/informacja.php?idinformacji=1502>.

¹⁹ *White Paper – Electrification of U.S. Army ground force (An evolutionary revolution)*, 2019, s. 12, https://calstart.org/wp-content/uploads/2020/10/Vehicle_Electrification_Paper_29JUN20.pdfm.

w ramach swojego pierwszego życia – czyli gdy jego użyteczna pojemność nie spadnie poniżej 70-80% wartości nominalnej – przez 6 do 8 lat, w zależności od klimatu, warunków garażowania sprzętu, sposobu eksploatacji pojazdów, sposobu ładowania (szybkie, wolne), jakości samych akumulatorów i innych pomniejszych czynników. Te 6-8 lat bywa z grubsza już akceptowane na rynku cywilnym, chociaż bardziej odpowiedni byłby okres przynajmniej 10-12 lat. Jednak w przypadku sił zbrojnych są to zbyt krótkie okresy deprecjacji fizycznej, gdyż dla wielu rodzajów sprzętu kołowego i gąsienicowego wynoszą one nawet 20-30 czy więcej lat. I tyle akumulatory powinny przetrwać w pojeździe. Niemniej nie przetrwają, ponieważ takie są ich fizykochemiczne właściwości i maksymalnie po 10 latach będą musiały być bezwzględnie wymienione na nowe. Niezależnie od tego, czy dany pojazd był eksploatowany intensywnie, czy też nie – tzn. przez większość czasu stał w garażu. Tym samym w czasie trzech dekad użytkowania akumulatory w pojeździe zelektryfikowanym muszą być wymienione co najmniej dwa razy. Gdy okres tego użytkowania wydłuży się do czterech dekad, mogą być zaś niezbędne trzy czy nawet cztery takie wymiany, o ile w międzyczasie nie dojdzie do komercjalizacji akumulatorów o gwarantowanej długości pierwszego życia określonej na 10-12 lat. Obecnie trudno jest wyrokować na ten temat. Przy czym, niezależnie od tych dywagacji, każda wymiana akumulatorów raczej będzie relatywnie droga. I tę o wiele wyższą cenę bezwzględnie należy wpisać w militarne TCO analizowanego sprzętu zelektryfikowanego. Zarazem w przypadku modeli hybrydowych, w których tych akumulatorów jest mniej, mniejsze pozostaną koszty takiego zastąpienia. W odniesieniu do wydań czysto elektrycznych będą zaś one zdecydowanie wyższe.

W Europie hybrydyzacja i powiązana z nią elektryfikacja ciężarówek wojskowych przebiega, niestety, bardzo powoli. I to mimo że na rynku cywilnym praktycznie każdy z liczących się graczy proponuje stosowne warianty, często realnie nadal bardziej prototypowe czy wręcz eksperymentalne, ale teoretycznie dostępne. Sprawdzane są także, m.in. przez Mercedesa czy Volvo, technologie napędów wodorowych. Jednak w zakresie hybrydyzacji i elektryzacji wariantów wojskowych od kilku lat prym wiodą Amerykanie. Doczekali się oni bardzo ciekawych konstrukcyjnie i koncepcyjnie opracowań przedprodukcyjnych czy wręcz produkcyjnych. Europa pozostaje tu niestety z tyłu. Przyczyn stojących za takim obecnym obrazem sytuacji da się wyodrębnić co najmniej dziewięć.

Po pierwsze, Stany Zjednoczone – jako jeden kraj – same tworzą znaczny wewnętrzny cywilny i militarny rynek zbytu, o potencjale popytowym porównywalnym czy wręcz większym niż cały rynek europejski – dokładnie zachodnioeuropejski – sumarycznie wszystkie rynki Europy Zachodniej. Tym samym w omawianej dziedzinie armia amerykańska – jako tzw. *market maker* (twórca rynku) – poprzez wyłącznie własne zamówienia jest w stanie wykreować zapotrzebowanie wystarczające do zapewniania dostawcom opłacalności produkcji. Żaden z krajów europejskich takiego własnego rynku w naturalny sposób, choćby ze względu na zbyt niską

liczbę mieszkańców/odbiorców – potencjalnych i realnych klientów oraz zbyt małe rozmiary i potrzeby rodzimych sił zbrojnych – wytworzyć nie może.

Po drugie, USA występują w zakupach jako jeden organizm, podczas gdy w Europie – w praktyce – liczących się zamawiających jest co najmniej kilku (Niemcy, Francja, Wielka Brytania, Włochy). W dodatku różnie się prezentuje ewentualna współpraca międzynarodowa, w tym między najważniejszymi rozgrywającymi, gdyż dotąd nieraz w nabywaniu przeważały partykularyzmy narodowe. W rezultacie, zamiast razem wchodzić w posiadanie tańszego, lepszego i szybciej dostępnego innowacyjnego produktu, poszczególne kraje, w imię ochrony własnego przemysłu, kupowały i wciąż kupują często drożej i później. Niemniej, gdy polityka góruje nad ekonomią, takie są następstwa tego zjawiska.

Po trzecie, w USA – pomimo dużego rynku – działa na nim zaledwie kilka podmiotów. Trzy z nich mają wyłącznie amerykański kapitał, są to Oshkosh, Navistar oraz Paccar z markami Peterbilt i Kenworth. Jednak tylko te dwa pierwsze funkcjonują w biznesie militarnym. Do tego dochodzą amerykańskie filie korporacji europejskich: Freightliner należący do niemieckiego Daimlera oraz Mack/Volvo, stanowiący własność szwedzkiej Grupy Volvo. Niemniej obie te filie również dostarczają produkty na rynek militarny, w tym dla U.S. Army. W Europie zaś wojskowe ciężarówki pochodzą aż od kilkunastu firm, w dodatku wywodzących się z różnych krajów.auta takie proponują zarówno potentaci, jak i mali wytwórcy niszowi. Tę pierwszą kategorię tworzy czterech podstawowych graczy: niemiecki Daimler z marką Mercedes, niemiecki VW z markami niemiecką MAN (RMMV) i szwedzką Scania, włoski Iveco z marką IVECO/IVECO DV oraz szwedzka Grupa Volvo z markami szwedzką Volvo Trucks i francuską Renault Trucks. Uzupełnia ich holenderski DAF, stanowiący własność amerykańskiego Paccara i jako jedyny z tej kategorii nieproponujący własnych wyrobów głęboko zmilitaryzowanych czy militarnych. Do tej drugiej kategorii zaliczają się: czeska Tatra, fińska Sisu, nasz rodzimy Jelcz, teoretycznie węgierska Raba oraz podmioty specyficzne, jak holenderskie Ginaf, Terberg czy Wierda (Wierda Voertuig Techniek). Tym samym, w zależności od przyjętej metodologii pomiaru, istnieje od 8 do 12 realnych dostawców. Liczba ta może być jeszcze większa, jeśli doda się choćby następne znane niszowe przedsiębiorstwa, jak np. niemiecki Paul Nutzfahrzeuge czy Titan albo nasz Autobox, który myśli o własnej produkcji (montażu) wojskowych 3-osiowych ciężarówek 6×6 klasy tonażowej 21 000-22 000 kg. W takim układzie o partykularyzm nietrudno.

Po czwarte, potencjał popytowy – rozmiar wewnętrznego amerykańskiego rynku militarnej motoryzacji powoduje, że opłacalne stają się na nim rozwiązania wręcz niemożliwe do wdrożenia gdzie indziej, jak przykładowo w odniesieniu do systemu wsparcia logistycznego. Amerykanie mogą przemieszczać dziesiątki niesprawnych modułowych zespołów na duże odległości do reperacji – wyspecjalizowanych warsztatów z niezbędnym sprzętem diagnostycznym i naprawczym – nawet samolotami rzutu strategicznego. Na takie podejście większość z europejskich armii pozwolić już sobie jednak nie może ze względu na zbyt małą skalę takich operacji, by

uczynić je w pełni – na poziomie porównywalnym z amerykańskim – opłacalnymi i efektywnymi. Te sprawdzone standardy Amerykanie bez problemu mogą zatem przenieść do obsługi pojazdów z systemami hybrydowymi. W rezultacie wypracowanych przez lata wzorców amerykańskiego wsparcia logistycznego tak łatwo na europejski grunt – ze względu na zaznaczone problemy skali – skopiować się z pewnością nie da, niezależnie od tego, jakiego rodzaju taboru by to dotyczyło.

Po piąte, wiele z technologii hybrydowych do sektora militarnego da się przenieść z sektora cywilnego. Jednak w Europie, co znajduje swoje odzwierciedlenie w segmencie zbrojeniowym, odmiany hybrydowe i w pełni elektryczne wciąż relatywnie słabo rozpowszechniają się na rynku cywilnym. Od 2022 roku notuje się w tej sferze pewne przyspieszenie, spowodowane głównie czynnikami politycznymi, lecz istniejąca tu bariera popytowa ma podłoże kosztowe – tzn. wynika z wysokich kosztów nabycia, jakich nie są w stanie zrekompensować późniejsze niższe koszty eksploatacji. Wciąż mianowicie takie systemy nie gwarantują ich nabywcom zorientowanym na TCO żadnych korzyści konkurencyjnych. W związku z tym ci nie wchodzi w ich posiadanie. Pomijając już pewne uprzedzenia w stosunku do systemów elektrycznych, w tym ich militarnej niezawodności, rozważenia wymaga tu więc zagadnienie dostępności systemów elektrycznych po rozsądnych cenach i o właściwej jakości. Klienta nie da się bowiem przymusić do zakupu rozwiązań kompletnie dla niego nieopłacalnych. W takim układzie ograniczenie emisji CO₂ nie może stanowić elementu rozgrywki politycznej, lecz musi wpisywać się w rachunek ekonomiczny. W efekcie, ponieważ sama eksploatacja wciąż okazuje się niezbyt opłacalna, ograniczony popyt na samym europejskim rynku cywilnym tworzy barierę podażową i na tym rynku cywilnym, i na europejskim rynku militarnym. Wysokie koszty produkcji, wynikające z niskiego jej wolumenu, oznaczają wyższą cenę nabycia, limitującą zapotrzebowanie.

Dlatego w tym zakresie Amerykanie ponownie górują nad Europą w zakresie zarówno liczby zarejestrowanych pojazdów, jak i realizowanych projektów, ale ta przewaga nadal nie zalicza się do przytłaczających. Obiektywnie Europa dysponuje niezbędnym potencjałem zasobowym – kapitałem, kadrami, technologiami, innowacjami, by tę przewagę zlikwidować. Tylko tej likwidacji trzeba autentycznie chcieć poprzez choćby system zachęt i pomocy przy zakupie proekologicznego taboru, ewentualnie rozwiązania prawne czyniące takie zakupy bardziej opłacalnymi wskutek np. wyższego realnego opodatkowania wariantów tradycyjnych. Takiej spójnej polityki na starym kontynencie niestety nie ma, gdyż system zachęt podatkowych ma dotychczas charakter często wyspowy, niezintegrowany systemowy w ramach Unii Europejskiej oraz Szwajcarii, Norwegii i Wielkiej Brytanii. Tym bardziej, że kwestia wcale nie dotyczy haseł i programów, takich jak cel zrównoważonego wzrostu, uznany za jeden z trzech priorytetów strategii UE Europa 2020²⁰ i polegający na

²⁰ U. Motowidlak, *Rozwój zrównoważonego transportu w świetle przepisów dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE ORAZ 2009/30/WE*, *Logistyka* 2/2014, s. 215-221.

wspieraniu przechodzenia na gospodarkę zasobooszczędną i niskoemisyjną. W perspektywie średniookresowej realizacja tego celu odbywa się m.in. w wyniku implementacji pakietu klimatyczno-energetycznego. Dlatego wszyscy wytwórcy aut użytkowych muszą teraz stawić czoła tym nowym unijnym celom emisji CO₂ określonym dla drogowego transportu towarowego. Zakładają one, że w latach 2005-2030 emisja tego gazu spadnie o 30%. W przypadku Niemiec dyskutuje się nawet o redukcji rzędu 40%. W tym kontekście należy jednak wskazać na permanentny wzrost efektywności, w tym środowiskowej, powstających w Europie ciężarówek w oparciu o zdefiniowany tzw. rozwój w obszarze zużycia paliwa, wyliczony dla tonokilometrów wykonanej pracy przewozowej przez fabrycznie nowy wariant klasy tonażowej ciężkiej²¹. Efektywność ta systematycznie rośnie, co oznacza, że w przeliczeniu dochodzi do stałego spadku zużycia paliwa i proporcjonalnego spadku emisji CO₂. Europejscy producenci samochodów użytkowych wiele mianowicie dotąd osiągnęli w obszarze ograniczenia emisji tego gazu. W porównaniu z 1965 rokiem średnie zużycie paliwa na 1 tkm spadło o około 60% (jeśli przyjąć dla 1965 roku wartość tego współczynnika na poziomie 100%) i to w sytuacji, gdy od 1990 roku w życie weszło sześć, a *de facto*, wliczając Dyrektywę ECE 49, siedem coraz bardziej restrykcyjnych norm czystości spalin (Euro 1 – Euro 6). Powyższe dowodzi potężnego postępu, jaki w tym czasie dokonał się w sektorze. Udało się bowiem pogodzić dwa technologicznie przeciwstawne i zarazem rynkowo współgrające wymagania – ograniczanie negatywnego wpływu na środowisko przy równoczesnym zmniejszaniu zużycia paliwa. Co ważne, to ograniczanie zużycia paliwa zachodzi na dosyć znaczną skalę – w ciągu ostatniego ćwierćwiecza, licząc od końca lat 90. ubiegłego wieku do pierwszych lat tej dekady, w przypadku ciągników używanych w transporcie dalekobieżnym w ujęciu bezwzględnym wyniosło ono około 25-30% (z około 32-34 l/100 km do 22-24 l/100 km czy nawet mniej w odniesieniu do specjalnie wyspecyfikowanych tzw. wersji paliwooszczędnych).

W takim układzie hybrydyzacja i pełna elektryfikacja sama w sobie nie stanowi (może nie stanowić) ciekawej alternatywy. Naturalnie poszczególne koncerny realizują własne prace w tym zakresie i wszystkie dostarczają bardziej proekologiczny tabor, w pierwszym rzędzie dla sektora dystrybucyjnego, ale dostawy te nadal stanowią niewielki ułamek całości dostaw realizowanych w danych okresach. A to zdecydowanie za mało, by mówić o wielkim komercyjnym sukcesie i przełomie. Dlatego wciąż raczej istnieje nie rynek na hybrydy, lecz hybrydowa nisza.

Po szóste – co należy podkreślić – pewne technologie hybrydowe i w pełni elektryczne z rynku cywilnego da się naturalnie przenieść do sektora militarnej motoryzacji. Niemniej szereg opracowań musi być zmienionych w celu ich lepszego dostosowania do specyfiki wojskowej eksploatacji. Takie zmiany pociągają za sobą oczywiście dodatkowe koszty i określone ryzyka.

²¹ W. Bernhard, *More efficient, quieter and cleaner: How trucks perform – today and in the future*, VDA konferencja, prezentacja, 25-26 czerwca 2014.

Po siódme, by Europa Zachodnia mogła odnieść autentyczny sukces, potrzebne jest porozumienie polityczne na poziomie ponadnarodowym. Polegać by ono mogło na przygotowaniu wspólnych wymagań dla wersji hybrydowych czy w pełni elektrycznych w poszczególnych klasach tonażowych i rodzajach kołowego sprzętu transportowego. Na to się jednak szybko nie zanosi. Przykładowo w 2018 roku w rozmowie ze mną przedstawiciele Tatry przekonywali, że ich armia chce zamawiać ciężarówki zawierające tak wiele części mechanicznych, jak to okaże się tylko możliwe. W tym kontekście elektrykę – hybrydyzację uważa się za niezbyt wskazaną ze względu na konieczność rozwiązywania szeregu poważnych problemów dotyczących niezawodności funkcjonowania takich układów na polu walki, w tym ich ekranowania i osłony.

Po ósme, powiązane z siódmym, pełen sukces komercyjny da się odnieść przy uwzględnieniu ekonomii skali. Tymczasem trudno będzie o niej mówić, gdy większość armii europejskich, z przyczyn głównie politycznych, wersje hybrydowe bądź w pełni elektryczne zamierza zamawiać u swoich tradycyjnych partnerów, przeważnie rodzimych. Tym bardziej, jeśli istnieje taka możliwość – tzn. w danym państwie funkcjonuje producent mogący dostarczyć taki rodzaj taboru. W efekcie należy oczekiwać, że Niemcy wojskowe ciężarówki hybrydowe czy elektryczne zakontraktują u Mercedesa (Daimlera) lub MAN-a ewentualnie u IVECO (spuścizna oparta na wciąż podtrzymywanej historycznej marce Magirus), Włosi – u IVECO, Francuzi – u Renault bądź IVECO, Szwedzi – u Volvo bądź Scanii, Czesi w Tatrze, a my w Jelczu. W dodatku u nas takiej bardziej gospodarczo-nacjonalistycznej polityce sprzyjają obecnie rządzący (wrzesień 2023). Można oczywiście przyjąć, iż tyłu dostawców nie zmonopolizuje dostaw i zapewni wyższy poziom konkurencji. Niemniej, z drugiej strony, ze względu na mniejszą skalę realizowanych dostaw przez każdego z nich, rosnąć będą koszty jednostkowe. Amerykanie uzyskają tu więc znowu istotną przewagę strategiczną. Wyjściem byłoby zatem zawiązanie europejskiego konsorcjum hybrydowego/elektryfikującego, pozwalającego na scale nie wielu dotychczasowych prac oraz unikanie niepotrzebnego dublowania i popełniania tych samych błędów (tzw. syndrom wyważania wcześniej otwartych przez kogoś drzwi). Przy czym nie mam tu nawet na myśli wspólnego przygotowania wspólnych modułów. Kwestia bardziej dotyczy dojścia do poziomu wspólnych możliwości, prowadzenia wspólnych testów, głównie tych najdroższych, oraz wypracowania wspólnych rozwiązań koncepcyjnych, które następnie każdy z zainteresowanych krajów i wytwórców sam elastycznie dostosowywałby do własnych potrzeb. Przykładowo jedno państwo może chcieć wdrożyć rozwiązanie prostsze do terenowych modeli klasy tonażowej średniej, inne – bardziej skomplikowane dla szerokiej gamy pojazdów o odmiennej kategorii tonażowej oraz odmiennym bazowym przeznaczeniu. Jednak bez pewnego współdziałania koszty będą rosnąć, a czas implementacji ulegnie wydłużeniu. Z dublowaniem w tej sytuacji raczej nic dobrego w takim razie się nie wiąże.

Po dziewiąte, elektryfikacja na rynku cywilnym zachodziłaby nadal na niskową skalę, gdyby nie silna presja polityczna na nią, w powiązaniu z różnego rodzaju systemem miękkich zachęt (ulgi podatkowe, dopłaty, ulgi w opłatach, możliwość wjazdu do pewnych stref w ogóle bądź w określonych godzinach) czy miękkich (dodatkowe opodatkowanie) albo twardych nakazów/zakazów (zakaz poruszania się, zakaz rejestracji, zakaz wjazdu itd.). W efekcie obecnie wywołany cywilny *boom* elektryfikacyjny ma podłoże głównie politycznopoprawnościowe (decyzji politycznych w powiązaniu z poprawnością polityczną), a nie ekologiczne czy tym bardziej ekonomiczne. Gdyby bowiem nie ogólna atmosfera prośrodowiskowa i towarzyszące jej działania, sprzedaż modeli zelektryfikowanych wciąż kształtowałaby się na relatywnie niskim poziomie. Przy czym o ile odbiorcy cywilnemu coś można ostatecznie definitywnie narzucić, to czy w odniesieniu do ekologizacji analogiczne oddziaływanie (presja) powinno być także wywierane na siły zbrojne?

Zarazem należy wskazać, że każda ekologizacja w siłach zbrojnych powinna być pożytywana jako zjawisko niezwykle pozytywne. Stoi za tym co najmniej kilka zasadniczych przesłanek.

Przede wszystkim, ponieważ obecnie układy napędowe kołowych pojazdów wojskowych w zasadniczym stopniu bazują na zmilitaryzowanych cywilnych tradycyjnych układach napędowych, korzystają na postępie zachodzącym w nich w sferze ekologizacji i redukcji zużycia paliwa. Niemniej, z drugiej strony, proces ten pozostaje ograniczony wskutek tego, że najnowsze i najbardziej ekologiczne kompletacje zespołów napędowych są zamawiane praktycznie jedynie do szosowych i lekko uterenowionych odmian stosowanych w zabezpieczeniu logistycznym czy do różnych wariantów pożarniczych. Tymczasem tradycyjne ciężarówki wojskowe, kompletacyjnie typowo militarne, hybrydowe – cywilno-militarne czy cywilne o bardzo wysokim stopniu (poziomie) militaryzacji dostają jednostki napędowe cofnięte ekologicznie, w warunkach zachodnioeuropejskich zazwyczaj spełniające normy czystości spalin Euro 3-Euro 5. Nastawy Euro 6 wciąż bowiem zdarzają się relatywnie rzadko i dotyczą przeważnie odmian szosowych lekko zmilitaryzowanych. Do tego kołowe i gąsienicowe pojazdy bojowe, takie jak transportery opancerzone i bojowe wozy piechoty, a nawet czołgi (pakiet modernizacyjny układu napędowego czołgów z rodziny T72 przygotowany przez Scanię i ujawniony w czerwcu 2018 roku na targach Eurosatory²²), są napędzane przez cywilne silniki, ale zazwyczaj o podwyższonej mocy i wyższym momencie obrotowym, w odniesieniu do których czyste kwestie ekologiczne przeważnie odgrywają drugorzędną rolę.

Ponadto dla sił zbrojnych każda ekologizacja napędów ich pojazdów powiązana ze spadkiem zużycia paliwa przez te pojazdy oznacza:

- redukcję emisji substancji szkodliwych,
- niższe wydatki na paliwo,

²² Scania, zestaw materiałów prasowych i informacyjnych na targi Eurosatory 2018, czerwiec 2018, Paryż.

- spadek kosztów i wymagań logistycznych, szczególnie istotny w trakcie realizacji misji zagranicznych.

Jak wskazuje P. Simiński²³, jednym ze sposobów na ekologizację pojazdów wojskowych jest zastosowanie alternatywnych źródeł energii. Coraz więcej pojazdów wojskowych jest projektowanych z zastosowaniem napędów hybrydowych lub elektrycznych, pozwalających na zmniejszenie emisji spalin i zużycia paliwa. Na rynkach cywilnych istnieją także pojazdy wojskowe zasilane wodorem, emitujące jedynie wodę i ciepło. Innym sposobem na ekologizację militariów pozostaje zastosowanie lekkich materiałów, redukujących masę pojazdu i tym samym zużycie przez niego paliwa. Ograniczenie masy wojskowego pojazdu może być osiągnięte poprzez zastosowanie aluminium lub tworzyw sztucznych w konstrukcji oraz materiałów kompozytowych. Dodatkowo modernizacja silników pojazdów wojskowych stanowi kolejny sposób na ekologizację militariów. Wdrożenie nowoczesnych technologii, takich jak systemy wtrysku paliwa o wysokim ciśnieniu, turbodoładowanie, zmienne fazy rozrządu czy systemy odzyskiwania energii, pozwala na zwiększenie wydajności silnika i obniżenie emisji substancji szkodliwych. Zastosowanie inteligentnych systemów zarządzania flotą wojskowych pojazdów może także pomóc w oszczędzaniu paliwa i zmniejszeniu emisji CO₂. Systemy te pozwalają na monitorowanie zużycia paliwa, wykrywanie usterek i optymalizowanie tras jazdy, co prowadzi do limitowania kosztów operacyjnych i negatywnego wpływu na środowisko naturalne. Wszystkie te rozwiązania mogą umożliwić ekologizację współczesnych pojazdów wojskowych i ograniczenie ich negatywnego wpływu na środowisko naturalne. Zarazem P. Simiński wskazuje, że²⁴:

- pojazdy wojskowe są jednymi z głównych źródeł emisji szkodliwych substancji do atmosfery. Z tego powodu istnieje potrzeba zwiększenia świadomości na temat tego problemu oraz opracowania sposobów na zmniejszenie negatywnego wpływu wojskowych pojazdów;
- konieczne jest opracowanie nowych rozwiązań technologicznych: aby zmniejszyć emisję szkodliwych substancji, niezbędne są nowe technologie i rozwiązania techniczne. Takie innowacje mogą wynikać z badań prowadzonych przez naukowców oraz z praktycznych doświadczeń w zakresie projektowania i produkcji wojskowych pojazdów.

W tych realiach obecnie o ile praktycznie wszyscy z sektorowych potentatów dysponują stosowną i dotąd przebadaną technologią napędów alternatywnych w odniesieniu do segmentu cywilnego, o tyle komercjalizacja tych rozwiązań w przypadku segmentu militarnego przebiega niezwykle powoli, zachowawczo i wybiórczo. Mianowicie oprócz Grupy Volvo i w jej ramach Renault Trucks Defence/Arquus, które pochwaliło się stosownym rozwiązaniem, reszta z liczących się graczy (Mercedes, RMMV-MAN, Scania, Volvo, IVECO) albo oficjalnie analogicznych działań

²³ P. Simiński, Recenzja wydawnicza monografii dr. hab. J. Bracha...

²⁴ Tamże.

nie prowadzi, albo nie chce się publicznie dzielić pracami i wynikami uzyskanymi w tym zakresie. W takim układzie przedstawiciele tych podmiotów wskazywali na:

- praktyczny brak zainteresowania własnych rządów,
- dysponowanie stosownymi opracowaniami z rynku cywilnego, czasami komercjalizowanymi na nim z pewnymi sukcesami,
- brak chęci do realizacji bardziej zaawansowanych projektów na pełne własne ryzyko, tzn. bez współfinansowania ze strony rządów i/czy publicznych instytucji wspierających badania i rozwój bądź/i w odpowiedzi na ogłoszone oraz toczące się postępowania przetargowe.

Na początku maja 2021 roku²⁵ odbyła się wirtualna prezentacja nowej ciężarówki wojskowej RMMV-MAN – typ HX3, obecnie będącej jedną z najnowocześniejszych ciężarówek tego rodzaju nie tylko w Europie, ale i na świecie. Kwestia dotyczy tego, że gamę tę przygotowano w odpowiedzi na wyzwania nie współczesności, lecz przyszłości, na ile dadzą się one teraz prawidłowo zidentyfikować. W trakcie tego spotkania przekazano więc także pewną zdawkową ilość informacji na temat możliwej ekologizacji – elektryfikacji napędów tych pojazdów. Podkreślono, że na tym etapie rozważana jest pewna hybrydyzacja, czyli wdrożenie układu spalinowo-elektrycznego – z silnikiem elektrycznym. Jak jednak zaznaczono, konkretne projekty zależą w tym względzie od zainteresowania potencjalnych użytkowników, w tym ewentualnego (współ-) finansowania przez nich koniecznych prac badawczo-rozwojowych. Jednocześnie wskazano na kilka ważnych czynników:

1. Na tym etapie gazyfikacja i wodoryzacja w ogóle nie są rozsądnie rozpatrywane jako alternatywne paliwowe technologie napędowe dla pojazdów wojskowych, w tym terenowych ciężarówek wsparcia logistycznego.

2. Elektryfikacja taboru w wojsku ma się przede wszystkim przekładać na możliwość prowadzenia przez pojazdy trybu tzw. skrytej jazdy i odzysku energii ewentualnie wzrostu siły pociągowej.

3. Ciężarówki wojskowe (obecne i przyszłe) powinny powstawać zgodnie z zasadami modułowości konstrukcyjno-komponentowej, tzn. w myśl idei, że „podobieństwo floty to praktyczna rzeczywistość”. Tę modułowość da się rozpatrywać na kilku powiązanych ze sobą płaszczyznach jako:

- oparcie się w wymaganym zakresie, gdzie okazuje się to użytkowo i kosztowo uzasadnione, na wybranych kluczowych komponentach z rynku cywilnego, jak składowe tradycyjnego i zelektryfikowanego układu napędowego. Powyższe przekłada się na obniżkę militarnego całkowitego kosztu posiadania i użytkowania TCO – MIL-TCO – m.in. wskutek zdecydowanie łatwiejszego dostępu do cywilnych typowych, masowych i sprawdzonych podzespołów oraz do zapasów cywilnych części zamiennych;
- wysoki stopień podobieństwa i wymienialności komponentów pomiędzy poszczególnymi seriami (typami) pojazdów na poziomie około 70-80%. Ta duża

²⁵ RMMV-MAN, zestaw oficjalnych materiałów przekazanych na temat serii HX3 oraz informacje przekazane na konferencji, Wiedeń, 6 maja 2021 roku.

kompatybilność odgrywa kluczową rolę w codziennych operacjach, czy to dla żołnierzy rozmieszczonych w terenie – na ćwiczeniach/misjach, czy w warunkach pokojowych – koszarowych. Zachowanie takiej relatywnie wysokiej unifikacji powinno pozwolić na:

- łatwiejsze, stopniowe przechodzenie przez dotychczasowych użytkowników pojazdów tradycyjnych na zelektryfikowane;
- wyraźne uproszczenie w przyszłości samego procesu wdrażania poprzez łatwiejsze, tańsze i szybsze szkolenia kierowców i personelu pomocniczego – obsługowo-naprawczego oraz obniżkę kosztów i wymagań w zakresie obrotu częściami zamiennymi i ich magazynowania, gdyż liczba pozycji tych części będzie mniejsza;
- wysoki stopień wewnętrznej wymienialności elementów między poszczególnymi odmianami wchodzącymi w skład samej serii aut; ten stopień ujednoczenia w sferze najważniejszych podzespołów – w zależności od porównywanych wydań – określono na 70-80%. Ten stopień da się utrzymać jeszcze w przypadku hybrydyzacji układu napędowego, podczas gdy jego elektryfikacja będzie już oznaczała pod względem komponentowym i kosztowym wprowadzenie kompletnie innych podzespołów i rozwiązań.

4. Ciężarówki wojskowe cechują się długim okresem eksploatacyjnego życia – deprecjacji fizycznej, wynoszącym nawet 30-40 lat. To wpłynie na przebieg procesu elektryfikacji ich układów napędowych, przy konieczności zachowania wysokiej interoperacyjności użytkowo-serwisowej z tradycyjnym parkiem samochodowym, dotychczas eksploatowanym. To oznacza, że dojdzie do niezwykle długiego, nawet kilkudekadowego równoległego używania wersji klasycznych i zelektryfikowanych. Armii nie będzie bowiem stać na szybkie pozbycie się setek czy tysięcy sztuk aut z klasycznym układem napędowym, bo nie będzie można ich w pełni i skutecznie zastąpić nowymi wariantami zelektryfikowanymi. Zagadnienie odnosi się do kosztów takiej operacji, gdyż sprzęt zelektryfikowany jest i będzie droższy niż klasyczny. Osobny temat stanowią koszty wymiany baterii po 6 czy 8 latach, które nie należą do niskich. A w ciągu 30-40 lat planowanej eksploatacji taboru zelektryfikowanego takich wymian trzeba będzie przeprowadzić kilka 3-4 (2?), przyjmując, że w przyszłości, wraz z rozwojem technologii bateryjnych, baterie będą nie tylko relatywnie tańsze (w przeliczeniu na kWh ich pojemności), ale i cechować się będą wydłużonym pierwszym życiem, do przynajmniej 10-12 lat. Taka wymiana pokoleniowa pojazdów nie może negatywnie wpłynąć na zachowanie zdolności bojowych w odmiennych scenariuszach taktycznych, co w rzeczywistości może się okazać trudne. Dlatego, ponieważ taka wymiana pokoleniowa realnie zajmuje nie 10-15 lat, jak na rynku cywilnym, lecz 20-30-40, zdecydowanie wydłuży to i „spłaszczy” proces elektryfikacji napędów pojazdów wojskowych. Spłaszczenie jest tu definiowane jako powolne, ewolucyjne wprowadzanie na stan nowych, zelektryfikowanych wariantów. Musi się ono także odbywać w sposób w pełni przemyślany, ograniczany i naznaczony przez sytuację strategiczną i taktyczną oraz

geopolityczną, a nie zabiegi różnych grup wpływów, aktywistów i ekstremalnych ekologów, którzy zazwyczaj nie wiedzą, czym jest wojna, a szczególnie pewność i zaufanie, ważniejsze w warunkach bojowych niż emisja CO₂ czy innych substancji szkodliwych.

Wskutek ogółu wymienionych ograniczeń i wyzwań obecnie w przypadku pojazdów wojskowych transformacja energetyczna musi więc bazować na elektryfikacji.

1.2. Rozważania teoretyczne

Rozważania specjalistów francuskich

Podczas seminarium w dniu 26 października 2022 roku²⁶ należący do Grupy Volvo – AB Volvo Group – francuski wytwórca pojazdów wojskowych i dostawca rozwiązań w zakresie mobilności dla sił zbrojnych – Arquus, wraz z Capgemini, jedną z najbardziej znanych firm doradczych, oraz wraz ze specjalistami CEA omówili szerzej tę kwestię. Zasadnicze poruszane obszary tematyczne dotyczyły następujących sfer:

- przeglądu rozwiązań trendów rynkowych pojazdów użytkowych w odpowiedzi na ekologiczną transformację,
- wskazania wyzwań związanych z zarządzaniem energią w obozie wojskowym z możliwą nową architekturą,
- wdrożenia technologicznej mapy drogowej dla pojazdów wojskowych w odpowiedzi na te wyzwania.

Arquus jako dostawca pojazdów wojskowych należący do jednego z głównych światowych i globalnych graczy w dziedzinie kołowych pojazdów użytkowych – szwedzkiego koncernu AB Volvo – może korzystać z ekologicznych opracowań wdrażanych przez poszczególne spółki zależne potentata, a głównie przez trzech europejskich producentów ciężarówek: szwedzkie Volvo Trucks, francuskie Renault Trucks i szwajcarski start-up technologiczny DesignWerk. Przy czym w ramach całej Grupy Volvo w tym zakresie też występują istotne korzyści synergiczne z tytułu spożytkowywania tych samych bądź analogicznych komponentów i technologii przez dostawcę autobusów Volvo Buses, dostawcę maszyn budowlanych Volvo Construction Equipment i dostawcę zespołów napędowych Volvo Penta.

W takim układzie próśrodowiskowa strategia Arquusa jest w zasadniczej mierze determinowana przez:

- ogólne wymogi rynkowe, w tym rosnącą ekologizację,
- koszty wdrażanych zmian i gotowość do ich ponoszenia przez poszczególnych partnerów – klientów,

²⁶ Materiały wewnętrzne Arquus i CapGemini przygotowane na seminarium, prezentacja 26 października 2022 roku oraz J. Brach, *Nowe spojrzenie na ekologizację i proekologizację napędów pojazdów wojskowych*, Nowa Technika Wojskowa, nr 3/2023.

- znaczenie sektora wojskowego w całości biznesu (jego udział w generowanych przychodach/zyskach),
- wymogi zgłaszane przez wojsko, w tym dotyczące specyfiki współczesnego i przyszłego pola walki, przy założeniu możliwej nielinearności w jego rozwoju i w związku z tym pojawienia się konfliktów całkiem nowego rodzaju, z użyciem całkiem nowego sprzętu,
- cenę determinującą realną dostępność,
- możliwość przeniesienia określonych propozycji z sektora cywilnego i następnie ich militaryzacji.

Tym samym pojazdy wojskowe muszą nadążać za tymi wszystkimi wymaganiami rynku, co wcale nie okazuje się takie proste. W związku z tym strategia ekologiczno-paliwowa opiera się na kilku powiązanych założeniach:

- bazowe alternatywy paliwowo-napędowe są implementowane z sektora cywilnego – zakłada się tu znaczną elastyczność propozycji w zależności od klienta i jego specyficznych niekiedy potrzeb;
- paliwa oparte na produktach przerobu ropy naftowej – w pierwszym rzędzie olej napędowy – stanowiły i wciąż dla sił zbrojnych stanowią wyjście najbardziej użytkowo elastyczne i uniwersalne,
- wdrażanie w wojsku wszelkich zamienników tradycyjnych układów napędowych i paliw musi być realizowane niezwykle rozsądnie i umiejętnie, przypadek po przypadku, każdorazowo z koniecznym szerokim i głębokim, nieraz wyraźnie posuniętym zindywidualizowaniem.

Bazując na tych wstępnych warunkach brzegowych, Arquus przyjął pewne założenia. Przede wszystkim strategia paliwowa opiera się – analogicznie jak w Grupie Volvo – na trzech filarach. Są nimi:

- elektryfikacja układu napędowego – jego hybrydyzacja oraz pełna elektryfikacja,
- biopaliwa,
- podniesienie ogólnej efektywności energetycznej – lepsze spożytkowanie energii już dostępnej na pokładzie pojazdu oraz ograniczenie zużycia energii do wykonania tych samych zadań.

Do tego dochodzi ograniczenie negatywnego śladu środowiskowego przez same pojazdy, czemu mają sprzyjać: redukcja zużycia energii w samym procesie wytwórczym, oparcie się w procesie wytwórczym na energii odnawialnej i/czy o zerowej misji netto oraz ograniczenie emisji hałasu.

Przy czym Arquus podkreśla, że dla sił zbrojnych najważniejsze pozostaje nie ograniczanie emisji substancji szkodliwych, w tym aktualnie głównie CO₂, lecz pełne, efektywne i skuteczne zabezpieczenie logistyczne i bojowe wszystkich oddziałów. I to stanowi tu aksjomatyczny prymat. To (sprawna) logistyka zatem, a nie ekologia, wciąż okazuje się najsłabszym punktem i wobec tego największym wyzwaniem.

W przypadku paliw alternatywnych teoretycznie dostępne są:

- paliwa ciekłe, takie jak DME, HVO,
- paliwa gazowe, takie jak CNG, LNG i bio-CNG – bio-LNG (CBG),
- tzw. e-paliwa.

Z ich zastosowaniem dla sił zbrojnych – szczególnie do napędu pojazdów – wiąże się jednak szereg kluczowych ograniczeń:

- Gazy nie mogą być w ogóle stosowane w pojazdach bojowych i narażonych na jakąkolwiek styczność z wrogiem, w tym w konfliktach/wojnach asymetrycznych. Co najwyżej mogą zasilać tabor typowo zaopatrzeniowy – logistyczny cywilny, słabo i średnio zmilitaryzowany, wykorzystywany w kraju macierzystym, z daleka nawet od potencjalnej linii frontu. Niemniej ogranicza to ewentualną elastyczność w użyciu takich samochodów.
- Paliwa typu DME, HVC czy e-paliwa mogą być w pełni stosowane jako zamienniki tradycyjnego oleju napędowego – nie ma tu zasadniczych ograniczeń ze strony silników oraz można się oprzeć na istniejącej dotychczasowej sieci dystrybucji i zaopatrzenia, co niewątpliwie stanowi dodatkowy istotny atut. Niemniej jednocześnie paliwa te wyróżniają się relatywnie słabą dostępnością i wysoką ceną, co zdecydowanie ogranicza sposobność ich implementacji. Nie są one *de facto* i jeszcze długo nie będą dostępne poza Europą i Ameryką Północną. Dla wojska pozostaje to więc raczej jako opcja bardziej teoretyczna niż praktyczna. Zdecydowanie przy takich ograniczeniach bardziej realna wydaje się zatem opcja elektryfikacji, dokonywana dwu-, trzyetapowo, jako:

- tzw. lekka hybrydyzacja (*mild hybrid*) wspomagająca jedynie tradycyjny układ napędowy, bez możliwości pracy/jazdy w trybie czysto elektrycznym,
- pełna hybrydyzacja, gdy silnik elektryczny jest w stanie na pewnym dystansie całkowicie zastąpić silnik spalinowy,
- pełna elektryfikacja – z układem napędowym w ogóle bez silnika spalinowego.

Z tych trzech możliwości na tym etapie rozwoju technologicznego i przy uwzględnieniu czynnika kosztowego za najbardziej suboptymalną uznaje się pełną hybrydyzację, czyli pozostawienie silnika spalinowego. Przemawiać za nią mają:

- relatywnie niewielki wzrost kosztów w porównaniu z tradycyjnym układem napędowym;
- względnie niewielki wzrost masy własnej pojazdu w porównaniu z tradycyjnym odpowiednikiem;
- używanie jako paliwa jedynie oleju napędowego czy jego militarnie dopuszczonych zamienników;
- możliwy *downsizing* tradycyjnego silnika. Niegdyś przy hybrydach cechę tę podawano jako istotną zaletę, obecnie dopuszcza się stosowanie, szczególnie w cięższym sprzęcie, silników o bazowej pojemności ewentualnie *downsizing* dotyczy zamiany silnika 13-litrowego na 10-11-, a nie 6-7-litrowy. W sprzęcie wojskowym nie stanowi raczej dobrego wyjścia zbytne ograniczanie pojemności tradycyjnej jednostki napędowej;
- możliwość uzyskania redukcji zużycia paliwa na poziomie od 15 do nawet 41%, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy użycia i innych warunków eksploatacji. Ten spadek zużycia tradycyjnego paliwa oznacza:
 - spadek kosztów eksploatacji;

- przy zbiorniku o zadanej pojemności możliwość wzrostu zasięgu;
- możliwość montażu mniejszego zbiornika paliwa dla nawet niewielkiej masywnej kompensaty masy komponentów związanych z układem elektrycznym, jak silnik elektryczny i baterie trakcyjne;
- pewne ograniczenie w zakresie wsparcia logistycznego – im mniej paliwa trzeba dostarczać na dłuższych dystansach, tym wsparcie to da się wydatnie ograniczyć. Dodatkowo wraz ze zmniejszeniem zapotrzebowania w tej sferze spadają również koszty i nakłady ogólnozasobowe ponoszone z tego tytułu – mniej wydatków finansowych, mniej użytych zasobów w postaci pojazdów, kierowców, koniecznego zaplecza itd.;
- możliwość pokonania określonego dystansu – do 15-20 km lub nawet więcej w zależności od przeznaczenia i konfiguracji danego pojazdu – w trybie elektrycznym, czyli cichym i przy ograniczonej sygnaturze termalnej;
- dobra mobilność taktyczna – dobre przyspieszenia, polepszenie mobilności terenowej – zdolności do pokonywania przeszkód terenowych;
- elastyczność w doborze źródeł energii w zależności od chwilowych potrzeb/sytuacji taktycznej – poruszanie się przy użyciu silnika spalinowego lub układu elektrycznego;
- możliwość wspierania przez układ elektryczny tradycyjnego silnika w sytuacjach nagłego zwiększonego pokładowego zapotrzebowania na energię – nagłe przyspieszanie, pokonywanie trudnego terenu, wjazd po długim stromym wzniesieniu, pokonywanie nawierzchni piaszczystej, błotnistej albo kamienistej;
- redukcja zużycia składowych tradycyjnego układu napędowego, gdyż hamowania można realizować za pomocą silnika elektrycznego z rekuperacją wówczas energii – zamianą energii kinetycznej na elektryczną, gromadzoną w pokładowych akumulatorach.

Sama elektryfikacja, coraz popularniejsza na rynku cywilnym, na tym etapie nie wydaje się dobrym wyjściem dla sił zbrojnych ze względu na:

- bardzo wysokie koszty, spowodowane głównie wysokimi kosztami samych akumulatorów;
- wysoką masę akumulatorów, niezwykle negatywnie rzutującą na dostępną ładowność – nośność;
- relatywnie niewielką gęstość energii gromadzonej przez akumulatory w porównaniu gęstością energii, jaką cechuje się tradycyjny olej napędowy. Co gorsza, w najbliższych latach w tej sferze nie wystąpi jakiś rewolucyjny przełom²⁷. Przewiduje się bowiem, że na bazie zmodyfikowanych, ale już istniejących kombinacji różnych pierwiastków w bateriach do roku 2030 najbardziej wydajna bateria osiągnie gęstość energetyczną 500 Wh/kg i 1 200 Wh/dm³. Jeżeli zostałyby osiągnię

²⁷ W. Cao, J. Zhang, H. Li, *Batteries with high theoretical energy densities*, Energy Storage Materials, nr 26/2020, s. 46-55, za K. Nowicka, *Gospodarka w obiegu zamkniętym*, Część 2. Łańcuchy dostaw, Oficyna Wydawnicza SGH, Warszawa 2022, s. 73.

nięty przełom w nowatorskich rozwiązaniach technologii baterii, to najbardziej wydajna bateria może osiągnąć gęstość energetyczną na poziomie 1000 Wh/kg i 2000 Wh/dm³. Tymczasem gęstość energetyczna oleju napędowego wynosi 12 000 Wh/kg i 10 000 Wh/dm³. W rezultacie olej napędowy cechuje się 24 razy większą gęstością energetyczną na 1 kg i 8,3 razy większą gęstością energetyczną na 1 dm³ oraz 12 razy większą gęstość energetyczną na 1 kg i 5 razy większą gęstością energetyczną na 1 dm³ w stosunku do przewidywanych różnych scenariuszy rozwoju w konstruowaniu baterii – tzn. tego, jaki postęp w najbliższych latach zaznaczy się w tej dziedzinie. Niemniej nawet w najbardziej optymistycznych założeniach gęstość energii w akumulatorach będzie wciąż zdecydowanie niższa niż gęstość energii oleju napędowego. To zaś, przy trudnym do oszacowania przeliczeniowym spadku masy jednostkowej przy zadanej pojemności (kWh/kg – współczynnik pojemności do masy baterii), oznacza, że masa baterii zawierającej energię konieczną do realizacji danego zadania, mimo wyższej sprawności układów w pełni elektrycznych, będzie o wiele wyższa niż masa odpowiedniego zbiornika paliwa, zawierającego olej napędowy czy jego bliskie zamienniki, dzięki którym analogiczne zadanie da się wykonać. Obrazowo, jeśli współczesny czołg pokona w mieszanych warunkach drogowo-polo-owych 350–400 km, to jego w pełni elektryczny odpowiednik może nie pokonać więcej niż 40–60 km. Jeszcze wyraźniejsza różnica zaznacza się w odniesieniu do ciężarówek. W przypadku najbardziej popularnych 2-osiowych ciągników siodłowych stosowanych w obsłudze ruchu na dalekich trasach, przy maksymalnej, dozwolonej przez prawo pojemności zbiorników paliwa, wynoszącej 1500 l na jednym tankowaniu mogą one przejechać nawet 6000–6500 km. Jednocześnie obecnie trwają intensywne prace nad ich zelektryfikowanymi analogami – przy czym w pełni elektryczny ma się charakteryzować zasięgiem około 500 km, z kolei wodorowo-elektryczny – z technologią ogniw paliwowych – do 750–800 km. Różnica jest więc znaczna. Przy czym o ile jeszcze w segmencie cywilnym na siłę da się wyznaczać negatywny substytut redukcji zasięgu w postaci konieczności częstszego doładowania na trasie czy w bazie, o tyle w odniesieniu do sił zbrojnych ten element pozostaje *de facto* dyskredytujący, gdyż oznacza liczne kłopotliwe dodatkowe wymagania wsparciowo-logistyczne, kosztowe i zasobowe;

- wysokie niebezpieczeństwo bojowe związane z akumulatorami – możliwość wystąpienia spięć, samozapłonów, eksplozji i wybuchów po uszkodzeniu mechanicznym/ostrzale/pożarze, a potem niezwykle duże problemy z gaszeniem.

Analogiczny sceptycyzm panuje co do wprowadzenia wodoru jako paliwa do bezpośredniego zasilania silników spalinowych – gazowych silników dwupaliwowych i silników czysto wodorowych – bądź do zasilania ogniw paliwowych. Gazowe spalinowe silniki wodorowe znajdują się dopiero w fazie funkcjonalnych prototypów – są wobec tego wciąż niedopracowane. Z całą pewnością jeśli w tej analizie uwzględni się także parametry czystych, teraz dostępnych silników

gazowych na CNG/LNG – mogą nie osiągać wysokich parametrów (obecnie najsilniejsze europejskie silniki gazowe – 13-litrowe osiągają maksymalnie 460 KM i 2100-2300 Nm, a od 2023 roku 500 KM (dwupaliwowe Volvo), podczas gdy ich tradycyjne odpowiedniki 500-560 KM i 2600-2800 Nm). Za jednostkami wodorowymi przemawiać więc będzie głównie ich ekologiczność – emisja NOx ograniczona przez wtrysk wody, a nie własności użytkowe, w tym bojowe własności użytkowe – takie jak wysokie uzyskiwane moc i moment obrotowy oraz znaczne pewność i niezawodność działania ważne dla sił zbrojnych.

Wiele wyzwań wiązać się będzie również z wdrożeniem ogniów paliwowych. Są one bowiem drogie i wymagają stosowania bardzo czystego i bardzo kosztownego oraz wcale nie tak łatwo dostępnego wodoru, o czystości 99,9%. Osobną kwestię stanowi sam transport gazowego sprężonego czy ciekłego wodoru, w przypadku sił zbrojnych obarczony wieloma zagrożeniami, szczególnie gdy przewóz ma się odbywać na obszarach narażonych na ataki ze strony wroga, co w sytuacji zastosowania przez niego amunicji krążącej może oznaczać strefy wykluczenia o promieniu nawet 200-300 km.

Dlatego na tym etapie w sferze elektryfikacji układów napędowych pojazdów wojskowych jedynym rozsądnym wyjściem wydaje się pełna hybrydyzacja. Przemawiają za nią mianowicie:

- możliwość stosowania hybrydowych układów napędowych w pojazdach różnych klas i rodzajów – logistyczne, bojowe, kategorii tonażowych lekkiej, średniej i ciężkiej. Jako najciekawsze obszary wdrożenia takich hybryd wskazano:
 - lekkie pojazdy rozpoznawcze;
 - kołowe i gąsienicowe wozy piechoty;
 - czołgi – podkreślono, że czołgi z elektrycznym silnikiem wspomagającym mogą się cechować przyspieszeniami nie gorszymi niż czołgi z silnikiem turbinowym (turbina gazowa), ale za cenę zdecydowanie niższego zużycia paliwa (zredukowane militarne TCO) oraz niższych kosztów samego nabywania i niższego generowanego poziomu hałasu. Przy tym dystans do 4-6-8 km (w zależności m.in. od masy, warunków terenowych i klimatycznych, pojemności pokładowych baterii, umiejętności samego kierowcy) będą mogły przebyć w cichym trybie jazdy elektrycznej;
- praktycznie całą paletę ciężarówek, od lekkich dostawczych po ciężkie uterenowione i terenowe ciągniki siodłowo-balastowe;
- możliwość poruszania się przez pojazd zarówno w trybie jazdy czysto spalinowej i czysto elektrycznej (*e-motion*), jak i hybrydowej – łączonej spalinowo-elektrycznej, co daje dużą elastyczność sytuacyjną;
- możliwość łatwej adaptacji do różnych militarnych scenariuszy wykorzystania;
- możliwość wykorzystania w roli stacjonarnych generatorów energii – zestaw silnik spalinowy plus silnik elektryczny, w sytuacjach awaryjnych pozwalających na zasilanie innych pojazdów czy obiektów, jak polowe szpitale, punkty dowodzenia, polowe warsztaty, systemy uzbrojenia bądź sztaby.

Ogólnie kluczowe wyzwania stanowią: ograniczenie zużycia energii na pokładzie oraz lepsze spożytkowanie energii już dostępnej. Do tego stary poczciwy silnik Diesla, ale stale udoskonalany, pozostanie w pojazdach wojskowych jako zasadnicze źródło napędu jeszcze przez wiele lat/dekad. Tym bardziej, że nikt poza Europą i Ameryką Północną oraz w pewnym stopniu Japonią i Chinami nie stawia teraz realnie na napędy elektryczne. W dodatku sprawność najnowocześniejszych silników spalinowych już przekroczyła 50% i w najbliższym okresie może się zbliżyć do 52-54%, co oznacza kolejną poprawę kluczowych parametrów (moc maksymalna i maksymalny moment obrotowy z litra pojemności) oraz dalszą redukcję zużycia paliwa, rzędu nawet 10-15%.

Poza tym w sferze wsparcia posprzedażowego Arquus zwraca uwagę, że tzw. klasyczny ekoprojekt obejmuje trzy elementy.

Pierwszy to ograniczenie stosowania substancji niebezpiecznych przez system REACH: rejestracja, ocena i autoryzacja chemikaliów. Ustawodawstwo to, które stale ewoluuje, wymaga nadzoru regulacyjnego i przewidywania. U Arquusa jest również przedmiotem procesu obejmującego cały łańcuch jego dostaw, dostosowany do specyfiki podmiotu, w tym 80% francuskich małych i średnich przedsiębiorstw – MŚP. Drugi element to analiza cyklu życia własnych produktów w celu zmniejszenia ich wpływu na środowisko. Towarzyszy temu symulacja z wykorzystaniem dedykowanego oprogramowania w celu identyfikacji możliwych działań i doskonalenia praktyk. Trzecia składowa to z kolei obróbka po zakończeniu cyklu życia produktów i – w jej ramach – wsparcie SIMMT (*Structure intégrée du maintien en condition opérationnelle des matériels terrestres* – DC SIMMT – zintegrowana struktura utrzymania sprzętu lądowego w stanie eksploatacyjnym) w przekazywaniu niezbędnych danych firmom odpowiedzialnym za wycofanie produktu/usługi.

Następna zasadnicza forma ekoprojektowania dotyczy usług oferowanych wraz produktami w celu poprawy efektywności energetycznej i rozwoju czystych technologii oraz niezaprzeczalnie wiąże się z postępem technicznym w sferze paliw alternatywnych i alternatywnych zespołów napędowych. Arquus od ponad 20 lat bada i wdraża rozwiązania w tym obszarze. Zaawansowane dyskusje z DGA pozwoliły na zintegrowanie hybrydyzacji z niektórymi wariantami Griffona. Zapewnia to oszczędność paliwa o co najmniej 15%, przy jednoczesnym czerpaniu zysków/notowaniu oszczędności z głównych korzyści operacyjnych. Są nimi:

- zabieranie/przenoszenie na pokładzie wielu systemów,
- zwiększony zasięg pojazdu,
- możliwość pracy w trybie cichym w trakcie operowania tuż przy linii wroga – tzw. skradanie się na ostatniej mili,
- odporność/wytrzymałość układu napędowego.

Przy tym hybrydyzacja potencjalnie dotyczy wszystkich wojskowych pojazdów taktycznych. Integracja wodoru w pojazdach Arquus oferuje dwa różne systemy napędowe z odmiennymi silnikami – albo silnik elektryczny i ogniwo paliwowe, albo silnik gazowy ze spalaniem wewnętrznym na wodór, i pozwala na magazynowanie

energii, która może być ponownie wykorzystana w bazach. Dlatego wodór nie jest tu ograniczeniem, ale szansą przy zwiększonej wydajności operacyjnej.

W zaprezentowanej już w 2023 roku analizie, przygotowanej przez specjalistów Arquusa i dotyczącej końca stosowania silnika spalinowego do napędu pojazdów wojskowych, kluczowe są informacje dotyczące kilku zasadniczych kwestii²⁸.

1. Adaptacja architektury pojazdów

W świetle planowanego na 2025 rok projektu „EcoCamp” i rozpoczynającej się w armiach zachodnich transformacji energetycznej obozów wojskowych Arquus musi dostosować architekturę proponowanych przez siebie pojazdów, aby zminimalizować ślad węglowy, jednocześnie zyskując na wydajności operacyjnej. W rezultacie transformacja energetyczna pojazdów wojskowych zachodzi zarówno w ich konstrukcji, jak i w eksploatacji, a *de facto* w pełnym cyklu życia, aż do demontażu.

2. Rozwój silnika

Etienne Chavy, szef ds. innowacji i energii w Arquus, wyjaśnił ewolucję silników pojazdów opancerzonych podmiotu: silniki stosowane przez Arquus są już przygotowane na zasilanie ich biopaliwami, co stanowi pierwszy krok w kierunku redukcji emisji CO₂. Hybrydyzacja, drugi filar ewolucji silników Arquus, przynosi interesujące korzyści w zakresie zużycia paliwa w pojeździe takim jak Scarabee i powinna przynieść jeszcze większe korzyści w pojazdach takich jak Griffon. Zapowiadany zanik silników spalinowych to wyzwanie i szansa na pójście jeszcze dalej w optymalizacji energetycznej. W przypadku małych pojazdów o masie poniżej 5 t przez pewien czas będzie można liczyć na pozostałą produkcję, głównie dlatego, że jej wolumeny pozostają niskie w porównaniu z samochodami z rynku masowego/cywilnego. Jednak kluczowa pozostaje tu kwestia, czy powyższe oznacza koniec silnika spalinowego? Na tym etapie rozwoju technologicznego reprezentowanego przez poszczególne technologie napędowe odpowiedź na tak postawione pytanie wydaje się trudna. Niemniej eksperci firmy nadal wykorzystują swoją wiedzę, aby opracować w pełni elektryczny układ napędowy, który będzie gotowy, gdy silnik spalinowy przestanie być dostępny. Większe pojazdy skorzystają z silnika spalinowego, który będzie nadal istniał w przypadku pojazdów poruszających się w środowiskach o rzadkiej sieci tankowania/ładowania. Wreszcie silnik spalinowy może odrodzić zainteresowanie e-paliwem lub bezpośrednim spalaniem wodoru jako paliwa stosowanego w formie gazowej.

3. Jako zasadnicze sfery militarnego zastosowania eksperci z Arquusa wskazują:

- ciężkie pojazdy gaśnicowe, jak bojowe wozy piechoty i czołgi – na tym etapie celowe staje się wprowadzenie napędów hybrydowych – spalinowo-elektrycznych, z opcją czasowego, na określonym odcinku, poruszania się w trybie w pełni elektrycznym;
- kołowe bojowe wozy piechoty – napędy jak wyżej;

²⁸ <https://www.arquus-defense.com/newsroom/news/end-combustion-engine-military-vehicles>).

- pojazdy rozpoznawcze, w tym samojezdne – zautomatyzowane i w pełni autonomiczne/autonomiczne – napędy hybrydowe z szybką perspektywą zastąpienia bądź uzupełnienia przez napędy w pełni elektryczne;
- ciężarówki terenowe oraz transportery ciężkiej techniki bojowej – układy hybrydowe, w tym tzw. *mild* hybrydy jako układy wspomagające napęd tradycyjny – spaliny w sytuacji chwilowego wyższego zapotrzebowania na siłę napędową (moment obrotowy) oraz układ hamulcowy podczas hamowania. Wspomaganie tradycyjnego układu napędowego występuje szczególnie w trakcie pokonywania ciężkich/trudnych przeszkód terenowych albo wjazdu na strome wzniesienia, z kolei przy hamowaniu układ elektryczny – wykorzystując wówczas rekuperację energii – zamienia energię kinetyczną na energię elektryczną, gromadzoną w pokładowych akumulatorach. Nie dochodzi więc do zamiany – jak przy tradycyjnych hamulcach – energii kinetycznej w energię cieplną, traconą bezpowrotnie;
- wersje szosowe – najbardziej podatne na pełną elektryfikację, szczególnie jeśli mają być użytkowane praktycznie jedynie na terytorium krajów zachodnioeuropejskich.

4. Czas wdrażania

Czas ten będzie stanowił wypadkową trzech zasadniczych elementów:

- szybkości wdrażania pojazdów zelektryfikowanych na rynku cywilnym;
- możliwości zamawiania przez siły zbrojne pojazdów z klasycznym układem napędowym lub pojazdów hybrydowych dłużej, niż będą one dostępne – jako nowe będą mogły być zarejestrowane na rynku cywilnym;
- rzeczywistego zainteresowania sił zbrojnych elektryfikacją układów napędowych pojazdów różnych rodzajów.

W kwestii pierwszej należy wskazać, że wersje cywilne mogą być dostępne co najmniej do roku 2040 czy – trudno obecnie wyrokować – do roku 2045. W kwestii drugiej trzeba podkreślić, że jak dotychczas szczególnie europejskie – nawet czołowe armie w większości przypadków wyrażają prawie żadne zainteresowanie elektryfikacją układów napędowych pojazdów kołowych, w tym przede wszystkim ciężarówek. W oficjalnych rozmowach przedstawiciele wielu koncernów motoryzacyjnych, jak Mercedes Trucks, MAN-RMMV czy także niszowa Tatra, wprost zwracają uwagę na to, że stosowne propozycje mogą już przygotować. Niemniej strona wojskowa nie zgłasza na nie większego zapotrzebowania, nie finansuje również wystarczająco koniecznych projektów. W rezultacie w aktualnych, mocno niestabilnych warunkach otoczenia gospodarczego oraz politycznego same przedsiębiorstwa nie chcą w te projekty inwestować znacznych środków finansowych, szczególnie że w przeważającym stopniu musiałyby to robić z własnych funduszy i na własne ryzyko.

Natomiast w odniesieniu do obszaru trzeciego należy zwrócić uwagę na następujące kluczowe zagadnienia:

- Współczesny zachodni/światowy rynek motoryzacji użytkowej podzielony jest *de facto* pomiędzy zaledwie pięciu graczy z siedmioma głównymi markami (Daimler Truck-Mercedes Truck, Grupa Volvo ze szwedzką marką Volvo

Trucks, francuską Renault Trucks i pełniącą rolę start-upu szwajcarską Design-Werk, Traton-VW z markami niemiecką MAN i szwedzką Scania, amerykański Paccar z holenderską marką DAF oraz Iveco Group Company z włoską marką IVECO S.p.A). Podmioty te posiadają zakłady wytwórcze, w tym kluczowych komponentów, na całym świecie. W sytuacji zatem nawet zaprzestania produkcji silników spalinowych w Europie (Zachodniej) bez problemu mogą je zacząć sprowadzać z innych swoich filii, przykładowo południowoamerykańskich.

- Dla wielkich europejskich graczy siły zbrojne od lat pozostają odbiorcą marginalnym w sferze wielkości zamówień, jeśli zestawimy te zamówienia z tymi napływającymi z rynku cywilnego. Zarazem podmioty te, jako globalni gracze, w swojej strategii muszą uwzględniać także sytuację na innych swoich zasadniczych obszarach zbytu, takich jak Ameryka Północna, Azja i Ameryka Południowa. Przyjąć jednak należy, że w Ameryce Północnej występują analogiczne tendencje ekologizacyjne jak w Europie Zachodniej. Niemniej, z drugiej strony, armia amerykańska sama kreuje tak znaczny wewnętrzny rynek zbytu dla taboru wojskowego, że tamtejsi wytwórcy, jak Oshkosh czy Navistar, ze sprzedaży pojazdów dla niej uzyskują wpływy większe niż firmy europejskie ze sprzedaży swoich produktów europejskim armiom NATO. Tego czynnika ekonomicznego w tych rozważaniach pomijać nie można.
- Siły zbrojne już obecnie korzystają z licznych udogodnień i zwolnień w sferze emisji spalin przez ich pojazdy – mogą rejestrować wykonania spełniające normę czystości spalin Euro 3, podczas gdy klienci cywilni – Euro 6, a w przyszłości nawet Euro 7. Niewykluczone zatem, że też w kilku najbliższych dekadach – po latach 2035-2040 – bez problemu wciąż będą mogły nabywać fabrycznie nowy tabor samochodowy z jednostkami spalinowymi.

Tym samym silniki spalinowe będą montowane, jak można dzisiaj przypuszczać, np. w wojskowych ciężarówkach co najmniej do roku 2045 czy nawet 2050, a egzemplarze aut w nie wyposażone będą eksploatowane co najmniej do lat 2060-2070. Na tym etapie są to jednak oczywiście wyłącznie pewne przypuszczenia, gdyż trudno w tak turbulentnych i nielineranych czasach stawiać prognozy, a szczególnie te długoterminowe, immanentnie obciążone zbyt dużym błędem.

5. Jako główne militarne powody wdrożeń pojazdów zelektryfikowanych należy wskazać ich:

- cichobieżność – zapewniającą możliwość skrytego poruszania się blisko linii wroga, przy obniżonej sygnaturze termalnej, w trakcie poruszania się w trybie jazdy w pełni elektrycznym;
- możliwość uzyskania pewnych oszczędności w zużyciu paliwa przy napędowych technologiach hybrydowych. Jednym z najważniejszych powodów, dla których rozważa się zastosowanie HEV (*Hybrid Electric Vehicle*) do aplikacji wojskowych, pozostają właśnie koszt paliwa oraz sama możliwość bezproblemowego dostarczenia go. Transport paliwa na pole walki trasami zagrożonymi atakiem i na duże odległości może znacznie podnieść koszt paliwa.

6. Jako główne militarne wyzwania i zagrożenia wskazywane są:

- wysoki koszt jednostkowy, który może jednak maleć wraz z upowszechnianiem się – dyfuzją technologii elektryfikacji na rynku cywilnym;
- problemy z bateriami – ich wysoka masa własna, negatywnie rzutująca na ładowność/nośność użyteczną, w tym masę/rodzaj zainstalowanego pancerza zasadniczego czy/i opancerzenia dodatkowego, oraz kłopoty z utylizacją i zachowaniem w pojeździe wojskowym w sytuacji trafienia lub pożaru;
- problemy z dostawami energii w przypadku wdrożenia poza Europą (Zachodnią), co ogranicza możliwość wykorzystania pojazdów w pełni elektrycznych na misjach zagranicznych. Kwestią otwartą pozostaje analogiczne wdrożenie pojazdów hybrydowych, w trakcie eksploatacji niemuszających korzystać z zewnętrznych stacji ładowania.

Wybrane korzyści w opinii specjalistów niemieckich

Wskazują oni na znaczny potencjał technologiczny układów hybrydowych w zastosowaniach wojskowych²⁹. Ich zdaniem lista ulepszeń, które da się dzięki niej osiągnąć, przynajmniej w teorii, należy do dość długich. Oprócz zwrócenia uwagi na fakt, że przede wszystkim napęd HED (*Hybrid Electric Drive* – napęd hybrydowo-elektryczny) powoduje zmniejszenie sygnatury hałasu i ciepła, co otwiera nowe możliwości operacyjne („cicha obserwacja”/„cicha praca”), podają oni kilka innych kluczowych zalet.

Po pierwsze, osiągi pojazdu można zoptymalizować, gdyż każde koło może być sterowane i napędzane indywidualnie za pomocą silników w piastach i technologii *drive-by-wire*. Po drugie, w zależności od tego, czy architektura hybrydowa łączy silnik spalinowy i elektryczny równolegle, czy szeregowo, w razie potrzeby oba napędy razem mogą znacznie zwiększyć moc silnika na krótki czas („tryb burst”). Po trzecie, oddzielne układy napędowe zwiększają niezawodność całego systemu dzięki ich redundancji. Po czwarte zaś, w konstrukcji hybrydowej możliwa jest praca silnika spalinowego w korzystnym zakresie obrotów, co pozytywnie wpływa na jego żywotność i zużycie paliwa.

Ogólnie główna zaleta koncepcji HED polega na tym, że możliwe stają się nowe architektury pojazdów, dzięki czemu elementy układu napędowego mogą być bardziej elastycznie redystrybuowane wewnątrz nich. Pozwala to również na podniesienie stopnia ochrony. Ponadto w kontekście postępującej cyfryzacji i sieciowości zapotrzebowanie na energię elektryczną na pokładzie będzie w przyszłości nadal rosło z powodu energochłonnych systemów: radiostacji dużej mocy, zakłócaaczy IED, systemów zarządzania walką, radarów, kamer, zdalnie sterowanych stanowisk uzbrojenia, doków ładujących drony lub sprzęt piechoty, klimatyzacji,

²⁹ M. Krause, *Hybrid drives for military vehicles?*, <https://actrans.de/en/hybrid-drives-for-military-vehicles/Insights>.

broni laserowej itp. W tym kontekście układy HED nie tylko mogą łatwiej zaspokoić te potrzeby energetyczne, ale mogą też być elastycznie wykorzystywane jako mobilne generatory do lokalnych sieci energetycznych. Wreszcie, kłady napędowe HED zużywają znacznie mniej paliwa na biegu jałowym i mogą być znacznie bardziej energooszczędne dzięki odzyskiwaniu energii hamowania. Na przykład czołgi podstawowe spędzają większość czasu operacyjnego w statycznym trybie jałowym i jednocześnie zużywają duże ilości paliwa, głównie jeśli są napędzane turbiną gazową. Zmniejszone zużycie paliwa zwiększa zasięg pojazdu, upraszcza ogólną logistykę paliwową i zmniejsza ślad węglowy sił zbrojnych. Prowadzi to do „bardziej ekologicznych” działań.

Zarazem pojawiają się jednak dość poważne wyzwania i ograniczenia dla współczesnych kluczowych technologii elektryfikacji pojazdów wojskowych. Te wszystkie zalety architektury HED nie są bowiem darmowe, a jednym z największych problemów w tym kontekście jest mocno ograniczona przestrzeń wewnątrz pojazdów. Silniki elektryczne i akumulatory nie tylko zwiększają złożoność, masę i koszty, ale jeszcze wymagają dużej przestrzeni instalacyjnej, będącej rzadkim zasobem we wszystkich pojazdach wojskowych. Ponieważ całkowita masa pojazdów opancerzonych rośnie silnie nieproporcjonalnie do chronionej objętości, dlatego prostym rozwiązaniem nie okazuje się wzrost rozmiarów tych pojazdów, ponieważ maksymalna masa bywa zwykle ograniczona. Z tego można wywnioskować, że gęstość energii w jej nośniku – akumulatorach pełni kluczową funkcję w realizacji programów wdrażania pojazdów HED. To samo dotyczy alternatywnych podejść wykorzystujących ciekły lub gazowy wodór do ogniw paliwowych. W efekcie obecnie tylko paliwa kopalne mają wystarczająco dużą gęstość energii, aby w znaczący sposób obsługiwać ciężko opancerzone pojazdy. Kluczowymi czynnikami pomyślnej realizacji HED są wzrost gęstości energii akumulatorów o około jeden rząd wielkości, bardzo kompaktowa realizacja jednostki napędowej HED oraz solidna, niezawodna i ekonomiczna dojrzałość technologii. W tym miejscu należy wspomnieć np. o niebezpieczeństwie przegrzania termicznego akumulatorów, które może doprowadzić do pożaru akumulatora z toksycznymi gazami we wnętrzu pojazdu.

Kolejną kluczową kwestią pozostaje to, w jakich pojazdach technologia HED może być z powodzeniem zastosowana w niedalekiej przyszłości. Idealnie byłoby, gdyby te pojazdy nie miały ciężkiego pancerza, spędzały dużo czasu na biegu jałowym, były wyposażone w różnorodne energochłonne systemy, wymagały zmniejszonego hałasu i sygnatury cieplnej, a jednocześnie pokonywały duże odległości. Na podstawie tych kryteriów np. pojazdy zwiadowcze i patrolowe wydają się odpowiednimi pierwszymi kandydatami do hybrydyzacji.

Ocena pojazdów zelektryfikowanych i wybrane korzyści z ich stosowania według specjalistów amerykańskich

Seria pojazdów hybrydowych powinna być kolejnym krokiem w taktycznych pojazdach lądowych – naziemnych dla wojska³⁰. Oferują one bowiem siłom lądowym natychmiastowe korzyści, które bezpośrednio przyczyniają się do zwiększonej przeżywalności na polu walki. Należą do nich: niemal bezgłośna praca, niższe zużycie paliwa dzięki wyższej wydajności, wyższy chwilowy moment obrotowy podczas holowania i przyspieszania oraz mniejsze wymagania konserwacyjne. Posiadanie dużych akumulatorów i wydajne wytwarzanie energii elektrycznej na pokładzie wszystkich pojazdów taktycznych umożliwi również łatwiejszą integrację z nowymi czujnikami, a głównie zdalnie sterowanymi, dachowymi systemami uzbrojenia, zazwyczaj wymagającymi wysokiej, natychmiastowej mocy wyjściowej, jaką mogą zapewnić baterie. Do tego dochodzi rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną na poziomie małych jednostek dla radioodbiorników, dronów, tabletów, laserów, komputerów i czujników, które będzie wymagało lepszej dystrybucji energii, niż mogą zapewnić obecne pojazdy.

Równocześnie wskazuje się, że siły zbrojne są dzisiaj największym instytucjonalnym konsumentem paliw ropopochodnych na świecie, zużywającym aż 4,2 mld galonów paliwa rocznie. Wojsko płaci wysoką cenę za swoje paliwo – w 2019 roku Agencja Logistyki Obronnej wydała na paliwo ponad 9 mld USD. Wydatki znacznie spadły w czasie pandemii, ale w 2022 roku Kongres musiał przeznaczyć więcej pieniędzy na zakupy paliw nie raz, lecz dwa razy, co daje w sumie dodatkowo 3 mld USD. Ponadto wojna na Ukrainie i zobowiązanie OPEC do ograniczania produkcji utrzymują wysokie ceny paliw w dającej się przewidzieć przyszłości. Tymczasem zdaniem armii koszt dostarczenia paliwa do odległych placówek/obozów może wynieść Pentagon nawet 1000 USD za galon. Poza tym kwestia dotyczy nie tylko samych spraw finansowych. Niezwykle kosztowne i *de facto* trudno mierzalne pozostają też koszty związane ze śmiercią żołnierzy zabezpieczających transporty paliwa na terenach ogarniętych walkami. Tylko w latach 2003-2007 co ósma ofiara w Iraku była skutkiem ochrony konwojów z paliwem.

W rezultacie uzależnienie wojska od paliw ropopochodnych rodzi dużą odpowiedzialność. Konwoje są narażone na ataki powstańców i sił wroga. Cysterny w transzycie mogą zostać zaatakowane, podobnie jak rafinerie. Co więcej, paliwo można również wykorzystać jako narzędzie polityczne: w jednym z takich przypadków Pakistan zamknął krytyczne przejście graniczne do Afganistanu, zatrzymując konwoje pełne paliwa i zmierzające do misji NATO po drugiej stronie granicy. A wymagania logistyczne rosną tylko w operacjach bojowych na dużą skalę. Amerykańska dywizja pancerna może dziennie potrzebować nawet pół miliona galonów

³⁰ W. Mills, R. Wiechens, *The lethality case for electric military vehicles*, <https://mwi.usma.edu/the-lethality-case-for-electric-military-vehicles>.

paliwa. Rosyjskie wydatne problemy logistyczne i niesławny „konwój o długości 40 mil”, który utknął w martwym punkcie na drogach poza Kijowem, dodatkowo podkreślają, jak trudna jest logistyka paliwowa. Jednocześnie użycie cichych, elektrycznych motocykli taktycznych przez ukraińskie drużyny snajperskie pokazuje, jak takie technologie mogą uczynić żołnierzy bardziej śmiercionośnymi.

Częściowo z tego powodu armia amerykańska przoduje w badaniach nad propozycjami alternatywnymi i inwestuje w programy pilotażowe pojazdów elektrycznych i hybrydowych. Nowa strategia klimatyczna armii wyznaczyła cel na 2027 rok, jakim jest wystawienie całkowicie elektrycznej, lekkiej, nietaktycznej floty, oraz cel na 2035 rok, dotyczący zarówno w pełni elektrycznej, nietaktycznej floty, jak i hybrydowych pojazdów taktycznych do 2035 roku. Aby osiągnąć te cele, Oshkosh Defence już zademonstrował hybrydowy pojazd *Joint Light Tactical Vehicle* (JLTV), podczas gdy GM pokazał w pełni elektryczną wersję pojazdu dla oddziału piechoty oraz napędzaną wodorowymi ogniwami paliwowymi odmianę swojego terenowego Chevy Colorado sprzedawanego do wojska. Oprócz tego BAE od kilku lat pracuje nad hybrydowym bojowym wozem piechoty Bradley.

Ponadto korpus piechoty morskiej też musi wyrazić większe zainteresowanie przynajmniej pojazdami hybrydowymi. Marine Corps specjalizuje się bowiem w operacjach ekspedycyjnych i desantowych, przez co pozostaje jeszcze bardziej narażony na odcięcie od dostaw paliwa niż siły lądowe. Komendant Korpusu Piechoty Morskiej, generał David Berger, wielokrotnie podkreślał, że logistyka jest „funkcją stymulacji” dla przyszłych operacji Korpusu Piechoty Morskiej na Pacyfiku. Inni dowódcy piechoty morskiej byli jeszcze bardziej konkretni, argumentując, że „paliwo jest towarem nadszającym”. Nowe koncepcje morskie, takie jak Expeditionary Advanced Base Operations, kładą nacisk na logistykę morską, gdyż chińscy przywódcy wojskowi jasno powiedzieli, że będą atakować amerykańskie statki/okręty logistyczne z dostawami paliwa z pewnością wliczonymi w cenę. Zmniejszenie wymagań dotyczących utrzymania ma zatem kluczowe znaczenie dla marines.

Z drugiej jednak strony krytycy wysiłków zmierzających do elektryfikacji pojazdów wojskowych potępili je jako motywowane politycznie i nadmiernie skoncentrowane na zmianach klimatycznych, które, jak twierdzą, nie powinny być uwzględniane w planowaniu wypełnienia podstawowej misji wojskowej. Ale ignorują oczywiste taktyczne i finansowe korzyści wynikłe z elektryfikacji. Przejście wojska na pojazdy elektryczne i hybrydowe nie powinno budzić kontrowersji; pomoże uczynić siły bardziej śmiercionośnymi i zaoszczędzić pieniądze wojskowe, czyli pieniądze podatników. Pomoże to także w walce z kryzysem klimatycznym. Niemniej to tylko jedna z zalet, które rozciągają się również na pomoc siłom amerykańskim w uniezależnieniu się od zagranicznej ropy, głównie w krytycznych teatrach, takich jak Europa, gdzie przed rosyjską inwazją na Ukrainę – według analizy przeprowadzonej przez Brown University – wojsko amerykańskie zużywało energię odpowiadającą prawie połowie miliona baryłek rosyjskiej ropy rocznie.

Istnieją jednak prawdziwe wyzwania związane z elektryfikacją i hybrydyzacją wojskowych pojazdów lądowych. Baterie są oczywiście kluczowym komponentem, w przeważającej mierze produkowanym poza Stanami Zjednoczonymi i opierającym się na licie, kobaltie i innych surowcach, które również są w dużej mierze pozyskiwane i rafinowane poza Stanami Zjednoczonymi. Stwarza to słaby i kruchy łańcuch dostaw w czasie pokoju i może całkowicie odciąć przemysłową bazę obronną od krytycznych dostaw w przypadku poważnego konfliktu. Zwiększenie produkcji cywilnych pojazdów elektrycznych wzmocni jeszcze krytyczny sektor akumulatorów, ale może też konkurować z produkcją dla wojska poprzez tzw. efekt wypychania. W USA przewiduje się, że w ciągu najbliższych kilku lat zostanie otwartych kilka nowych rodzimych zakładów produkujących akumulatory, co odegra kluczową rolę we wspieraniu krajowej elektryfikacji. Podobnie rozszerzające się źródła litu i innych kluczowych materiałów mają kluczowe znaczenie dla wspierania elektryfikacji pojazdów wojskowych. Rząd musi więc intensywnie wspierać te dwie podstawowe gałęzie przemysłu, aby elektryfikacja była opłacalna dla wojska.

Bezpieczeństwo transportu akumulatorów to kolejne ryzyko związane z pojazdami elektrycznymi, którym należy się zająć. Wszystkie służby, ale w szczególności armia i piechota morska, transportują dużą liczbę pojazdów taktycznych statkami, a część nawet drogą powietrzną. Pożary baterii stwarzają nowe ryzyko w tym ruchu. Przy czym statki te już teraz transportują jeszcze bardziej niebezpieczne ładunki, takie jak amunicja i paliwo do silników odrzutowych, więc ustanowienie protokołów bezpieczeństwa dla akumulatorów pojazdów nie powinno stanowić większego problemu. Aby sprostać tej potrzebie, marynarka wojenna utworzyła dotąd specjalne biuro ds. bezpieczeństwa akumulatorów.

Tym samym, podczas gdy amerykański przemysł gwałtownie wkracza na rynek pojazdów elektrycznych, wojsko, przede wszystkim armia amerykańska, podejmuje pierwsze kroki w zakresie własnych pojazdów elektrycznych i hybrydowych. Zapewniają one wyraźne korzyści taktyczne oraz zmniejszają zapotrzebowanie na paliwo, a wraz z rozwojem technologii korzyści będą tylko wzrastać. Niemniej wojsko musi mieć pewność, że wykorzystuje odpowiednią technologię we właściwych miejscach. Nietaktyczne floty pojazdów, w dużej mierze działające z baz krajowych i mogące polegać na infrastrukturze ładowania w bazach amerykańskich, powinny zostać jak najszybciej zelektryfikowane. To środek oszczędnościowy z korzyścią dla środowiska. Pojazdy taktyczne, począwszy od JLTV, w miarę ich modernizacji powinny z kolei być hybrydyzowane z szeregowymi lub równoległymi konfiguracjami hybrydowymi. Tym bardziej, że przy hybrydowym układzie równoległym pojazd może czasowo – na określonym dystansie poruszać się wyłącznie w cichym trybie w pełni elektrycznym. Co więcej, żołnierze, którzy używają takich środków przewozu, odniosą jeszcze korzyści z lepszego lokalnego wytwarzania energii do wszystkiego, od zdalnie sterowanych stanowisk strzeleckich po ładowanie akumulatorów radiowych, prawie bezgłośnie układy napędowe, mniej konserwacji i większą wydajność. Przejście wojska na pojazdy hybrydowe to także wyjście z korzyściami

logistycznymi. Wojsko zaoszczędzi bowiem pieniądze i zużyje mniej paliwa. Brak elektryfikacji wojskowych pojazdów lądowych pozostawi je zaś w anachronizmie w epoce, w której przemysł przeszedł na bardziej wydajną technologię. Nadszedł zatem czas, aby śledzić poczynania przemysłu w sektorze cywilnym i przyspieszyć elektryfikację pojazdów należących do sił zbrojnych.

Kolejni autorzy amerykańscy³¹ wskazują na następujące trzy zasadnicze korzyści dla pojazdów wojskowych związane z częściową elektryfikacją ich napędów poprzez hybrydyzację. Są nimi:

- fakt, że elektryfikacja floty pojazdów armii zapewni przewagę konkurencyjną zarówno na polu bitwy, jak i poza nim. Pod względem osiągnięć pojazdy elektryczne (i pojazdy hybrydowo-elektryczne) są cichsze, mają zmniejszoną sygnaturę cieplną, lepiej się je prowadzi i z czasem uproszczą konserwację oraz zmniejszą ryzyko związane z uzupełnianiem paliwa;
- fakt, że korzyści płynące z elektryfikacji nie ograniczają się do napędu i osiągnięć. Baterie pojazdów elektrycznych przyspieszą zdolność armii do działania na coraz bardziej zelektryfikowanym polu walki, zasilając systemy pokładowe i zewnętrzne (takie jak systemy bezzałogowe, czujniki, systemy żołnierskie, systemy aktywnej ochrony) niezbędne do osiągnięcia przewagi w przyszłej walce. W tym środowisku – w terenie wiele wojskowych pojazdów elektrycznych może służyć jako centra wytwarzania i dystrybucji energii dla innych krytycznych systemów;
- fakt, że rozwój technologii leżących u podstaw elektryfikacji flot pojazdów armii jest bardziej zaawansowany w komercyjnych sektorach motoryzacyjnym i użyteczności publicznej, niż powszechnie się uważa. Wiele technologii elektryfikacyjnych, takich jak ulepszona gęstość energii w akumulatorach oraz wytwarzanie i dystrybucja energii, da się dostosować i wdrożyć w istniejących pojazdach wojskowych już dzisiaj – lub w najbliższej przyszłości – w celu wspierania rozwoju i projekcji siły za pomocą zarówno pojazdów w pełni elektrycznych, jak i hybrydowych.

Wskazuje się także, że planiści i analitycy obronni – rozważający i analizujący przyszłe sposoby prowadzenia walki – poświęcili uwagę pojawiającym się technologiom kształtującym rozmiary, dynamikę i tempo konfliktu. Na szczycie listy znajduje się pełniejsza integracja sztucznej inteligencji (AI) oraz technologii wspierających i dostępnych możliwości w większości aspektów operacji wojskowych, jeśli nie we wszystkich. Ta „inteligencja” konfliktu umożliwi wyższy stopień autonomii bezzałogowym systemom powietrznym i naziemnym oraz ułatwi skalowanie współpracy człowiek-maszyna – ma pomóc w wykrywaniu pojawiających się zagrożeń,

³¹ R. Blakemore, T. Nurkin, *Power projection: Accelerating the electrification of US Military Ground Vehicles*, Issue Brief, November 2022, Atlantic Council Global Energy Center, <https://www.atlanticcouncil.org/wp-content/uploads/2022/11/Power-Projection-Accelerating-the-Electrification-of-US-Military-Ground-Vehicles.pdf>.

przyspieszyć przetwarzanie złożonych zestawów danych, w tym na granicy taktycznej, oraz usprawnić i przyspieszyć podejmowanie decyzji. Ponadto systemy autonomiczne, takie jak zaawansowana broń ofensywna i defensywna, w tym pokładowa ukierunkowana broń energetyczna, wszechobecne i połączone w sieć czujniki, coraz częściej będą włączane w wielu domenach w celu wsparcia sił lądowych³². Jednak te wizje przyszłej walki nie zostaną zrealizowane, jeśli nie rozwinię się zdolność niezawodnego wytwarzania, używania i rozpowszechniania elektryczności niezbędnej do zasilania tych nowych zdolności zwielokrotniania siły. Jak się słusznie ocenia: „Podejście armii (...) do elektryfikacji pól bitewnych, elektryfikacja pola bitwy jest podstawowym czynnikiem umożliwiającym ten nowy paradygmat, który widzi lżejsze, bardziej mobilne siły ze zwiększonym zespołem człowiek-maszyna, osiągające znacznie więcej przy jednoczesnym zmniejszeniu narażenia ludzi na ryzyko”³³.

Elektryfikacja floty wojskowych kołowych pojazdów taktycznych, a z czasem cięższych pojazdów bojowych i gaśnicowych, wpłynie też na wykorzystanie i skuteczność systemów bezzałogowych na co najmniej dwa sposoby. Po pierwsze, niektórzy obserwatorzy uważają, że pojazdy naziemne bez załogi mogą być kanałem dla innowacji i eksperymentów w zakresie w pełni elektrycznych pojazdów bojowych. Chociaż bowiem elektryfikacja floty załogowych pojazdów bojowych jest odległa o dziesięciolecia, to harmonogram w pełni elektrycznych zrobotyzowanych pojazdów bojowych może być krótszy. W rezultacie platformy robotyczne mogą być pierwszym przypadkiem użycia elektrycznych pojazdów bojowych³⁴. Ale jeszcze bardziej bezpośrednie i namacalne znaczenie ma możliwość ułatwienia szerszego użycia małych bezzałogowych systemów powietrznych i naziemnych, zapewniająca im niezawodne zasilanie po wysunięciu do przodu. Bezzałogowe systemy powietrzne mikro- i małego rozpoznania (UAS) do ochrony małych jednostek lub pojazdów, wysunięte do przodu bezzałogowe pojazdy naziemne (UGV) oraz zespoły człowiek-maszyna będą służyć jako cenne mnożniki siły dla małych, rozproszonych, ale połączonych w sieć ekspedycji jednostek działających w spornych środowiskach lub w ich pobliżu, przy jednoczesnym zmniejszeniu ryzyka dla operatorów.

Niezwykle istotne pozostają także uproszczenie logistyki i redukcja ryzyka. Elektryfikacja floty pojazdów naziemnych armii, głównie wojskowych kołowych pojazdów taktycznych, wykazuje mianowicie potencjał do przekształcenia logistyki armii w celu wsparcia operacji lądowych oraz zmniejszenia ryzyka przechwytywania i ofiar związanych z transportem paliw kopalnych do środowisk bojowych. Zmniejszy to także potrzebę przewozu kosztownych generatorów zasilanych pali-

³² British Army, *British Army approach to battlefield electrification*, May 2022, <https://www.army.mod.uk/media/17010/british-army-approach-to-battlefieldelectrification.pdf>.

³³ Tamże.

³⁴ J. Judson, *Is the army warming up to electric vehicles in its fleet?*, Defense News, July 12, 2021, <https://www.defensenews.com/land/2021/07/12/is-the-armywarming-up-to-electric-vehicles-in-its-fleet/>.

wami kopalnymi, aby pomóc w ładowaniu rosnącej liczby systemów zależnych od energii, które jednostki ekspedycyjne będą musiały zabierać ze sobą.

Zarazem zwraca się uwagę, że przyjęcie wodorowych ogniw paliwowych będzie się wiązało z wyzwaniem adaptacyjnym w planowaniu elektryfikacji armii. Do najpilniejszych wyzwań w tej sferze należą kwestie dotyczące magazynowania wodoru i przyszłego rozmieszczenia infrastruktury do jego tankowania, co stwarza zagrożenie dla bezpieczeństwa i wymagałoby rozmieszczenia dodatkowej infrastruktury w celu generowania dostaw wodoru z elektrolizy. Stawia też elektryfikację armii w centrum toczącej się w sektorze energetycznym debaty na temat rozwoju rynku wodoru, który w porównaniu z technologią akumulatorową zdecydowanie znajduje się dopiero we wczesnej fazie rozwojowej. W przyszłości pewne wybrane przypadki użycia transportu wojskowego mogą być elektryfikowane za pomocą akumulatorów (litowo-jonowych), a wodorowe ogniwa paliwowe pomogą rozwiązać problem napędu pojazdów cięższych, wymagałoby to jednak dwóch zestawów infrastruktury, aby zaspokoić obie potrzeby. Bez względu na te technologiczne wyzwania elektryfikacja transportu z pewnością będzie procesem etapowym, obejmującym zarówno elektryfikację układu napędowego, jak i pokładowych systemów wspomaganie samego pojazdu.

W rzeczywistości w przypadku pojazdów, w których technologie akumulatorów i ładowania nie są wystarczająco dojrzałe, pojazdy hybrydowe mogą służyć jako pomost do dalszej elektryfikacji systemów pokładowych i napędu. Można to osiągnąć poprzez zastosowanie specjalnie skonstruowanych pojazdów taktycznych z napędem hybrydowym, które strategia klimatyczna armii ma wprowadzić do 2035 roku³⁵. Chociaż rozwiązania te nie są całkowicie niezależne od paliwa, to umożliwiają ograniczenie ilości paliwa, które należy przetransportować do stref działań bojowych, zmniejszając popyt i ryzyko związane z logistycznymi łańcuchami dostaw. Specjalnie zbudowane pojazdy hybrydowe w podobny sposób zapewnią żołnierzom natychmiastowe poczucie korzyści płynących z elektryfikacji i pomogą uniknąć krótkoterminowych upadków i wyzwań infrastrukturalnych, jednocześnie znacząco integrując zelektryfikowane platformy z istniejącymi arsenałami w sposób przyspieszający rozwój infrastruktury umożliwiającej pełną elektryfikację, tj. elektryfikację długoterminową.

Przy tym strategiczne zaangażowanie w elektryfikację na przestrzeni dziesięcioleci, a nie tylko kilku lat, pozwala również armii przyjąć łatwiej dostępne możliwości w ramach elektryfikacji transportu, czyli systemy wsparcia i systemy drugorzędne, takie jak czujniki i systemy uzbrojenia, wykorzystujące lub przyczyniające się do szerszych możliwości wynikających z dążenia do elektryfikacji pola bitwy. Takie podejście złagodzi potrzebę natychmiastowej hurtowej zmiany w logistyce

³⁵ D. Vergun, *Prototype aims to reduce fuel use, improve tactical vehicle performance*, DOD News, US Department of Defense, November 24, 2021, <https://www.defense.gov/News/News-Stories/Article/Article/2853649/prototype-aims-to-reduce-fuel-use-improve-tactical-vehicle-performance/>.

energetycznej armii poprzez stopniowe zwiększanie zapotrzebowania na energię elektryczną w czasie i oferowanie stałej ścieżki dostarczania infrastruktury potrzebnej do zaspokojenia tego zapotrzebowania. To podwójne podejście, polegające na szybkim dążeniu do pełnej elektryfikacji pojazdów, takich jak pojazd oddziału piechoty, gdzie jest to bardziej osiągalne, oraz bardziej stopniowe podejście do innych pojazdów wymaga jednak pewnej woli ze strony sił zbrojnych, aby:

- zaabsorbować dodatkowe koszty związane z nabyciem, obsługą dwóch powiązań infrastrukturalnych (zarówno paliw tradycyjnych, jak i zelektryfikowanych łańcuchów dostaw) i zarządzaniem nimi;
- zadeklarować i utrzymać jasno określony zestaw wymagań dotyczących elektryfikacji transportu i/lub pola bitwy, aby skutecznie zintegrować elektryfikację w trzydziestoletnim horyzoncie czasowym.

Deklarowanie ambicji dotyczących samego transportu zelektryfikowanego w niewielkim stopniu wspiera szybkie wdrażanie technologii, uwzględniając gruntowne zmiany w całym łańcuchu wartości energii i transportu, które będą potrzebne, aby zrealizować te ambicje. Ze względu na to, że stopniowe zmiany prawdopodobnie będą charakteryzować elektryfikację technologii kształtujących przyszłość mobilności wojskowej, takie zmiany w dużym stopniu będą uzależnione od zdolności i będą wymagały wyraźnych wskazówek ze strony armii w następujących kwestiach:

- Jaki problem należy rozwiązać za pomocą elektryfikacji?
- Jaką lukę mogą wypełnić pojazdy elektryczne?
- Jakiego rodzaju rozwiązania są konieczne, aby sprostać wymogom i zyskać przewagę w przyszłej walce?
- W jaki sposób pojazdy elektryczne i hybrydowe będą wykorzystywane i konserwowane, aby osiągnąć przewagę na przyszłym polu bitwy?
- Jaka jest strategia pola?
- Czy z czasem armia będzie dążyć do elektryfikacji określonych flot lub wszystkich pojazdów?

Dążenie armii do elektryfikacji transportu odbywa się równoległe z przejściem w kierunku elektryfikacji pojazdów, które już jest w toku i jest kierowane głównie przez producentów z sektora cywilnego.

Na tej podstawie specjaliści amerykańscy wskazują na następujące wnioski i zalecenia, które zostaną przedstawione w całości³⁶ ze względu na ich uniwersalność wdrożeniową oraz zawartość informacyjną.

Przede wszystkim omówione wyzwania ukształtują zarys dążenia armii (amerykańskiej) do elektryfikacji transportu, ale stała elektryfikacja pola bitwy sugeruje, że jest ona raczej kwestią „kiedy” i „jak”, a nie „czy”. A zatem zaangażowanie armii w elektryfikację floty taktycznej i nietaktycznej, choć oparte na strategii klimatycznej, stanowi okazję do umożliwienia Stanom Zjednoczonym rozpoczęcia rozwiązywania problemów logistycznych, operacyjnych i technologicznych związanych

³⁶ R. Blakemore, T. Nurkin, wyd. cyt.

z przestrzenią bojową, przy jednoczesnym natychmiastowym osiągnięciu wybranych korzyści w perspektywie krótkoterminowej. W miarę postępu tych dyskusji i wysiłków na rzecz elektryfikacji ważne będzie, aby zainteresowani – tzw. interesariusze ze strony zarówno armii, jak i władzy ustawodawczej i wykonawczej, pamiętali o trzech kluczowych spostrzeżeniach wynikających z tego dokumentu oraz o trzech zaleceniach wysokiego szczebla dotyczących dążenia do elektryfikacji.

Wyniki

1. Elektryfikacja floty pojazdów armii zapewni przewagę konkurencyjną zarówno na polu bitwy, jak i poza nim. Przykład udanego wykorzystania e-rowerów przez Siły Zbrojne Ukrainy na początku rosyjskiej inwazji podkreśla ten punkt. Tak długo, jak trajektoria przyszłej walki pochyla się w kierunku elektryfikacji, umożliwienie przywództwa USA w tej następnej pokoleniowej zmianie w działaniach wojennych musi być priorytetem dla Departamentu Obrony. Ponadto ryzyko związane z technologią, wojskiem i klimatem wynikające z braku elektryfikacji flot pojazdów lądowych armii powinno motywować przyspieszenie rozwoju, eksperymentów i przyjęcia pojazdów elektrycznych i pojazdów hybrydowych.

2. Korzyści płynące z elektryfikacji nie ograniczają się do napędu i osiągow. Baterie pojazdów elektrycznych odegrają również znaczącą rolę w przyspieszeniu zdolności armii do działania na zelektryfikowanym polu walki przyszłości poprzez zasilanie systemów pokładowych i zewnętrznych (takich jak np. systemy bezzałogowe, sensory, systemy żołnierskie, aktywne systemy ochrony), niezbędnych do osiągnięcia przewagi w przyszłej walce. Chociaż elektryfikacja układów napędowych jest niezbędna do elektryfikacji transportu wojskowego, elektryfikacja określonych systemów wsparcia w pojeździe może zapewnić pewne korzyści taktyczne, które także będą wspierać przyszłą walkę. Elektryfikowanie pomocniczych systemów zasilania zależy od łatwiej dostępnych technologii. To kluczowy element szerszej historii elektryfikacji, szczególnie że opracowanie technologii akumulatorów niezbędnych do spełnienia wymagań dotyczących gęstości energii i ładowania cięższych pojazdów bojowych wymaga czasu.

3. Rozwój technologii leżących u podstaw elektryfikacji flot wojskowych kołowych pojazdów taktycznych armii może bazować na technologiach przejętych z cywilnego sektora motoryzacyjnego. Wiele technologii pojazdów elektrycznych opracowanych w tym sektorze można zaadaptować do celów wojskowych i zastosować dzisiaj – lub w najbliższej przyszłości – w celu wspierania rozwoju i demonstracji pojazdów zarówno w pełni elektrycznych, jak i hybrydowych.

Zalecenia

1. Należy przyjąć dwutorowe podejście do operacjonalizacji elektryfikacji, dostarczające istniejące technologie do krótkoterminowych potrzeb, jednocześnie in-

westując w rozwój technologii akumulatorów i sposobów ładowania niezbędnych do osiągnięcia długoterminowych, szeroko zakrojonych celów elektryfikacji armii. Podejście to powinno się składać z trzech głównych elementów:

- Osiągnięcie krótkoterminowych i bieżących „wygranych” oraz eksperymentowanie poprzez adaptację/modernizację istniejącej floty: armia powinna jak najszybciej nadać priorytet włączeniu łatwo dostępnych komercyjnych technologii elektryfikacji do istniejących projektów pojazdów tam, gdzie to możliwe, aby rozpocząć proces eksperymentowania i ustalania wymagań dla przyszłych pojazdów. Podczas gdy harmonogramy elektryfikacji flot pojazdów wojskowych są często omawiane w ciągu dziesięcioleci, możliwości realizacji różnych etapów elektryfikacji są znacznie większe. Wykorzystanie istniejących lub nieuchronnych technologii w celu zrealizowania korzyści płynących z elektryfikacji i eksperymentowania z nią może nastąpić poprzez elektryfikację istniejących projektów pojazdów (pojazd oddziału piechoty). Opracowywanie demonstratorów technologii hybrydowej stanowi tu więc pośredni krok w kierunku pełnej elektryfikacji (hybrydowy czołg Abrams-X) oraz włączenia taktycznych zestawów elektryfikacyjnych do istniejących pojazdów (JLTV).
- Budowa infrastruktury: armia powinna jednocześnie rozwijać inwestycje w zakresie ładowania, wytwarzania energii elektrycznej i innych technologii oraz koncepcji infrastruktury niezbędnych do budowy nowej infrastruktury logistycznej i utrzymania ruchu. Badanych jest kilka technologii, które mogłyby ułatwić osiągnięcie celu, jakim jest zrównoważona i możliwa do wdrożenia infrastruktura ładowania pojazdów elektrycznych, chociaż są wymagane dalszy rozwój i eksperymentowanie z tymi technologiami oraz możliwościami, na które pozwolą w ciągu najbliższych kilku lat, zanim będą mogły zostać skutecznie wdrożone w celu obsługi skalowanych pojazdów elektrycznych nadających się do normalnego zastosowania.
- Inwestowanie w badania i rozwój, aby propagować elektryfikację w całym spektrum pojazdów wojskowych, w tym specjalnie zbudowanych pojazdów elektrycznych. Większa gęstość energii akumulatorów jest niezbędna do skalowania elektryfikacji cięższych kołowych wojskowych pojazdów taktycznych, a głównie pojazdów bojowych i gąsienicowych, oraz do projektowania specjalnie skonstruowanych pojazdów bojowych.

2. Przyspieszanie rozwoju i opracowywanie koncepcji operacyjnych, które przedstawiają, w jaki sposób pojazdy elektryczne przyczynią się do przyszłej walki, i informują o wymaganiach dotyczących ich nabywania. W tym kontekście decydenci i służby przedstawiły pewne koncepcje operacyjne i wymagania odnoszące się do pojazdów elektrycznych oraz podjęły zachęcające, choć niepewne, pierwsze kroki w kierunku elektryfikacji. Niemniej eksperci wielokrotnie podkreślali potrzebę bardziej szczegółowych wymagań i koncepcji operacyjnych, aby kierować rozwojem pojazdów elektrycznych i infrastruktury. Eksperci wskazali również na iteracyjny i interaktywny charakter wysiłków zmierzających do uzyskania prze-

wagi na polu bitwy, pytając, jak konkurenci lub przeciwnicy mogą zareagować na elektryfikację armii. W jaki sposób armia może uodpornić pojazdy elektryczne na impulsy elektromagnetyczne lub inne nowe zagrożenia i co oznaczają wysiłki na rzecz ochrony pojazdów elektrycznych dla wymagań dotyczących projektowania i rozwoju? Wysiłki te muszą też obejmować udoskonalone podejście do dostosowania i komunikowania wymagań armii w zakresie elektryfikacji, odpowiednio dostosowując perspektywy przyjęcia zelektryfikowanych technologii transportowych zarówno do obecnej trajektorii komercyjnych technologii pojazdów elektrycznych, jak i szerokiego zakresu możliwości związanych z napędem i usługami pomocniczymi dla całej floty. Tylko wtedy Ministerstwo Obrony będzie mogło podjąć kolejny krok w zakresie udzielania wskazówek dla bazy przemysłowej w sferze dopasowanych rozwiązań.

3. Trzeba stworzyć przemyślane ścieżki dla komercyjnych firm motoryzacyjnych i użyteczności publicznej, aby sprostać wyzwaniom technologicznym, projektowym i infrastrukturalnym związanym z elektryfikacją wojskowych pojazdów lądowych. Firmy przodujące w elektryfikacji pojazdów są w dużej mierze skoncentrowane na komercji, biorąc pod uwagę zaawansowane etapy elektryfikacji aut cywilnych. Podobne trendy występują w całym łańcuchu wartości elektryfikacji – od magazynowania przez przesył aż po dystrybucję. Ciągłe inwestycje i rozwój komercyjny z pewnością pomogą kierować i wpływać na wysiłki armii i Ministerstwa/Departamentu Obrony w celu militaryzacji technologii pojazdów elektrycznych i hybrydowych. W rezultacie partnerstwa między wojskiem a przemysłem komercyjnym są niezbędne do spełnienia celów armii i władz. Niestety, podobnie jak w przypadku innych obszarów, w których władza w coraz większym stopniu polega na komercyjnych technologiach, takich jak oprogramowanie, Ministerstwo ma trudności z wykorzystaniem innowacji komercyjnych w dobie szybkich innowacji. Potrzebne są nowe praktyki w zakresie zaangażowania i pozyskiwania, aby zachęcić przemysł do inwestowania w usługi i do współpracy z nimi w celu osiągnięcia celów elektryfikacji.

Osiągnięcie celów armii i czerpanie korzyści z elektryfikacji okaże się zatem niełatwym zadaniem. Sukces będzie zależał od głębokiego rozważenia ze strony organów ds. planowania operacyjnego i zarządzania logistyką ciągłego zaangażowania i wsparcia parlamentu i szerszej społeczności politycznej oraz kreatywnego zaangażowania w komercyjną elektryfikację transportu, która już trwa. Jednak jeśli zostanie to zrobione z wyraźnym wglądem w dostępne możliwości i wyzwania technologiczne, które należy przezwyciężyć, elektryfikacja transportu może być kluczowym krokiem w tych wysiłkach.

Przy tym kolejni specjaliści amerykańscy wskazują na kilka istotnych zagadnień, jakimi są kwestie związane z ciągłym zasilaniem, mobilnością i integracją w przyszłych pojazdach bojowych, wyzwania w sferze poziomów mobilności, wymagania dotyczące zasilania oraz zarządzanie ciepłem i cichy tryb jazdy.

1. Ciągłe zasilanie

W pojeździe bojowym istnieją trzy główne obszary zapotrzebowania użytkownikom na moc/ciągły napęd: mobilność, zarządzanie ciepłem i tryb cichy. Ponadto istnieje kilka innych miejsc, które wykazują znacznie mniejsze zapotrzebowanie na energię niż pierwsze trzy sfery. Zasilanie jest dostarczane do większości układów ruchomych i termicznych z głównego napędu, silnika, podczas gdy w trybie cichym pojazd jest zasilany wyłącznie z magazynu energii, zestawu akumulatorów, również ładowanego z generatora napędzanego silnikiem. W celu uzyskania optymalnych osiągnięć moc jest dzielona między silnik i akumulator, aby można było dokonać najlepszej oszczędności paliwa lub mocy rozdzielanej zgodnie z określonym cyklem pracy pojazdu.

2. Mobilność

Pojazdy wojskowe muszą być w stanie działać w dowolnym miejscu na świecie, w ekstremalnych warunkach środowiskowych, od mroźnych temperatur w Arktyce po intensywne upały na pustyniach, od twardych kamienistych i utwardzonych dróg po pagórkowate i miękkie gleby. Muszą wytrzymywać wibracje, wstrząsy i gwałtowne skręcanie występujące podczas jazdy po nierównym terenie oraz muszą być w stanie działać przez długi czas przy bardzo niewielkiej lub żadnej konserwacji. Powyższy opis został zaczerpnięty z podręcznika opublikowanego przez Army Materiel Command (AMC) w 1965 roku. Wszystkie te warunki obowiązują do dzisiaj. Istnieją jednak dodatkowe wymagania, zmieniające całą filozofię projektowania pojazdów. Pojazdy przyszłości muszą być bowiem również lżejsze, szybsze i łatwiejsze do rozmieszczenia, ale jednocześnie bardziej śmiercionośne i gwarantujące wyższą możliwość przeżycia. Ograniczenia te wymuszają odejście od tradycyjnych metod budowy pojazdów bojowych. W związku z tym należy opracować i wdrożyć nowe technologie wspomagające, aby sprostać technicznym wyzwaniom przyszłych pojazdów.

3. Zasilanie i integracja w przyszłych pojazdach bojowych

W przypadku pojazdu o masie 20 t moc wymagana do przyspieszenia, osiągnięcia prędkości maksymalnej i zdolności pokonywania wzniesień przy 10 km/h wynosi około 400-500 kW. W hybrydowym pojeździe elektrycznym silnik elektryczny zapewnia większość tej mocy. Silnik spalinowy zaś jest zwykle zaprogramowany do pracy w paśmie optymalnej wydajności na swojej mapie paliwowej. Moc doładowania dla pracy przejściowej jest uzupełniana energią zmagazynowaną z akumulatora. Zatem do napędu wystarczyłyby stosunkowo mały system magazynowania energii.

4. Poziomy mobilności

Istnieją trzy poziomy mobilności: strategiczny, operacyjny i taktyczny. Mobilność strategiczna to zdolność pojazdu do poruszania się lub przemieszczania się do teatru operacyjnego. Oznacza to, że lżejsze i mniejsze pojazdy mają większą mobilność strategiczną. Mobilność operacyjna to zdolność pojazdów do poruszania się o własnych siłach z różnymi prędkościami. Mobilność taktyczna lub mobilność na polu bitwy to zdolność pojazdu do poruszania się po różnych terenach i prze-

szkodach, takich jak rowy, okopy i ciekły wodne. Wymagania mobilności operacyjnej i taktycznej są ekstremalne, ale konieczne, gdyż pojazd musi być w stanie działać w różnych środowiskach wojskowych. Najbardziej krytyczne wymagania dotyczące mobilności są następujące:

- maksymalna prędkość,
- maksymalna prędkość w terenie,
- zdolność pokonywania wzniesień (maks. 60%).

5. Wymagania dotyczące zasilania

Wymagania, takie jak przyspieszenie, maksymalna prędkość pojazdu, kierowanie przy dużych promieniach i prędkość terenowa, zależą od mocy dostępnej z głównego napędu i urządzenia do magazynowania energii (akumulatory), docierającej do kół/gąsienic lub kół, gdy jest to potrzebne w różnych warunkach mobilności pojazdu. We wszystkich pojazdach moment obrotowy jest przenoszony z głównego napędu na koła lub koła/gąsienice zgodnie z określoną architekturą, szeregowo lub równoległe, w zależności od zastosowania i cyklu pracy pojazdu.

6. Zarządzanie ciepłem

W obecnej flocie, oprócz zapotrzebowania na moc do obsługi pojazdu, od 10 do 15% mocy generowanej z głównego napędu jest potrzebne na układ chłodzenia. Układ chłodzenia musi być zaprojektowany tak, aby pojazd mógł pracować w sposób ciągły na określonym poziomie, bez przekraczania limitów termicznych którekolwiek z jego elementów.

W przypadku napędu hydraulicznego wykorzystującego przekładnię hydrokinetyczną lub hydromechaniczną, jak w większości dzisiejszych amerykańskich pojazdów wojskowych, wszystkie opisane powyżej wymagania dotyczące mobilności są wykonalne. W odniesieniu do hybrydowego układu elektrycznego sytuacja jest bardziej złożona i stanowi większe wyzwanie. Mimo że dla pojazdu o masie 20 t wytwarzanie energii można osiągnąć za pomocą komponentów o rozsądnej wielkości, rozmiar układu chłodzenia pozostaje jednym z największych wyzwań technicznych do pokonania. Układ chłodzenia hybrydowego pojazdu elektrycznego z obecnie dostępnymi technologiami może być od czterech do sześciu razy większy niż w jego mechanicznym odpowiedniku. W związku z tym należy opracować komponenty działające w wysokich temperaturach, aby zmniejszyć obecne wymagania dotyczące chłodzenia hybrydowego systemu elektrycznego. Komponenty wysokotemperaturowe potrzebne do sprostania wyzwaniom związanym z zarządzaniem temperaturą obejmują elektronikę mocy, bezszczotkowe silniki trakcyjne prądu stałego i akumulatory, chociaż najbardziej krytyczne wśród tych trzech są urządzenia energoelektroniczne.

7. Cichy tryb jazdy

Zapotrzebowanie na moc dla trybu cichego pozostaje trudne do ustalenia ze względu na wymagania, które nie są dobrze zdefiniowane. Można jednak oszacować pewną liczbę możliwości trybu cichego pojazdu hybrydowego elektrycznego, opierając się na informacji o pojemności baterii na pokładzie tego pojazdu. Wykorzystu-

jąc zaawansowane akumulatory o dużej gęstości energii, takie jak Li-Ion, przyjmując się poziom 25-30 kWh energii na pokładzie. Ta ilość magazynowanej energii może obsłużyć ciche misje obserwacyjne trwające dwie godziny, jeśli zapotrzebowanie na moc nie przekracza 10 kW na godzinę. Należy zauważyć, że ilość dostarczanej energii musi przekraczać nominalne zapotrzebowanie na energię o 50%, aby uwzględnić wydajność systemu, degradację w ekstremalnych temperaturach i cykl życia. Obecnie typowy akumulator litowo-jonowy o pojemności 30 kWh zajmuje 0,5 m³ (17 stóp³).

Jako możliwe dojsię do wprowadzenia – rozmieszczenia wojskowych flot elektrycznych specjaliści amerykańscy proponują dziesięć następujących kroków³⁷:

Krok 1. Zdefiniowanie profilu i zastosowania floty. Trzeba zdefiniować cykle pracy/jazdy, długość i warunki tras floty, cykle życia, ładowność, czas przebywania oraz konserwację i względy operacyjne. Należy określić ilościowo liczbę ZEV (*Zero-Emission Vehicle* – pojazd zeroemisyjny), jaką może uzyskać każda instalacja zidentyfikowana do wymiany pojazdu. Informacje te pomagają ustalić TCO, zoptymalizować technologie i przełożyć dane o trasach na oszczędności. Opcje obejmują ładowanie w bazach, na trasie, współdzielone oraz w miejscu docelowym/w punkcie końcowym, samodzielnie lub w połączeniu, aby spełnić wymagania dotyczące przepustowości i odporności.

Krok 2. Zarządzanie zmianami organizacyjnymi. Elektryfikacja wymaga od personelu przyjęcia nowego sposobu pracy. Trzeba zastosować metody zarządzania zmianami, aby ustalić strategię organizacyjną, która poprowadzi przejście do operacji elektrycznych. Ta strategia pomaga określić wpływ operacyjny i zarządzać nim, utrzymać wysokie morale podczas przejścia, zapewnić rozwój umiejętności personelu w celu wspierania operacji floty elektrycznej oraz dostosować przejście na ZEV (*Zero-Emission Vehicle* – pojazd zeroemisyjny) do prawnych wymogów wykonawczych i ustawowych dotyczących floty.

Krok 3. Przegląd i wybór opcji technologii. Należy rozważyć typy pojazdów, technologie ładowania, sieci komunikacyjne i platformy oprogramowania dla ZEV, koordynację i zarządzanie ładowaniem. Te wybory mają pomóc kierownikom flot serwisowych, specjalistom ds. akcji ZEV i kierownikom instalacji ds. energii w integracji obiektów instalacyjnych oraz w optymalizacji tych systemów pod kątem zarządzania flotami, zieloną energią i ładowaniem. System sieciowy pozostaje szczególnie cenny dla menedżerów i przedsiębiorstw użyteczności publicznej, gdyż wielkość flot i możliwości rosną wykładniczo. Wąskie gardła w łańcuchu dostaw powodują długie terminy dostaw sprzętu, takiego jak tablice rozdzielcze i akumulatory.

Krok 4. Zoptymalizowanie energii na miejscu. Trzeba ocenić możliwości lokalnego pozyskiwania energii odnawialnej i magazynowania energii, aby zminima-

³⁷ *10 steps to deploy military electric fleets. Optimal charging networks for reliability, resilience, and sustainability.* Black & Veatch, <https://webassets.bv.com/2022-08/22GEx10StepsMilitaryElectricFeetsEbook%20%282%29.pdf>.

lizować opłaty za szczytowe zapotrzebowanie, zrównoważyć obciążenia i obniżyć koszt czystej energii. Elastyczny, tani system energetyczny monetyzuje źródła energii w celu kontrolowania wydatków floty, przyspiesza zwrot z inwestycji i obniża TCO. Redukcja emisji wymaga bowiem fundamentalnej zmiany w operacjach floty. Ta zmiana stanowi okazję do włączenia źródeł wytwarzania i magazynowania na miejscu w celu monetyzacji źródeł energii i kontrolowania wydatków na flotę. W ramach planowania ładowania pojazdów elektrycznych menedżerowie mogą wybrać elastyczną, modułową konstrukcję, która obsługuje magazynowanie energii i mieszankę źródeł energii, takich jak odnawialne źródła energii, energia elektryczna, biogaz, wodór i skroplony gaz ziemny. System ewoluuje, aby wspierać nowe aplikacje i technologie w miarę ich dojrzewania.

Krok 5. Zrozumienie zapotrzebowania na usługi *on-site*. Floty z napędem elektrycznym wymagają zasilania. Na przykład flota 56 autobusów wymagałaby około 11 MWh, a flota 542 autobusów mogłaby potrzebować około 109 MWh. Do obsługi ładowania na miejscu może być wymagana modernizacja elementów sieci i urządzeń sieciowych. Modernizacje budynków wymagają planowania połączeń elektrycznych i mediów, projektowania chłodzenia i miejsca na sprzęt.

Krok 6. Wybór i planowanie lokalizacji. Dokładne rozważenie podziału na strefy pozwoleń, przestrzeni fizycznej, komunikacji i zasilania odgrywa kluczową rolę. Przemysłany i świadomy wybór lokalizacji minimalizuje koszty i czas projektu. Miejsca muszą uwzględniać funkcjonalny układ obiektów, idealnie zlokalizowanych i zbudowanych w obrębie społeczności. Na harmonogram i koszt może radykalnie wpłynąć kilka czynników, takich jak odległość od lokalizacji do podstacji oraz konieczność modernizacji wzdłuż obwodu dystrybucyjnego ze względu na rozwój konkurencyjnych lokalizacji i obciążenie ładowania.

Krok 7. Prowadzenie koordynacji użytkowej, inżynieria i projektowanie. Wcześniej trzeba rozpocząć angażowanie lokalnych i regionalnych zakładów użyteczności publicznej, aby opracować plan dostaw energii, który wykorzystuje programy użyteczności publicznej i stawki opłat. Proces planowania obejmuje obliczone oszczędności na podstawie przyszłych obciążeń ładowania lub produkcji. Aby projektować przyszłościowo, należy wziąć pod uwagę wzrost w ciągu od pięciu do dziesięciu lat (i dłużej), by można było przewidzieć wydajność energetyczną obiektu. Technologia ładowania oraz produkcji i magazynowania energii będzie nadal się rozwijać, ale najbardziej opłacalne może być jednoczesne instalowanie istniejącej i przewidywanej infrastruktury na miejscu. Tym bardziej, że nieruchomości szybko stają się konkurencyjnym punktem zapalnym pod względem elektryfikacji. Kierując się celami zrównoważonego rozwoju i odporności, wielu menedżerów aktywnie kupuje odpowiednie tereny i wynajmuje je, dopóki nie będą gotowe do rozwoju. Uzyskanie odpowiedniego dostępu teraz pozwoli zaoszczędzić pieniądze w dłuższej perspektywie.

Krok 8. Złożenie wniosku o pozwolenie i zatwierdzenie. Wymagania dotyczące podziału na strefy użytkowania gruntów, pozwoleń i pierwszeństwa przejazdu stają się coraz bardziej złożone wraz z rozwojem na większą skalę i zwiększonym

poziomem mocy. Ta złożoność wynika z wymagań przestrzennych i wielu umów dotyczących nieruchomości wymaganych przez zakład energetyczny do przecinania działek w celu dostarczania energii. Wymagane uprawnienia mogą obejmować wnioski o wpływ na środowisko oraz umowy i zezwolenia. Inne powiązane dokumenty, które mogą być wymagane, obejmują obowiązujące warunki użytkowania sprzętu, pojazdów i infrastruktury, umowy dzierżawcy lub właściciela nieruchomości oraz usługi wdrożeniowe.

Krok 9. Modernizacja sieci dystrybucyjnej. Nowe obciążenia ładowania mogą wymagać zmodernizowanych lub nowych linii zasilających, modernizacji podstacji, a nawet nowych podstacji. Zakresy inżynierskie, projektowe i konstrukcyjne stają się bardziej skomplikowane dzięki coraz bardziej złożonym aktualizacjom, co wpływa na koszty i harmonogram wdrożenia.

Krok 10. Integracja sprzętu, konstrukcji i prowizji. Budowa rozpoczyna się, gdy kierownik floty serwisowej, specjalista ds. akcji ZEV lub kierownik instalacji ds. energii otrzymają wszystkie pozwolenia i zatwierdzenia, w tym podpisany/opieczetowany pakiet rysunków i pakiet projektu instalacji. Jeśli wymagana jest nowa lub zmodernizowana usługa elektryczna, zakład energetyczny dokończy budowę infrastruktury przed podłączeniem zasilania do obiektu. Po inspekcji i uruchomieniu instalacja będzie musiała przeprowadzać regularną i zapobiegawczą konserwację sprzętu do ładowania, aby zapewnić prawidłowe działanie infrastruktury fizycznej i interfejsu użytkownika, dokładne zasilanie i bezpieczną pracę ładowarki. Instalacja będzie musiała monitorować dane dotyczące wykorzystania, cykle jazdy i stawki ładowania pojazdów, aby zrozumieć profil i wykorzystanie floty oraz dostosować operacje w celu zoptymalizowania ładowania.

Powyższe niezaprzeczalnie wskazuje na liczne wyzwania związane z zabezpieczeniem pojazdów elektrycznym koniecznej infrastruktury do ładowania. Z tego powodu, chociaż skala i konstrukcja ostatecznych rozwiązań mogą się różnić, według specjalistów amerykańskich³⁸ armia powinna współpracować z przemysłem, aby zaspokoić te potrzeby w zakresie infrastruktury dla pojazdów elektrycznych w najbardziej opłacalny sposób. Pojawiają się tutaj cztery wyzwania – obszary tematyczne wymagające rozważenia:

1) szybkie ładowanie — zarówno armia, jak i przemysł muszą znaleźć sposób na szybkie ładowanie i ładowanie wielu akumulatorów pojazdów elektrycznych jednocześnie w bezpieczny i powtarzalny sposób;

2) przenośna energia – zarówno przemysł, jak i wojsko potrzebują nowej infrastruktury dla pojazdów elektrycznych, aby wspierać import i eksport energii z innych pojazdów elektrycznych oraz systemów innych niż pojazdy elektryczne;

³⁸ *A Whitepaper from the Army Applications Laboratory, Powering an electric vehicle infrastructure for the U.S. Army Shared challenges point the way to shared solutions*, luty 2021, <https://aal.army/assets/files/pdf/whitepaper-power-transfer.pdf> (pobranie danych 23.02.2023).

3) elastyczna infrastruktura – chociaż wojsko wymaga wyższego stopnia elastyczności i przenoszalności, zarówno przemysł, jak i wojsko potrzebują zasobów infrastruktury dla pojazdów elektrycznych, które to zasoby można skalować;

4) integracja infrastruktury — zarówno przemysł, jak i armia muszą integrować infrastrukturę dla pojazdów elektrycznych w taki sposób, aby można ją było uzupełniać i aby funkcjonowała ona jako uzupełnienie dotychczasowej infrastruktury i systemów.

Maksymalne rozwiązanie w wyniku współpracy tego wspólnego zestawu problemów będzie wymagało nowego podejścia do opracowywania koncepcji dla armii oraz włączenia różnych graczy z branży. Jednocześnie dobrą wiadomością jest to, że przejście z energii bazującej na paliwach kopalnych na elektryczną stanowi szansę dla armii na kompletnie nową kooperację z nową generacją organizacji, które próbują rozwiązać te same problemy z infrastrukturą. Armia musi zatem zerwać z dotychczasowym podejściem w tej materii, opartym na wielu nieaktualnych już schematach funkcjonowania i zamiast nich tworzyć kompletnie nowe sieci współdziałania i zależności. Powyższe wymagać będzie oczywiście nowych sposobów myślenia, bieżącego funkcjonowania i poniesienia pewnego ryzyka, *de facto* niemal zawsze występującego, gdy zachodzi zmiana paradygmatu technologicznego, realnie oznaczająca rewolucję w sferze działania w oparciu o kompletnie nowe rodzaje energii. To wymusza zatem liczne działania przystosowawcze oraz wypracowanie nowych zasad i metod prowadzenia działań. Tym samym elektryfikacja może oznaczać dla sił zbrojnych relatywnie analogiczną rewolucję w schematach postępowania, jaka dokonała się przed stuleciem, gdy po setkach lat stosowania koni zaczęto je najpierw stopniowo, a potem masowo zastępować pojazdami z napędem mechanicznym – spalinowym.

Realizowane projekty w dziedzinie hybrydyzacji układów napędowych różnych rodzajów pojazdów wojskowych

Obecnie na świecie, w Stanach Zjednoczonych i w wybranych państwach Europy, są prowadzone dosyć zaawansowane prace nad hybrydyzacją układów napędowych pojazdów typowo wojskowych i używanych przez siły zbrojne zmilitaryzowanych pojazdów cywilnych.

2.1. Prace i wdrożenia w Europie

Francja

Renault Trucks Defense/Arquus

W Europie pionierem w zakresie komercjalizacji równoległych hybrydowych układów napędowych z przeznaczeniem na rynek zbrojeniowy – militarny jest francuski Renault Trucks Defense (RTD/Arquus)¹. Swoją prototypową hybrydową układ napędowy oficjalnie pokazał on w czerwcu 2016 roku na zbrojeniowych targach Eurosatory w Paryżu.

Wystawiany Electer – demonstrator własnego równoległego hybrydowego układu napędowego – stanowi wynik tzw. zaawansowanego planu projektowego (*advance design plan* – PEA – *Plan d'Etude Amont* – plan badań wyższego szczebla) dotyczącego m.in. przewidywania tego, jak może być wyposażony przyszły pojazd wojskowy. Projekt ten wyspecyfikowała i zamówiła Francuska Agencja Zamówień Obronnych (DGA), a jego realizacja odbywa się na mocy kontraktu zawartego z Renault Trucks Defense w dniu 21 grudnia 2012 roku. Powstałe rozwiązanie(-a) prototypowe zaprezentowano wstępnie przed próbami w 2014 roku. Następnie testowano je intensywnie przez dwa lata na dystansie ponad 5000 km, z czego połowę pokonano w warunkach terenowych – *off-road*. W tej fazie sprawdzania i oceniania różnych koncepcji znaczny nacisk położono na przeprowadzenie wymagających badań w warunkach zbliżonych do rzeczywistych – tzn. operowania w autentycznych warunkach klimatycznych i drogowych.

¹ Informacja prasowa Renault Trucks Defense, *VAB ELECTER at Eurosatory 2016*, Renault Trucks Defense, 8 czerwca 2016 roku.

Jak podkreśla Renault, PEA demonstruje niezawodność, wytrzymałość oraz wysokie osiągi tej koncepcji oraz jest już gotowy do wprowadzenia na rynek. W układzie eksploatacyjnym cechuje się siedmioma różnymi sprawdzonymi trybami pracy oraz może być zainstalowany (ma gotowość do instalacji) w wyrobach RTD w celu zaspokojenia wymagań zgłaszanych przez użytkowników nowoczesnego sprzętu militarnego. W efekcie firma może zaproponować ten system napędu hybrydowego, wyróżniający się ważnymi z militarnego punktu widzenia zaletami, jak:

- redukcja zużycia paliwa,
- możliwość operowania w trybie skrytym *stealth* – dla cichego przemieszczania się,
- możliwość załączenia trybu przyspieszacza – *booster* dla szybkiego przyrostu mocy w celu przyspieszenia wykonywania określonych operacji i manewrów,
- możliwość szybkiego doładowywania baterii trakcyjnych,
- pomocnicza jednostka napędowa APU w trybie pracy z akumulatorami pozwalająca na ciche oczekiwanie (tryb *stand-by*), bez potrzeby uruchamiania pokładowego generatora – jednostki zasilającej układ elektryczny,
- pomocnicza jednostka napędowa APU w trybie pracy z silnikiem spalinowym zapewniająca wysoki poziom mocy elektrycznej (*high-level electric power*),
- zastosowany silnik spalinowy – wysokoprężny Diesel do poruszania się w trybie awaryjnym (*fallback mode*).

Na początek demonstrator systemu hybrydowego trafił do transportera VAB. Niemniej, ze względu na modułowy charakter tego rozwiązania, po dokonaniu stosownych poprawek przystosowujących, może trafić do dowolnego pojazdu firmowanego przez koncern.

Poza tym w ramach programu Scorpion Nexter współpracuje z Arqus i Texelis nad kilkoma pojazdami HED (*Hybrid Electric Drive* – hybrydowy pojazd elektryczny): Griffon 6×6 i Serval 4×4 – oba są to wielozadaniowe pojazdy opancerzone. W tym kontekście francuskie siły zbrojne wykazują wyraźne zainteresowanie pojazdami HED, a Nexter uważa systemy napędowe HED za kluczowy obszar swoich badań i rozwoju. Na przykład zamierza wykorzystać tę technologię również we francusko-niemieckim projekcie Main Ground Combat System (MGCS). W ostatnich latach francuska firma Arqus – następcą RTD – opracowała zaś dwa własne pojazdy HED: transporter opancerzony Electer 6×6 (APC) i lekki pojazd opancerzony Scarabee 4×4. Scarabee został w szczególności zaprojektowany od podstaw z myślą o napędzie hybrydowym. Texelis, również z Francji, skupił się na elementach HED układu napędowego, a w 2021 roku nawiązał strategiczne partnerstwo z QinetiQ w celu opracowania elektrycznych silników piastowych – umieszczonych w piastach kół (tzw. e-oś napędowa) oraz metod odzyskiwania energii hamowania.

Texelis²

Na targach zbrojeniowych Eurosatory, które w czerwcu 2022 roku odbyły się w Paryżu, francuska firma Texelis zaproponowała wprowadzenie nowego podejścia do elektryfikacji kołowych pojazdów opancerzonych. Firma ta już bowiem posiada niemałe dotychczasowe doświadczenie w dostarczaniu komponentów układów napędowych do pojazdów szynowych, w tym tramwajów. Jej rozwiązanie łączy sprawdzone komponenty pojazdów elektrycznych, aby zapewnić znacznie szybszą drogę do elektryfikacji pojazdów wojskowych niż programy projektowania od podstaw całych takich pojazdów elektrycznych. Rozwiązania te można mianowicie wdrożyć w istniejących kołowych pojazdach wojskowych, aby zachować zaawansowaną mobilność tradycyjnych układów napędowych, przy jednoczesnym wykorzystaniu technologii umożliwiających spełnienie dwóch najpilniejszych wymagań użytkowników wojskowych: możliwości eksportu – wysyłania energii elektrycznej do ładowania systemów posiadanych przez żołnierzy, w tym także na zewnątrz, oraz przez ograniczony czas pełnej pracy elektryczny w trybie cichym.

Niezależnie od tego, czy Texelis pracuje z komponentami gotowymi, czy zbudowanymi na zamówienie, jego wiedza w zakresie mobilności pojazdów umożliwia mu integrację przekładni, skrzyń rozdzielczych, osi i wałów napędowych z najnowocześniejszymi technologiami elektronicznymi w celu wytworzenia zelektryfikowanych układów napędowych dla obecnego rynku pojazdów opancerzonych – w tym modernizację istniejących flot pojazdów kołowych. Podejście to jest możliwe dzięki dużej wiedzy inżynierskiej Texelis w zakresie projektowania architektury pojazdów dla pojazdów wojskowych używanych przez wiodące siły lądowe na całym świecie.

Przedsiębiorstwo może być stosunkowo nowym graczem w technologiach wojskowych pojazdów elektrycznych, ale dzięki swojej głębokiej wiedzy na temat układu napędowego pojazdów i kompletnych systemów mobilności, wraz z jego doświadczeniem w dostarczaniu elektrycznych osi dla rynku szynowego transportu zbiorowego, może zastosować to, co najlepsze w tej inżynierii – dotychczasowe wiedzę i kompetencje, aby tworzyć przodujące rozwiązania na dzisiejsze i przyszłe pole bitwy. Oprócz oferowania tego stopniowego, elastycznego – ewolucyjnego podejścia do istniejących pojazdów, Texelis proponuje opcję w ramach swojego zaawansowanego rozwiązania mobilnego MR400. Rozwiązanie mobilne MR400 dla wysoce strategicznych i mobilnych pojazdów chronionych – opancerzonych przez wojsko obejmuje pełny układ napędowy pojazdu, w tym oś, zespół napędowy, zawieszenie, układ kierowniczy, chłodzenie, układ wydechowy i elektryczny. To rozwiązanie mobilności Texelis zapewnia wysoką mobilność w terenie w połączeniu z możliwością transportu lotniczego, jednocześnie zachowując wysoką ładowność auta. Wywodzący się z rozwiązania zaprojektowanego dla lekkiego pojazdu 4×4 VBMR francuskiej firmy Arquus powstałego w ramach programu SCORPION

² <https://www.joint-forces.com/defence-equipment-news/54790-texelis-wheeled-armoured-vehicle-electrification>.

MR400 jest pozbawiony ryzyka rozwiązań mobilności dla klientów poszukujących ambitnej, wydajnej mobilności do integracji z wojskowymi pojazdami opancerzonymi 4×4. Niezależnie od tego, czy użytkownicy chcą zintegrować rozwiązanie mobilności MR400 z istniejącym kadłubem pojazdu, czy też wykorzystać je jako podstawę nowego projektu pojazdu, firma może zaoferować opcję włączenia hybrydowych komponentów elektrycznych na wymaganym poziomie.

Brytyjski program hybrydowych pojazdów wojskowych prowadzony na poligonie UTAC w Millbrook³

Brytyjska armia testuje innowacyjną technologię hybrydową, która mogłaby zapewnić wiele ulepszeń technicznych i operacyjnych pojazdów wojskowych, jednocześnie zmniejszając zależność od paliw kopalnych. W połowie września 2021 roku ukazała się informacja, że brytyjski Magtec wspiera program rodzimej armii, mający na celu ocenę korzyści, jakie w przyszłości hybrydowe pojazdy wojskowe mogą przynieść na polu bitwy.

Magtec to największy w Wielkiej Brytanii producent układów napędowych do pojazdów użytkowych. W swojej nowej fabryce w Rotherham zatrudnia 125 osób, w tym 10 byłych żołnierzy. Może zatem zastosować swoją wiedzę projektową i produkcyjną do pojazdów wojskowych. To nie pierwszy raz, kiedy projektuje i instaluje swoje systemy w takich pojazdach, chce zatem pokazać, że istniejąca technologia, szeroko stosowana u jego klientów komercyjnych, przy niskim ryzyku może być łatwo dopasowana do celów militarnych. Na potrzeby wojskowych eksperymentów Magtec już wcześniej zapewniał bowiem wiedzę techniczną w sferze elektrycznych układów napędowych. Dlatego dostarczył układy do elektryfikacji dla eksperymentalnych prototypów dla armii brytyjskiej: pojazdu patrolowego Foxhound, bojowego pojazdu rozpoznawczego Jackal i pojazdu wsparcia – ciężarówki MAN. Pojazdy te poddawano ocenie na poligonie UTAC w Millbrook Proving Ground w ramach projektu Army's Technology Demonstrator 6 (TD6) z udziałem partnerów tego przedsięwzięcia, w ramach programu o wartości około 9 mln GBP, prowadzonego przez Defense, Equipment & Support. Jego cel polega na identyfikacji korzyści, jakie pojazdy hybrydowe mogą wnieść do misji na polu walki – przynieść dzisiejszej misji na polu bitwy. Dzięki wstępnym pracom UTAC, Jacobs, Magtec i innych kluczowych partnerów programu przykładowe pojazdy poddawano próbom. TD6 rozpoczął się w styczniu 2020 roku i jest zarządzany przez UTAC w imieniu brytyjskiego ministerstwa obrony (MOD), przy wsparciu Jacobs, Magtec, RBSL w imie-

³ <https://www.millbrook.co.uk/news/2021/hybrid-military-vehicle-programme-led-at-utac-s-millbrook-proving-ground-on-behalf-of-the-mod/>; <https://www.army.mod.uk/news-and-events/news/2021/07/army-hybrid-vehicles-power-forward/>; <https://magtec.co.uk/magtec-powers-hybrid-military-vehicles-for-battlefield-of-the-future/>.

niu RMMV (MAN) z Magtec, Supacat i General Dynamics UK (GDUK) w imieniu NP Aerospace.

Program zawiera dwa główne nurty pracy. Pierwszym z nich jest zebranie danych na temat technologii hybrydowych z całego przemysłu w Wielkiej Brytanii. Obejmuje to badanie ścieżek rozwoju technologii pojazdów hybrydowych i elektrycznych, by poinformować Ministerstwo Obrony o przyszłym rozwoju pojazdów. W tym celu Jacobs opracowuje bazę danych istniejących brytyjskich zdolności i możliwości produkcyjnych (zakładów, zatrudnienia, profilu wytwarzania), gromadząc wiedzę i doświadczenie. Do tej pory wymagało to współpracy z przemysłem brytyjskim poprzez kwestionariusze, wywiady i wizyty. Niemniej otrzymano bardzo pozytywną odpowiedź od brytyjskiego przemysłu, z bezpośrednim zaangażowaniem około 50 podmiotów, od dostawców dla sektora obronnego po sektor sportów motorowych. Skupiono się na tym, co jest faktycznie dostępne w Wielkiej Brytanii, aby zapewnić MOD bazę danych o zdolności i możliwościach hybrydyzacji zarówno teraz, jak i być może w przyszłości.

Drugi nurt prac koncentruje się na wykazaniu potencjalnych korzyści i wad hybrydyzacji pojazdów w kontekście wojskowym. Głównym elementem jest seria testów przeprowadzonych na poligonie UTAC w Wielkiej Brytanii w celu porównania przykładowych hybrydowych pojazdów wojskowych z ich istniejącymi możliwościami. Próbką reprezentuje przekrój zastosowań i konfiguracji pojazdów wojskowych dla hybrydowych układów napędowych. Dokonuje się mianowicie coraz więcej testów pojazdów hybrydowych i elektrycznych, a brytyjskie wojsko wyraża chęć wykorzystania tych komercyjnych technologii w kontekście militarnym. Odbyło się wiele pisemnych badań armii w tej dziedzinie, ale demonstracje fizyczne były ograniczone. Testując przekrój hybrydowych pojazdów wojskowych, TD6 ma na celu dostarczenie dowodów na poparcie wcześniejszych badań, ale także uwzględnienie opinii użytkowników, zarówno pozytywnych, jak i negatywnych. Ten program testów koncentruje się na postrzeganych korzyściach i stratach oraz analizie i porównaniach, jak łatwe może być zastosowanie istniejących, dostępnych technologii komercyjnych w środowisku wojskowym.

Cała elektryfikacja przykładowych pojazdów została zaprojektowana, zintegrowana i przeprowadzona przez Magtec. Dla TD6 zaprojektował i zbudował on systemy dla – jak wcześniej wspomniano – trzech typów pojazdów: logistycznego wsparcia MAN HX60, bojowego rozpoznawczego Jackal i patrolowego Foxhound. W każdym przypadku prace prowadzono wspólnie z organami projektowymi pojazdów: RBSL w imieniu RMMV, Supacat i GDUK w imieniu NP Aerospace. Konstrukcje pojazdów wykorzystywały istniejące technologie Magtec do badania różnych konfiguracji. Pojazdy zostały zbudowane i były testowane w celu określenia wpływu hybrydyzacji na zużycie paliwa, emisje, mobilność i właściwości jezdne oraz czynniki, takie jak hałas, zgodność elektromagnetyczna i sygnatury w podczterwieni. Dzięki różnym konfiguracjom pojazdów w ramach prac zbadano potencjał szerszej adaptacji. Zespół porównał bardziej konwencjonalny układ napędowy

zastosowany w ciężarówce MAN HX SV z pojazdami Foxhound i Jackal, które mają bardziej złożone indywidualne napędy piast oraz odpowiednio konfiguracje zewnętrzne i wewnętrzne. Przeprowadzona została również analiza innych aspektów, takich jak mikrogeneracja, np. MAN SV ma potencjał do wykorzystania jako źródło zasilania dla szpitala polowego, warsztatu polowego lub kwatery głównej. Przy tym testy wytrzymałościowe wykazały przydatność istniejących systemów komercyjnych w warunkach wojskowych.

Zarazem brytyjski program dowodzi dotychczasowych postępów w demonstrowaniu skuteczności zelektryfikowanych układów napędowych w najbardziej wymagających zastosowaniach wojskowych. Te pojazdy hybrydowe oferują wiele ulepszeń technicznych i operacyjnych dla pojazdów wojskowych, jednocześnie zmniejszając zależność od paliw kopalnych. W rezultacie armia brytyjska jest wsparta w ważnym programie, wykazującym potencjał do wykształcenia znacznej liczby wysoko wykwalifikowanych inżynierów w północnej Anglii i wzmocnienia pozycji Wielkiej Brytanii w czołówce światowego sektora transportowego.

Poligon doświadczalny UTAC w Wielkiej Brytanii ma tory testowe wykorzystywane do prób pojazdów kołowych MON. Wcześniej opracowane misje bojowe zostały spożytkowane do porównania pojazdów testowych z ich istniejącymi wersjami serwisowymi. UTAC prowadzi również testy emisji, mocy i zużycia paliwa w swojej nowej komorze emisji o zmiennej temperaturze – VTEC 2. Nowy obiekt VTEC może testować osiągi pojazdów o rozstawie osi do 8 m, nacisku na oś do 20 t i symulowanym obciążeniu do 60 t. Umożliwia producentom pojazdów wojskowych symulowanie długich okresów eksploatacji w różnych typach misji. W ramach programu zaplanowano opracowanie raportu końcowego, który dostarczył poszukiwanych dowodów na korzyści i ograniczenia hybrydyzacji w środowisku wojskowym. Oprócz potencjalnego usprawnienia ruchu w ukryciu, ładowania systemów pokładowych i emisji, uznano już, że możliwości, takie jak zasilanie zewnętrzne, mają szerszy zasięg niż tylko środowisko pojazdu.

Ta skokowa zmiana zapewni, że infrastruktura elektryczna/energetyczna armii będzie gotowa do zaspokojenia w przyszłości zapotrzebowania na energię elektryczną wymaganą na polu bitwy. Korzystanie z pojazdów hybrydowych ułatwi bowiem dostarczanie energii tam, gdzie jest ona potrzebna punktowo i w danym momencie. Przeprowadzony eksperyment mający na celu modernizację armii przy użyciu obecnie dostępnej technologii komercyjnej był konieczny, gdyż wraz z odejściem silnika spalinowego nie ma innego wyboru, jak tylko przyjąć nowe technologie lub po prostu nie mieć możliwości ich wdrożenia, a dzięki współpracy ze światem komercyjnym siły zbrojne mogą poprawić swoje możliwości.

Elektryfikacja zapewni wybór, dając wojsku możliwość dostarczania energii w momencie największej potrzeby, zarówno na pokładzie danego pojazdu, jak i poza nim, w dodatku nie tylko do zastosowań wojskowych. Kwestia dotyczy przykładowo wspierania infrastruktury cywilnej dla innych departamentów rządowych i ewentualnie wspierania organizacji pozarządowych na obszarach, na których infrastruktura

dostarczająca energię została naruszona. Tym samym następna generacja pojazdów wojskowych może być również zdolna do zapewnienia zasilania awaryjnego w strefie katastrofy, zasilania szpitala polowego i poprawy zdolności wojskowych. Przykładowo jeden hybrydowy pojazd elektryczny MAN SV, który może wytworzyć ponad 500 kW mocy, będzie w stanie zastąpić dziewięć generatorów Diesla. Powyższe odpowiada przeciętnej pojemności baterii 17 391 telefonów komórkowych oraz zapotrzebowaniu na energię przez 800 elektrycznych czajników bezprzewodowych i 18 dni jednego domu jednorodzinnego. Oznacza to, że dwa i pół hybrydowego pojazdu MAN SV może zasilać szpital wojskowy lub w strefie katastrofy zapewniać zasilanie awaryjne zespołom ratunkowym. To tylko jedna z zalet testowanej innowacyjnej technologii pojazdów. Technologia pojazdów hybrydowych stosowana w samochodach użytkowych i autobusach zapewni więc, że pojazdy armii staną się nowocześniejsze i zdolne do obsługi najnowszych energochłonnych technologii. Będą oferować liczne korzyści taktyczne na polu bitwy, w tym wynikające z jazdy w trybie cichym. W trybie *stealth* pojazdy te mogą być bowiem zasilane wyłącznie energią elektryczną. Powinno to znacznie zmniejszyć ich sygnaturę termiczną i dźwiękową (zwiększone ukrycie przy zmniejszonej sygnaturze termicznej i akustycznej), umożliwiając uniknięcie wykrycia, gdy żołnierze obserwują lub atakują siły wroga. Silniki elektryczne umożliwiają również natychmiastowe szybkie przyspieszenie i większą swobodę ruchów, oferując liczne korzyści taktyczne w różnych warunkach terenowych, co może dać prawdziwą przewagę taktyczną podczas przyspieszania przed stromymi wzniesieniami i ucieczki przed wrogiem. Korzystając z energii elektrycznej z pokładowego generatora, można dostarczyć tę energię we właściwym momencie. Wykorzystując silnik spalinowy, niekoniecznie uzyskuje się mianowicie moc w ułamku sekundy, kiedy jej potrzeba. Jadąc w trybie elektrycznym, wciska się pedał gazu, a rezultat jest natychmiastowy. Oznacza to także, że da się dojechać do miejsc, do których obecnie wojsko nie jest w stanie dotrzeć, gdyż silnik wysokoprężny po prostu nie ma mocy. Taktycznie da to większą swobodę manewru, gdyż będzie można dotrzeć tam, gdzie wróg by się nie spodziewał. Poza tym żołnierze będą mogli szybko i łatwo wydostawać się z miejsc groźących otoczeniem. Zwraca się jeszcze uwagę na zdecydowaną poprawę manewrowości – zamiast brać zakręt na trzy razy, co nie zawsze okazuje się możliwe, kierowca przełączy się na tryb elektryczny, a pojazd będzie mógł skrócić na odcinku o długości odpowiadającej własnej długości tego pojazdu. Do tej pory tylko gąsienicowe pojazdy opancerzone były w stanie to zrobić. Inne zalety to możliwość dostarczania energii w miejscu, w którym jest to potrzebne do zastosowań wojskowych na polu bitwy lub infrastruktury awaryjnej w strefie katastrofy.

W związku z tym TD6 stanowi kluczową część planu armii dotyczącego elektryfikacji pola bitwy, ukierunkowanego na uzyskanie przewagi operacyjnej poprzez zastosowanie nowatorskich rozwiązań w zakresie mocy, wydajności i wsparcia przy jednoczesnym zmniejszeniu emisji dwutlenku węgla. Program dostarczy dowodów na poparcie korzyści, zarówno bezpośrednich, jak i pośrednich, jakie hybrydyzacja

części lub całej floty pojazdów może przynieść, aby informować o planie działania na rzecz bardziej wydajnej i zrównoważonej przyszłości.

Obecnie jedynym źródłem zasilania dla żołnierzy są głośne, ciężkie silniki Diesla oraz generatory, które trzeba przemieszczać po polu bitwy. Połączenie silnika spalinowego z energią elektryczną umożliwia podwojenie pojazdów jako mobilnych generatorów, co zmniejsza liczbę generatorów wymaganych do zasilania urządzeń zewnętrznych, od broni po telefony komórkowe. Oprócz wielu ulepszeń technicznych i operacyjnych, technologia hybrydowa powinna zatem zmniejszyć ogólne zużycie paliwa przez armie. Przyjęcie bardziej ekologicznych technologii stanowi część podejścia brytyjskiego MON do zmniejszenia jego wkładu w emisje dwutlenku węgla i innych gazów cieplarnianych.

Europejski Program EDA HybriDT4

Napędy hybrydowe w zastosowaniach militarnych

Ze względu na duże różnice w wymaganiach stawianych pojazdom cywilnym z napędem elektrycznym i pojazdom wojskowym cywilna technologia nie może zostać zaadaptowana w sektorze wojskowym bez daleko idących dostosowań. Przy obecnym stanie techniki w niektórych przypadkach nawet adaptacja odpowiednich systemów cywilnych nie może być zrealizowana, a tym samym częściowy lub całkowity napęd elektryczny do zastosowań wojskowych nie może być wdrażany.

Celem HybriDT jest wyprowadzenie ogólnej architektury systemu na podstawie podstawowych badań, zidentyfikowanie luk technologicznych dla wszystkich klas wojskowych pojazdów lądowych i ich domen mobilności oraz zaprojektowanie pełnowymiarowego projektu demonstracyjnego (faza 1).

Celem projektu są:

- klasyfikowanie masy pojazdów i dziedziny mobilności,
- zidentyfikowanie taktycznych i operacyjnych wymagań dotyczących mobilności dla klasyfikacji pojazdów,
- opracowanie ogólnej architektury systemu,
- wyprowadzanie wymagań technologicznych z klasyfikacji,
- identyfikowanie rozwoju komercyjnego, w tym perspektywy, dostępności i luk technologicznych dla potrzeb mobilności wojskowej,
- zalecenia dotyczące konfiguracji dla kontynuacji projektu.

Pożądaný stan końcowy HybriDT zostanie osiągnięty i zorganizowany w dwóch fazach pracy. Ten projekt obejmuje tylko fazę 1, poniżej oznaczoną jako „projekt”, w której zostanie opracowany zarys pełnowymiarowego projektu demonstracyjnego (faza 2).

⁴ <https://eda.europa.eu/docs/default-source/posters/11---hybrid-drive-trains-for-military-purpose-hybridt.pdf>.

Wszystkie rezultaty projektu zostały przedstawione i są wykorzystywane do przygotowania drugiego etapu. Celem pracy była identyfikacja i obszar zastosowania elektrycznych elementów magazynowania, konwersji i napędu dla określonej gamy pojazdów wojskowych. Ponadto podjęto próbę pokazania, które klasy pojazdów mogą być wyposażone w elementy napędu elektrycznego. Badanie miało również na celu opisanie standardowych wymagań dla każdego podstawowego zespołu (pół)elektrycznego układu napędowego, aby można było dostosować powstałą architekturę pojazdu do postępu w stanie techniki. Istniejące i zidentyfikowane luki można opisać w różnych kategoriach: kwestie masy i objętości, żywotność, bezpieczeństwo i możliwości produkcyjne. Kategorie luk zostały sprawdzone dla każdego elementu architektury (np. silnik spalinowy, maszyna elektryczna z falownikami, akumulator). Na koniec członkowie zespołu ds. pakietu roboczego zidentyfikowali możliwe rozwiązania w celu wypełnienia luki.

Projekt HybriDT II (faza 2) został uruchomiony na początku 2022 roku. Jego cel polega na zaprojektowaniu pełnowymiarowych kołowych i gąsienicowych demonstratorów o przeznaczeniu wojskowym z hybrydowymi układami napędowymi oraz weryfikacji wyników symulacji, pozwalających na taktyczne i logistyczne testowanie nowych technologii w oparciu o wyniki HybriDT I. Głównym przedmiotem zainteresowania projektu będą pojazdy kołowe, a rozważane będą BWP w układach napędowych 8×8 i 6×6. W pierwszym etapie badań będą również brane pod uwagę pojazdy gąsienicowe. Decyzje dotyczące określonych kategorii pojazdów poza kategoriami analizowanymi w HybriDT I, po dalszej analizie w symulowanym środowisku, powinny się opierać na najpilniejszych przyszłych wymaganiach uczestniczących państw członkowskich. Podejście symulacyjne będzie elastyczne i będzie można je dostosować do flot pojazdów. Partnerzy projektu przeprowadzą dodatkowe szczegółowe symulacje na poziomie krajowym zgodnie z wymogami krajowymi i danymi wejściowymi odpowiednich dostawców komponentów. W rezultacie kody źródłowe każdego symulowanego komponentu powinny zostać dostarczone członkom konsorcjum, umożliwiając korzystanie z różnych platform symulacyjnych i wspierając optymalizację wybranych komponentów. W ramach projektu ostatecznie zostanie zidentyfikowana najlepsza modułowa i skalowalna technologia architektury hybrydowej do celów wojskowych, zapewniająca znaczną oszczędność masy, zajmowanej przestrzeni, redukcję promieniowania termicznego i redukcję zużycia paliwa. Zbadany też zostanie potencjał, jaki można uzyskać z komercyjnych komponentów z półki (COTS). Optymalny poziom mocy elektrycznej zostanie ustalony na podstawie potrzeby zastosowania w różnych kategoriach pojazdów i będzie się mieścić w przedziale około 500 kW. W trzeciej fazie (HybriDT III), która jeszcze nie została zdefiniowana i przygotowana, jeden lub więcej demonstratorów zostanie opracowanych i przetestowanych zgodnie z wynikami uzyskanymi w HybriDT II.

W ramach tego programu wyróżniono następujące podprogramy:

- OSRA TBB 55 – Paliwa alternatywne i układy napędowe.

- OSRA TBB 57 – Technologie zwiększające wydajność silnika i układu dystrybucji mocy.
- OSRA TBB 58 – Technologie zarządzania energią: innowacyjne i wydajne systemy.
- OSRA TBB 74 – Architektura i integracja systemów lądowych.
- OSRA TBB 75 – Wytwarzanie, magazynowanie i zarządzanie energią dla systemów lądowych.
- OSRA TBB 82 – Mobilność i kontrmobilność.

Włączone w ten projekt kraje to: Austria, Finlandia, Francja, Niemcy, Włochy, Holandia, Słowenia i Szwecja, a firmy i instytuty badawcze: Rheinmetall Defense, AVL, TNO, IVECO Defense Vehicles, Arquus, KNDS – KMW+NExter, Patria, BAE Systems, Jenoptik, Fraunhofer i Uniwersytet w Lublanie.

Perspektywa dla Niemiec⁵

W ostatnich dziesięcioleciach niemieckie firmy wyznaczyły światowe standardy w zakresie konwencjonalnej technologii napędowej dla czołgów i innych pojazdów wojskowych, a technologia ta jest nadal z powodzeniem stosowana na skalę światową. Jednak w przypadku napędów HED pionierską rolę techniczną odgrywają podmioty z innych krajów, podczas gdy stosunkowo niewiele wiadomo o działalności przedsiębiorstw niemieckich. Wyjątkiem są np. badania koncepcyjne przeprowadzone przez Rheinmetall, firmy Magnet-Motor (Grupa RENK) i Vincorion (Grupa Jenoptik).

Czechy – Tatra⁶

Tatra pracuje nad koncepcją kompletnie nowych, ekologicznych i proekologicznych układów napędowych, co wiąże się z ich hybrydyzacją – układy spalinowo-elektryczne, pełną elektryfikacją oraz gazyfikacją-elektryfikacją – wprowadzaniem wodoru, ogniwi paliwowych i systemu napędu elektrycznego. Działania te są prowadzone ze względu na politykę klimatyczną Unii Europejskiej, zgodnie z którą na terenie tego ugrupowania od roku 2040 czy nawet 2035 w ogóle będzie zakazana sprzedaż samochodów z klasycznym silnikiem spalinowym jako zasadniczym źródłem napędu. I chociaż jakieś wyjątki mogą istnieć w stosunku do użytkowników specyficznych, takich jak siły zbrojne, to przedsiębiorstwo już dzisiaj musi rozpatrywać różne opcje, by być lepiej przygotowanym na wyzwania przyszłości.

W tej materii, uwzględniając też poszczególne grupy odbiorców, prace są prowadzone trójtorowo. Niemniej we wszystkich tych trzech przypadkach Tatra wystąpi jako dostawca samego podwozia i ewentualnie kabiny typu wojskowego, a kompletne alternatywne systemy napędu będą pochodziły od partnerów zewnętrznych.

⁵ M. Krause, wyd. cyt.

⁶ Informacje przekazane na seminarium w dniu 20 października 2021 roku, Koprzywnica.

Jak mnie bowiem zapewniono, na dzisiaj Tatra nie ma wystarczających zasobów ludzkich i kapitałowych, by je przygotować we własnym zakresie, z kolei na rynku są wyspecjalizowane firmy proponujące stosowne systemy. Ponieważ, tak jak Tatra, są one niezależne od kluczowych graczy – OEM, strony mogą zachować tu dużą samodzielność zarówno co do doboru kooperanta, jak i ostatecznego układu skompletowanego na potrzeby konkretnego odbiorcy.

W przypadku rynku czysto cywilnego w obecnej koncepcji przyszłościowej myśli się o wdrożeniu systemu gazowego – wodorowo-elektrycznego z ogniwem paliwowym. Zbiorniki gazu znajdowałyby się między osiami, baterie za kabiną, a silnik pod kabiną. Na wstępnej grafice pokazano kabinę typu wojskowego. Obecnie Tatra prowadzi rozmowy aż z kilkunastoma dostawcami takich systemów – finalnie ma być ich zaledwie kilku – dwóch-trzech. Trudno także teraz na ten temat podawać więcej informacji, gdyż i tak do komercjalizacji dojdzie nie szybciej niż za 6-8 lat. A w tym okresie jeszcze wiele może się zmienić – z całą pewnością technologie te staną się bardziej dojrzałe i wydajne, efektywnie eksploatacyjnie oraz relatywnie tańsze.

Dla straży pożarnej przewiduje się układ w pełni elektryczny ze spalinowym tzw. zwiększaczem zasięgu – range-extenderem. Co ciekawe, Tatra nawiązała w tym zakresie kooperację ze znanym austriackim koncernem wytwarzającym sprzęt i pojazdy pożarnicze – Rosenbauerem. To od niego ma pochodzić kompletny układ napędu. Niemniej nie jest to analogiczny układ jak ten od Volvo Penta, z którym z kolei porozumiał się sam Rosenbauer w sprawie dostaw w pełni elektrycznych systemów napędu do miejskich samochodów ratowniczo-gaśniczych RT (*Revolutionary Technology*). Ma to być własne rozwiązanie Austriaków. Rosenbauer miał nad nim pracować już od 2013 roku. Działania te chwilowo wstrzymano, by potem do nich powrócić. Zwiększacz zasięgu w postaci dodanego do układu w pełni elektrycznego silnika spalinowego ma za zadanie:

- zwiększanie zasięgu użytkowania pojazdu, gdy zasięg jazdy w trybie w pełni elektrycznym okazuje się za mały,
- wsparcie w sytuacji prowadzenia długotrwałej akcji, kiedy silnik spalinowy działa jako wspomagające źródło energii do zasilania przykładowo osprzętu/wyposażenia pokładowego.

W związku z tym takie systemy mogą również zainteresować siły zbrojne. Jako opcję zastosowania takich wariantów pojazdów wskazano przykładowo nośniki aparatury elektronicznej, radarów czy systemów uzbrojenia, jak przeciwlotnicze rakiety-towo-lufowe.

Natomiast do wykorzystania przez same siły zbrojne przewidziano układ hybrydowy – równoległy spalinowo-elektryczny, z silnikiem spalinowym, silnikiem elektrycznym, zintegrowaną elektroniczną jednostką kontrolną oraz modułem przechowywania energii – modułem baterii. Układ ten ma pozwolić na:

- pewne ograniczenie zużycia paliwa dzięki spożytkowaniu funkcji rekuperacji – w zależności od topografii pokonywanego odcinka oraz liczby operacji start-stop ta redukcja może realnie wynosić 5-15%;

- możliwość poruszania się w trybie cichym przy wykorzystaniu jedynie napędu w pełni elektrycznego – bez pracy silnika spalinowego. Taka jazda okazuje się szczególnie przydatna podczas operowania blisko linii wroga, by z jednej strony zredukować sygnaturę termalną samochodu, z drugiej pozwolić mu na bardziej skryte poruszanie się. Tę zaletę w pierwszym rzędzie mogą m.in. wykorzystać jednostki zwiadu. Jak zarazem podaje Tatra, w takim elektrycznym trybie cichym pojazd wojskowy nie musi pokonywać więcej niż 15-20 km. Dlatego tak będą dobierane akumulatory. Wiele tu mianowicie zależy właśnie od ich wyboru, a dokładnie od pojemności. Niemniej im więcej jest akumulatorów, tym bardziej rosną masa i cena pojazdu.

Jednocześnie w rozmowie ze mną w październiku 2021 roku przedstawiciele firmy nie ukrywali, że istnieje bardzo małe realne zainteresowanie ze strony europejskich sił zbrojnych ekologicznymi technologiami hybrydyzacji i pełnej elektryfikacji układu napędowego. W związku z tym konieczne prace analityczno-badawcze są aktualnie prowadzone nie w ramach danych projektów, a bardziej jako własne programy, aby jak się już bardziej skonkretyzowane zainteresowanie ze strony armii pojawi, w dość krótkim okresie być w stanie zaproponować rozwiązania nadające się do szybkiej oraz sensownej ekonomicznie i użytkowo komercjalizacji.

W sierpniu 2023 roku⁷ Tatra uszczegółowiła i przekazała najnowsze informacje na temat elektryfikacji układów napędowych wojskowych ciężarówek. Poinformowano wówczas, że firma pracuje nad kilkoma premierowymi wariantami wojskowymi opartymi na serii T815-7 Force. Pierwszy z nich – 4-osiowy w układzie napędowym 8×8 – ma otrzymać napęd hybrydowy – spalinowo-elektryczny. Układ ten będzie się składał z bazowego silnika Tatry – własnego – 8-cylindrowego, widlastego, 12,667-litrowego, chłodzonego powietrzem, w wykonaniu Euro 3 w nastawie o maksymalnej mocy – 300 kW/408 KM i momencie obrotowym 2100 Nm, poprzez sprzęgło połączonego z silnikiem elektrycznym o mocy także 300 kW. Ponieważ będzie to układ równoległy, możliwa będzie jazda w oparciu wyłącznie o jednostkę spalinową, wyłącznie elektryczną bądź obie jednocześnie. Tryb pracy obu będzie uruchamiany automatycznie, w sytuacji większego zapotrzebowania na siłę napędową, co zazwyczaj zachodzi przy przyspieszaniu (gwałtownym), podejździe na wzniesienie oraz ruszaniu, szczególnie gdy pojazd przewozi wówczas dosyć ciężki ładunek. Będzie to zatem tzw. elektryczny napęd wspomagający. W pierwszym rzędzie sprawdzi się on w takim razie w ciężkich transporterach logistycznych, ciężkich ciągnikach siodłowo-balastowych oraz odmianach warsztatowo-ewakuacyjnych i ratowniczo-ewakuacyjnych (ratownictwa technicznego i ewakuacji). Natomiast tryb w pełni elektryczny to tryb tzw. cichy – jest on bezemisyjny, samochód porusza się wówczas wyłącznie w oparciu o silnik elektryczny, przy zredukowanej

⁷ J. Brach, *Nowe układy napędowe wojskowych Tatr*, <https://transport40.com/nowe-uklady-napedowe-wojskowych-tatr/>; J. Brach, *Nowe układy napędowe wojskowych pojazdów Tatry*, <https://zbiam.pl/nowe-uklady-napedowe-wojskowych-pojazdow-tatra/>.

sygnaturze termalnej. Połączenie cichobieżności i niskiej emisji ciepła okazuje się wyjątkowo wskazane w sytuacji operowania blisko linii frontu/wroga. Jak twierdzą sami Czesi, analiza wojny na Ukrainie dowodzi, że taki tryb jazdy bywa wskazany nie tylko, tradycyjnie, w odniesieniu do lżejszych aut zwiadowczych, ale także w przypadku ciężarówek klasy tonażowej ciężkiej – tzw. ciężkich transporterów logistycznych oraz nośników różnorodnych systemów uzbrojenia, łączności i radarowych. Do tego dochodzą specjalnie zmodyfikowane podwozia kołowych transporterów takich jak 3-osiowy Titus, powstały w ramach współpracy z francuskim koncernem zbrojeniowym Nexter. Pojemność pokładowego systemu akumulatorów wynosi 70 kWh, co – w zależności od warunków drogowych i masy pojazdu/zestawu – powinno wystarczyć na pokonanie w trybie cichym od 15 do 25 km. Ładowanie tych akumulatorów odbywa się w trybie rekuperacyjnym, podczas hamowania.

Pierwszy prototypowy egzemplarz hybrydowego wykonania typu T815-7 Force ma być ujawniony w pierwszym kwartale 2024 roku.

Finlandia – potencjalne wdrożenie

Hybrydowy Sisu Polar jako HET – transporter ciężkiej techniki bojowej

W przewozach ponadgabarytowych, takich jak HET (uterenowane transportery ciężkiej techniki bojowej) w roli ciężkich ciągników siodłowo-balastowych mogą się sprawdzić 3- czy 4-osiowe modele Sisu z napędem hybrydowym – spalinowo-elektrycznym. W układzie konstrukcyjnym bazowałyby one na wydaniu leśnym, przygotowanym przez tę firmę⁸. Po części eksperymentalny, po części prototypowy egzemplarz hybrydowej wersji Hybrid przedstawiło Sisu Auto podczas targów Kuljetus 2017 odbywających się od 18 do 20 maja 2017 roku w rodzimej miejscowości Jyväskylä. Ekspozowany tam pojazd był pierwszym w historii tego podmiotu typem spalinowo-elektrycznym. W sierpniu 2018 roku hybrydowe Sisu w wariacie przeznaczonym do obsługi sektora leśnego najpierw – w dniach 10-11 sierpnia – zaprezentowano na najważniejszej lokalnej imprezie targowej i wystawie samochodowej Power Truck Show, Kauhavan Alähärmä, potem – pod koniec sierpnia – był dostępny na pokazie FinnMETKO w Sisun osasto.

Na tym etapie w sferze komercjalizacji takich aut przedsiębiorstwo przechodziło z fazy projektowo-testowej do wdrożeniowej. Dostawy pierwszych sztuk z hybrydowym równoległym systemem napędowym rozpoczęły się bowiem już wiosną 2017 roku. Jak wtedy oczekiwano, popyt na takie odmiany w pierwszym rządzie miał pochodzić z sektorów budowlanego, kopalnictwa – kopalń odkrywkowych oraz leśnego – do wywozu dłużycy z lasu. Nie dało się także wykluczyć większego zainteresowania ze strony podmiotów przemieszczających ładunki ponadgabarytowe.

⁸ <https://sisuauto.com/sisu-auton-strategiset-tavoitteet-vientitoiminnassa/>; <https://sisuauto.com/en/sisu-polar-hybrid-deliveries-commence/>; <https://sisuauto.com/sisu-polar-hybrid-mallisto-vie-kuorma-autojen-huipputehot-uuteen-luokkaan/>.

W układzie czysto użytkowym w porównaniu z tradycyjnymi odpowiednikami typy hybrydowe mają być bardziej efektywne, ekonomiczne oraz przyjazne dla środowiska naturalnego. Zastosowany przez Sisu równoległy hybrydowy system napędowy dostarcza łącznie aż 900 KM kombinowanej mocy maksymalnej oraz 3600 Nm kombinowanego maksymalnego momentu obrotowego. Hybrydowy zespół napędowy pierwszej generacji Sisu Polar Hybrid wraz z silnikiem wysokoprężnym rozwija moc maksymalną ponad 600 kW/900 KM – z silnika Mercedesa o pojemności 15,6 l pochodzi 625 KM i 3000 Nm przy 1100 obr./min, z silnika elektrycznego Danfoss – 250 kW. Co jeszcze ważniejsze, począwszy od prędkości obrotowej biegu jałowego jednostki spalinowej, jest dostępny moment obrotowy o wartości przeszło 3000 Nm, z kolei maksymalny moment obrotowy 3600 Nm pozostaje do dyspozycji w niezwykle szerokim zakresie prędkości obrotowych – od 1000 do 1800 obr./min. Tak niespotykany wysoki moment obrotowy w takim zakresie prędkości obrotowych oraz niebagatelna sumaryczna moc maksymalna wytwarzana przez równoległy układ hybrydowy zdecydowanie zwiększają użyteczność samochodu. Za przeniesienie napędu odpowiada mechaniczna skrzynia przekładniowa Eaton Fuller RTLO22918B o rozpiętości przełożeń 14.4-0.73. Magazynowanie energii elektrycznej, odzyskiwanej m.in. w procesie rekuperacji w trakcie hamowania i przechowywanej w module baterii o łącznej pojemności 1 kWh, pozwala na jej wykorzystywanie przy przyspieszaniu i pokonywaniu podjazdów. Jest to zatem tzw. hybryda lekka – wspomagająca, bez opcji samodzielnej jazdy w trybie w pełni elektrycznym. Niemniej cecha ta znacznie poprawia dynamikę i bezpieczeństwo jazdy oraz ekonomikę paliwową niezwykle ciężkiego, nierzadko ponad 80- czy nawet 100-tonowego zestawu drogowego, przyczyniając się do jednoczesnej redukcji emisji dwutlenku węgla generowanej przez auto.

W układzie konstrukcyjnym Sisu Hybrid, oprócz dwóch zasadniczych źródeł napędu w postaci silnika spalinowego – wysokoprężnego oraz silnika elektrycznego, połączonych z niesynchronizowaną skrzynią przekładniową Eaton Fuller, zawiera jeszcze specjalny tandemowy most Sisu z tzw. rozwiązaniem teleskopowym. Sprzęgło jest natomiast zlokalizowane pomiędzy tymi silnikami, umożliwiając kierowcy ruszanie jedynie za pomocą jednostki elektrycznej, bez konieczności załączania w tym celu jakichkolwiek przełączników. Poza tym elektryczność pozwala na wprowadzenie licznych nowych sposobów kontroli oraz nadzoru nad układem napędowym. Dzięki temu w przyszłości da się wdrożyć wiele innych funkcji, ponieważ system przez cały czas ewoluuje. Taki rozwój przebiegający nieustannie powoduje, że następne opcje mogą uzupełniać i usprawniać działanie tych obecnie dostępnych bądź otwierać absolutnie nowe pola do uzyskania postępu w przyszłości.

Czyni to tak skompletowane konfiguracje najsilniejszymi aktualnie (stan na rok 2023) dostępnymi na rynku pod względem mocy maksymalnej seryjnymi (małoseryjnymi) kołowymi środkami transportu towarowego. Dodatkowe moc i moment są generowane przez dodany układ elektryczny. Powyższe oznacza, że nie powstają kosztem wzrostu zużycia paliwa, ale – wręcz odwrotnie – wydawnie przyczyniają się

do redukcji tego zużycia. Według wstępnych pomiarów Sisu system może obniżyć konsumpcję oleju napędowego i tym samym emisję CO₂ nawet o 10%.

Od reszty przedstawicieli linii Polar typ Polar Hybrid odróżnia się panelem sterującym układu hybrydowego Sisu PowerControl w kabinie oraz oddzielnym przełącznikiem PowerTouch, ergonomicznie wbudowanym w dźwignię zmiany biegów. Ponadto superkondensatory używane do magazynowania energii są umieszczone centralnie za kabiną. Dzięki temu nie zajmują przestrzeni ładunkowej i nie utrudniają montażu czy umieszczania innych elementów.

Przy tym zastosowany system hybrydowy pozwala na bardzo precyzyjne ruszanie oraz manewrowanie i jazdę z małą prędkością, w tym na wzniesieniach. System ten obejmuje również tzw. inteligentną funkcję uruchamiania, umożliwiającą rozruch silnika wysokoprężnego za pomocą silnika elektrycznego, gdy tylko w akumulatorach zgromadzono wystarczającą ilość energii.

Głównym powodem stojącym za przygotowaniem hybrydowego Sisu Polar jest, jak wspomniano, dążenie do ograniczenia kosztów eksploatacji auta, w tym wskutek zmniejszenia zużycia paliwa, oraz emisji substancji szkodliwych. Jednocześnie wyraźnej poprawie ulega użyteczność samochodu w niezwykle trudnych warunkach operowania. Przykładowo system hybrydowy powoduje, że zdecydowanie wyższy moment obrotowy staje się dostępny w niższym zakresie prędkości obrotowych. Do tego znacznemu podwyższeniu ulegają wartości dostępnych mocy i momentu obrotowego w porównaniu z wartościami uzyskiwanymi przy standardowych – klasycznych systemach napędowych. Kiedy pojawi się takie zapotrzebowanie, hybrydowy zespół napędowy może dostarczyć aż ponad 5000 Nm maksymalnego momentu obrotowego i przeszło 850 kW/1140 KM mocy maksymalnej! Okazuje się to wyjątkowo przydatne przy pokonywaniu stromych podjazdów czy ruszaniu i przyspieszaniu z ładunkiem o znacznej masie.

Generalnie odmiany hybrydowe mają szansę znaleźć powszechne zastosowanie w obsłudze ruchu towarowego, od dystrybucji poprzez przewozy szosowe na różnych dystansach, skończywszy na ciężkich pracach. Dla sił zbrojnych ciekawa może być tu opcja transportera klasy HET (Heavy Equipment Transporter – transporter ciężkiego sprzętu – ciężki ciągnik balastowy/siodłowo-balastowy do przerzutu wielotonowych ładunków). Transportery te aktualnie otrzymują bardzo mocne silniki, o mocy maksymalnej ponad 500 KM i maksymalnym momencie obrotowym przeszło 2500 Nm. Sisu Polar ma już bazowo taką silną tradycyjną jednostkę napędową, dodatkowo uzupełnioną o wspomagający napęd elektryczny. W rezultacie pod względem dynamiki zestaw taki nie miałby żadnych odpowiedników. Oczywiście można snuć także teoretyczne plany konfiguracji odmian takiego megamocnego HET. Zdaniem autora możliwe są tu trzy opcje:

- bezpośrednio powstała na bazie podwozia 4-osioowego w układzie napędowym 8×4, z tylnymi osiami w układzie tandem bądź tridem. Ciągnik taki miałby zatem dalej układ napędowy 8×4, ale w tradycyjnym układzie osi 2+2 lub tridemowym 1+3, oraz z tyłu bliźniacze ogumienie na napędowym tandemie i cechowałby się jedynie średnią mobilnością terenową;

- 4-osiowy ciągnik siodłowy – siodłowo-balastowy – z hybrydowym systemem napędowym, ale z napędem na wszystkie osie – układ 8×8. Przy czym nadal na tylnym napędowym tandemie zachowano by ogumienie bliźniacze. W rezultacie ciągnik cechowałby się jedynie podwyższoną dzielnością terenową;
- 4-osiowy ciągnik siodłowy – siodłowo-balastowy – z hybrydowym systemem napędowym i w układzie napędowym 8×8, lecz z pojedynczym ogumieniem na osiach tylnego napędowego tandemu, co skutkowałoby podwyższeniem jego mobilności taktycznej – dzielności terenowej – ze średniej do wysokiej.

Jednocześnie dopuszczalna masa całkowita zestawów formowanych przez wszystkie te trzy rodzaje ciągników bez problemu mogłaby przekroczyć 120 000-125 000 kg.

Niemniej należy tu jeszcze raz jednoznacznie podkreślić, że są to tylko dywagacje. Na tę chwilę takie hybrydy istnieją jedynie w formie podwozi leśnych z dwiema osiami napędzanymi. Inną kwestią pozostaje, że żadne siły zbrojne nie zgłosiły się do Sisu w celu przygotowania takiego ultramocnego wariantu. Poza tym mogą się pojawić problemy z opracowaniem wersji z napędem na wszystkie koła. W tym przypadku już przenoszenie go na sam tył zaczęło nastrożać pewnych trudności. Gdy trzeba będzie dodatkowo napędzać przód, pojawią się nowe wyzwania związane z komplectacją napędu – znalezieniem chociażby odpowiednich kierowanych mostów przednich (Sisu? Kessler?) oraz skrzyni rozdzielczej zdolnej do przenoszenia tak wysokiego momentu obrotowego. Dlatego, jeśli już taki hybrydowy HET się pojawi, zapewne będzie się on opierał na nośniku z napędzanymi jedynie tylnymi osiami.

Prace teoretyczne specjalistów rumuńskich⁹

W 2021 roku zaprezentowali oni modernizację rodzimego – rumuńskiego czołgu TR-85M1. Jest to pojazd o masie całkowitej 50 t, napędzany silnikiem wysokoprężnym o mocy 860 KM/640 kW, z hydrodynamicznym przeniesieniem napędu. Osiąga prędkość maksymalną 60 km/h. W ramach przedstawionego projektu modernizacyjnego wskazano na możliwość przekształcenia tego czołgu w opancerzony hybrydowy pojazd bojowy. Zaproponowano moduł zasilający, składający się z generatora napędzanego turbiną gazową oraz silnika turbodiesel – zespołu energetycznego zawierającego silnik spalinowy i turbinę gazową oraz przekładnię elektryczną z generatorem prądu przemiennego, dwa silniki trakcyjne i elektroniczny moduł zasilający. Wybrana turbina gazowa to wolnoobrotowy silnik turbowałowy – turbinowy TURBOMECA TURMO IIIC4, model do zastosowań wojskowych. Cechują go: długość 2184 mm, wysokość 719 mm, szerokość 637 mm, znamionowa moc na wale – pośrednie dzia-

⁹ C.O. Ilie, L. Barothi, M. Marinescu, I.T. Giurgiu, *Aspects of electric transmission implementation on a battle tank*, AITS 2021 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1220 (2022) 012017 IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/1220/1/012017, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1220/1/012017/pdf>.

łanie awaryjne (nieograniczone) – 1100 kW/33 350 obr./min, znamionowa moc na wale – maksymalna (2½ min) 1160 kW/33 800 obr./min, znamionowa moc na wale – start (5 min) 1115 kW/33 450 obr./min, moc znamionowa na wale – maksymalna ciągła 960 kW/32 500 obr./min. Do tego doszedł wysokoprężny silnik turbodoładowany, sterowany elektronicznie o mocy 150 kW/200 KM. Jednocześnie przeprowadzono symulację osiągow dynamicznych czołgu TR85M1 wyposażonego w ten zespół napędowy. Na tej podstawie wysnuto następujące wnioski:

- uzyskano podwojenie mocy układu napędowego, co prowadzi do zwiększenia mobilności i przeżywalności czołgu na polu walki,
- dzięki umieszczeniu silników trakcyjnych z przodu uzyskuje się poprawę ochrony w przypadku czołowego uderzenia pocisków przeciwpancernych oraz poprawę osiągow dynamicznych,
- technologie przesyłu prądu przemiennego dają możliwość uzyskania wygodnej kombinacji maksymalnych zalet różnych silników,
- technologie przesyłu prądu przemiennego mogłyby stanowić bardzo atrakcyjną alternatywę przy budowie czołgu o wysokich osiągowach,
- wyniki tych badań mogą stanowić podstawę do przyszłego rozwoju przekładni elektrycznych TR-85M1 i innych pojazdów opancerzonych.

Z drugiej strony elektryfikacja rodzi szereg trudności i wyzwań, takich jak zaprojektowanie:

- algorytmów sterowania, które należy zaimplementować w elektronicznym obwodzie zasilania, by zoptymalizować pracę układu napędowego, co jest pracochłonnym i kosztownym zadaniem,
- efektywnego systemu wentylacji przedziału dla modułu energetycznego – elektrycznego.

BAE Systems¹⁰

Podczas gdy na rynku komercyjnym zasadniczy nacisk jest kładziony na wszystkie pojazdy elektryczne, wojsko inaczej ocenia wykonalność wybranych pojazdów elektrycznych i ogólnie napędowych alternatyw. Według badań opublikowanych przez brytyjską Narodową Akademię Nauk, Inżynierii i Medycyny, wszystkie w pełni elektryczne pojazdy bojowe i pojazdy zaopatrzenia taktycznego „nie są praktyczne dla większości pojazdów bojowych ani teraz, ani w dającej się przewidzieć przyszłości”. Zamiast tego wojsko musi się skupić na hybrydowym napędzie elektrycznym – HED, co jest bardziej właściwym celem odpowiednim dla wielodomenowego środowiska operacyjnego.

Pojazdy HED są napędzane silnikiem spalinowym, silnikiem elektrycznym i systemem magazynowania energii, takim jak akumulatory. Pojazdy te są ładowane poprzez hamowanie regeneracyjne – rekuperacyjne i silnik spalinowy połączony z generatorem. Nie ma potrzeby posiadania rozbudowanej infrastruktury i plano-

¹⁰ <https://www.baesystems.com/en-us/feature/hybrid-electric-drive-for-the-military-of-tomorrow>.

wania wymaganego do wspierania możliwości ładowania na polu bitwy – pojazdy HED ładują się poprzez użytkowanie i istniejącą infrastrukturę dostarczania paliwa. HED oferuje atrakcyjną propozycję wartości dla dalszej elektryfikacji pojazdów bojowych i taktycznych oraz tworzy architekturę, do której da się podłączać i wprowadzać nowe technologie, takie jak wodór i pełne systemy elektryczne, gdy technologie te będą gotowe do użycia bojowego. Pozwala także na większą oszczędność paliwa i tym samym uzyskiwanie większego zasięgu, w połączeniu z wyższą elastycznością kompletowania, która może zmienić konstrukcję pojazdu historycznego. Do tego dochodzą niższe koszty cyklu życia, lepsza mobilność i wiele innych zalet w porównaniu z konwencjonalnymi układami napędowymi.

W takim układzie integracja HED z pojazdami bojowymi to naprawdę przełomowa technologia. HED nie tylko wspiera trwałe priorytety ochrony sił zbrojnych i przeżywalności, ale też zapewnia energię elektryczną w celu zwiększenia zdolności bojowych, mobilności oraz możliwości C4SIR (Command, Control, Communication, Computers, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance – dowodzenie, kontrola, łączność, komputery, wywiad, obserwacja i rekonesans). W szczególności BAE Systems wykorzystuje istniejące wozy bojowe Bradley jako poligon doświadczalny do integracji technologii HED w ramach programu rozwoju architektury zasilania i energii pojazdów bojowych oraz możliwości zwiększania mobilności. Prace te są wykonywane na podstawie prototypowej umowy z Biurem Zdolności Szybkich i Technologii Krytycznych Armii Stanów Zjednoczonych na bazie wysiłków tej armii zmierzających do zwiększenia wydajności pojazdów i wzrostu wytwarzania energii w celu wsparcia integracji przyszłych technologii i większej mobilności pojazdów bojowych na polu bitwy. Architektura HED oferuje liczne możliwości wojskowe i korzyści operacyjne, a najlepszą częścią jest jej dojrzała technologia, dostępna już dzisiaj – ta technologia jest gotowa od zaraz, skalowalna, elastyczna i zaspokaja potrzeby wojska. Ze swojej strony BAE Systems oferuje ponad 40 lat inwestycji i współpracy branżowej w rozwijaniu technologii HED, opracowywaniu architektury pojazdów dla tysięcy autobusów oraz opracowywaniu wojskowych demonstratorów wspierających tę technologię.

Poza tym Rheinmetall BAE Systems Land (RBSL) opracowuje koncepcję wymiany układu napędowego wysokoprężnego czołgu podstawowego Challenger 2 (MBT) na system HED o mocy 1000 kW. Podobno udało się zredukować masę układu napędowego o 25% i jego objętość o 15%.

W Szwajcarii zaś firma General Dynamics European Land Systems – Mowag (GDELS – Mowag) buduje i testuje hybrydowy układ napędowy dla pojazdu patrolowego EAGLE 4×4. Nieco bardziej egzotyczny jest szwedzki Splitterskyddad Enhetsplattform Program (SEP), w ramach którego firma BAE Systems Hägglunds na początku XXI wieku dokonała hybrydyzacji kołowych i gąsienicowych pojazdów opancerzonych jako platformy testowej, aby uczynić je mniejszymi i lżejszymi do transportu lotniczego.

2.2. Prace nad pojazdami zelektryfikowanymi – hybrydowymi prowadzone w Stanach Zjednoczonych¹¹

To nowy rodzaj technologii, lecz wraz ze wzrostem zapotrzebowania na elektryczne i hybrydowe auta osobowe w całych Stanach Zjednoczonych armia amerykańska jest coraz bliżej przyjęcia tej samej technologii napędowej w transporterach opancerzonych. Producenci pojazdów wojskowych dokonują znacznych inwestycji w tę technologię. Dla wojska pojazdy hybrydowe i elektryczne to nie tylko ratowanie planety, ale przede wszystkim życia żołnierzy. Działają one ciszej i emitują mniej ciepła niż te napędzane silnikiem spalinowym, co pomaga ukryć je przed czujnikami na satelitach, samolotach i pociskach. Mają naprawdę niską sygnaturę IR. Całkowicie elektryczne pojazdy czy hybrydowe w trakcie jazdy w trybie w pełni elektrycznym nie mają gorącego silnika, gorącej rury wydechowej i gorącej pokrywy jednostki napędowej, które zwykle dają kontrast, będący dobrym celem dla wroga.

Niemniej podczas gdy armia wydaje się mniej zainteresowana w pełni elektrycznymi pojazdami wojskowymi, hybrydowe transportery piechoty zasilane olejem napędowym i akumulatorami mogą się znaleźć na polu bitwy w ciągu następnej dekady. Według przedstawicieli armii wszystkie pięć firm ubiegających się o zastąpienie 40-letniego pojazdu bojowego Bradley zaproponowało nowe transportery żołnierzy z hybrydowymi układami elektrycznymi. To dla sił zbrojnych ważna zmiana. Każda firma przyjęła inne podejście do tego, jak osiągnąć hybrydowy napęd elektryczny. To naprawdę wyzwanie, gdy ma się szeroką gamę podejść opartych na ryzyku. Armia nie wymaga od firm używania technologii hybrydowej w następcy Bradleya, zwanego opcjonalnie załogowym pojazdem bojowym, ale zachęca się decydentów, aby firmy uwzględniły tę technologię w swoich propozycjach. Określone przez wojsko wymogi odnoszą się do takich kwestii, jak oszczędność paliwa, tryb cichy i inne wymagania operacyjne dotyczące pojazdu, które naprawdę nadają się do hybrydowego rozwiązania elektrycznego. Tryb cichy oznacza działanie elektroniki i czujników wewnątrz pojazdu, gdy silnik spalinowy pozostaje wyłączony.

Ogólnie plan klimatyczny armii amerykańskiej kładzie nacisk na wzrost liczby pojazdów elektrycznych i hybrydowych. Poszukuje się również sposobów na doposażenie istniejących pojazdów w napęd hybrydowy lub elektryczny. Koncern Oshkosh Defense, który tworzy *Joint Light Tactical Vehicle*, przygotował hybrydową wersję auta wojskowego zastępującego Humvee. Podrasowany buggy wydmy – zmilitaryzowana wersja pickupa Chevroleta Colorado ZR2 – jest w pełni zasilany akumulatorami. Zniknął silnik wysokoprężny, zastąpiono go silnikiem elektrycznym. Koncern General Dynamics Land Systems zaprezentował hybrydowe odmiany czołgu Abrams i kołowego transportera piechoty Stryker. GM Defense korzysta zaś z miliardów dolarów wydanych przez General Motors na rozwój pojazdów

¹¹ <https://www.defenseone.com/technology/2022/10/hybrid-electric-troop-transporters-are-moving-toward-battlefield/378460>.

elektrycznych na rynek cywilny. W tym przedsięwzięciu wnosi zatem komercyjną skalę funkcjonowania General Motors oraz inwestycje związane z ogromnym łańcuchem dostaw, aby pozyskiwać materiały na dużą skalę, co pozwala obniżać koszty i przynosić większą wartość klientom. Jednocześnie niewielki rozmiar oddziały odpowiedzialnego za elektryfikację umożliwia prowadzenie go tak, jakby był start-upem. W ciągu trzech miesięcy pozwoliło to firmie na przekształcenie gąsienicowego bojowego wozu piechoty w pojazd zasilany bateryjnie – dokładnie GM Defense zaprezentował zelektryfikowaną wersję transportera Bradley, który został opracowany właśnie w ciągu zaledwie dwunastu tygodni. W trakcie przejścia – transformacji ku bardziej elektrycznej, autonomicznej i połączonej przyszłości koncern uważa bowiem, że wykorzystanie dużych inwestycji komercyjnych to naprawdę sprytny sposób. Niemniej nadal istnieje wiele pytań dotyczących tego, czy i kiedy w pełni elektryczne czołgi i pojazdy opancerzone trafią na pole walki. Wymagają infrastruktury do ładowania, aby naładować akumulatory, ale wymagają też mniej konserwacji, gdyż mają znacznie mniej ruchomych części i wytwarzają znacznie mniej ciepła. Dlatego GM Defense eksperymentuje z holowaną przyczepą akumulatorową. Musi mianowicie naprawdę sprostać wyzwaniu związanemu z infrastrukturą i wraz ze swoimi klientami pozostawać bardzo skoncentrowany na pracy nad tym wyzwaniem infrastrukturalnym. W tym przypadku powyższe oznacza współpracę z armią, aby zrozumieć, w jaki sposób umożliwiać jej dostarczanie energii na pole bitwy i przenoszenie „mocy” do taktycznej przewagi. Ostatecznie wiadomo, że stan końcowy to przejście w kierunku pojazdu całkowicie elektrycznego, ponieważ brak redundancji w układzie napędowym i redundancja w podwójnych silnikach i podwójnych źródłach paliwowych ma tak dużą wartość. Dlatego to logiczny krok. Podmiot chce więc dojść do punktu, w którym pojazd będzie niewiarygodnie wytrzymały, bardzo niezawodny i będzie obsługiwał wszystkie potrzeby misji. Armia zakupiła nowy, w pełni elektryczny GMC Hummer do eksperymentów, ale to niezmilitaryzowana ciężarówka.

Wybrane prace prowadzone w USA w dziedzinie hybrydowych zespołów napędowych do ciężkich pojazdów wojskowych

Dla porównania, aby obiektywnie ocenić dzisiejszą pozycję europejskich wytwórców pojazdów użytkowych w dziedzinie alternatywnych – hybrydowych zespołów napędowych dla wariantów wojskowych, warto przybliżyć prace, jakie w tej sferze są prowadzone w USA. W tym kraju już od lat wespół z różnymi dostawcami bada się rozmaite pojazdy hybrydowe różnych klas tonażowych i o odmiennym przeznaczeniu. W tym miejscu warto szczególnie wspomnieć o dwóch projektach bezpośrednio odnoszących się do militarnych ciężarówek klas tonażowych średniej i ciężkiej.

FMTV *Hybrid Hydraulic Vehicle* (HHV)¹² został wybrany jako platforma testowa do rozwoju w przyszłości hybrydowego hydraulicznego (*hybrid hydraulic*) systemu napędowego. BAE Systems opracował pierwszy elektryczno-hybrydowy FMTV dla U.S. Army National Automotive Center (NAC – Narodowe Centrum Motoryzacji) w 1998 roku. Elektryczno-hybrydowy 2-osiowy FMTV powstał na podstawie kontraktu ze Stewart&Stevenson w 1999 roku. Dwusilnikowy seryjny napęd hybrydowo-elektryczny w tym samochodzie był podobny do jednosilnikowego Hybri-Drive stosowanego w autobusach. Przy czym, gdy cywilne autobusy wykorzystują generator chłodzony powietrzem, wzmocniona solidna ciężarówka miała generator chłodzony cieczą, pozwalający jej na pokonywanie przeszkód wodnych o głębokości do 30 cali – niespełna 800 mm. Moduł napędowy w FMTV mógł dostarczyć na zewnątrz do 200 kW stałej mocy, ale przyszły pojazd militarny – bojowy, zaopatrzone w liczne pokładowe systemy elektryczne, miał otrzymać bardziej „inteligentny” system zarządzania energią. Czujniki, sprzęt radiowy, komputery, systemy aktywnego zawieszenia, dachowe, zasilane elektrycznie stanowiska strzeleckie, systemy ochrony przed bronią atomową, biologiczną i chemiczną oraz inne wyposażenie instalowane w pojeździe mogły i mogą bowiem, ze względu na rodzaj wykonywanych przez niego zadań, nawet dwukrotnie zwiększyć zapotrzebowanie na energię dostarczaną przez system hybrydowo-elektryczny. Idealne rozwiązanie polega tu na automatycznym systemie zarządzaniu energią, umożliwiającym jej elastyczne dostarczanie z dostępnych pokładowo źródeł, w zależności od chwilowych potrzeb w tym zakresie, w tym z generatora, akumulatorów, superkondensatorów bądź z innych źródeł.

W 2000 roku, podczas grudniowej konwencji U.S. Army w Waszyngtonie, firma ujawniła 5-tonową hybrydową ciężarówkę FMTV drugiej generacji. Miała ona bardziej nowoczesną – zaawansowaną elektronikę pokładową i zasilającą oraz silnik o większej mocy. Ogółem Stewart&Stevenson/BAE Systems wyprodukował pięć hybrydowych elektrycznych FMTV, każdy dopasowany do odmiennych zastosowań.

Kolejne prace koncepcyjne, tym razem nad armijnym przyszłościowym systemem taktycznych ciężarówek (*Army's Future Tactical Truck System* – FTTS), i w ich ramach pojazdem podtrzymującym manewrowość (*Maneuver Sustainment Vehicle* – MSV)¹³, Amerykanie prowadzili na początku tego stulecia. W pracach tych były postawione następujące wymogi i oczekiwania:

- projekt najpierw skupiony na żołnierzu – żołnierz w centrum uwagi,
- zmniejszenie całkowitego ryzyka integracji,
- wymaganie oszacowania wymiany,

¹² http://www.artsa.com.au/assets/library/2003_artsa_matheson_tmc.pdf; www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA579702 - M1078 Hybrid Hydraulic Vehicle Fuel Economy Evaluation; https://en.wikipedia.org/wiki/Family_of_Medium_Tactical_Vehicles.

¹³ http://www.military-today.com/trucks/maneuver_sustainment_vehicle.htm; <http://www.truck-trend.com/cool-trucks/0901dp-maneuver-sustainment-vehicle/>; <http://www.globalsecurity.org/military/systems/ground/fts-msv.htm>.

- mniejsza masa i rozmiary – kubatura,
- obniżka całkowitych kosztów posiadania,
- zwiększona niezawodność,
- polepszony interfejs człowiek/maszyna,
- zmaksymalizowane ujednoczenie,
- polepszona produktywność,
- dostosowanie do przyszłych modernizacji – posiadanie potencjału modernizacyjnego,
- obniżone wymagania i koszty logistyczne,
- znacząca redukcja w czasie produkcji, kompleksowości i w kosztach,
- zmniejszenie wymagań czasowych i w zakresie personelu niezbędnego do obsługi w czasie cyklu życia systemu.

Określając na początku pierwszej dekady tego stulecia bazowe wymagania dla przyszłego taktycznego systemu ciężarówek – pojazdów podtrzymujących manewrowość (*Future Tactical Truck System – Maneuver Sustainment Vehicle – FTTS-MSV – Maneuver Sustainment Vehicle – MSV*), armia amerykańska postawiła na kilka istotnych wymogów zarówno z zakresu samej eksploatacji, w tym jej kosztów, elastyczności i łatwości, jak i dotyczących zagadnień związanych z przeżywalnością na współczesnym i przyszłym, głównie asymetrycznym polu walki. Dlatego za najważniejsze z tych wymogów uznano:

- łatwość w obsłudze i naprawach,
- obniżkę kosztów eksploatacji,
- wzrost potencjału eksploatacyjnego dokonujący się na dwóch płaszczyznach, m.in. poprzez:
 - wzrost zasięgu na jednym tankowaniu,
 - wzrost elastyczności w wykorzystaniu, przejawiający się wielofunkcyjnością, tzn. zdolnością do efektywnej realizacji wielu zadań dotąd wykonywanych przez co najmniej kilka rodzajów sprzętu służącego w zabezpieczeniu logistycznym,
- wzrost unifikacji posiadanego parku samochodowego wskutek zastąpienia kilku rodzajów sprzętu jednym,
- wzrost przeżywalności na asymetrycznym polu walki.

W przypadku łatwości w naprawie i obsłudze cel armii polegał na redukcji czasu niezbędnego do zakończenia wszelkich operacji naprawczych, obsługowych i przeglądowych. Zgodnie z przyjętymi systemami klasyfikacji powinny być one skutecznie wykonywane w czasie krótszym niż 30 minut. Powyższe starano się osiągnąć wskutek użycia mniejszej liczby narzędzi oraz oparcia się na pokładowej samochodowej diagnostyce (pokładowych systemach diagnostycznych w autach), minimalnych wymaganiach w obszarze szkoleń z zakresu obsługi oraz wzroście znaczenia obsługi i zarządzania pojazdem w czasie rzeczywistym poprzez wykorzystanie bezprzewodowych systemów kontroli i nadzoru nad nim (tzw. *vehicle-health monitoring*). Przykładowo FTTS-MSV wymagał mniejszej liczby narzędzi do obsługi

oraz posiadał specjalne oprogramowanie (specjalny software pokładowy) i czujniki znacznie podnoszące niezawodność systemu. Generalnie tzw. system pojazdów miał wymagać aż o 53 pojazdy mniej i o 43 mniej mechaników niż wtedy eksploatowane auta, takie jak HMMWV.

Następnym z podstawowych wymagań armii amerykańskiej dla nowych ciężarówek taktycznych stała się poprawa efektywności i ekonomiki paliwowej. MSV miał mieć napęd hybrydowy – spalinowo/dieslowsko-elektryczny. Dzięki temu właśnie powinien się wyróżniać większą, poprawioną efektywnością paliwową – niższym przeliczeniowym zużyciem paliwa niż używane wówczas we wsparciu logistycznym odpowiadające mu tradycyjne warianty klasy tonażowej ciężkiej. Postawiono tu m.in. warunek, iż koncept ciężarówki przyszłości, dzięki poprawionej efektywności energetycznej i ekonomice paliwowej, uzyska zasięg zwiększony do 600-900 mil (około 1000-1500 km), czyli wartości nawet 2-3-krotnie większej niż dla normalnie wtedy używanych 4-osiowych ciężarówek w układzie napędowym 8×8, cechujących się przeciętnym zasięgiem na poziomie 300 mil (nieco ponad 480 km). Tym samym FTTS-MSV miał uzyskać zdolność do autonomicznego operowania na zwiększonych dystansach.

System miał też być w stanie zapewnić 100-procentowe wsparcie komunikacyjne (*communications support*) dla podniesienia terminowości i precyzji dostaw oraz wyeliminowania niepotrzebnych późniejszych ponownych dostaw (*re-supply activities*). Ponadto koncept FTTS-MSV miał zawierać tzw. inteligentny system załadunkowy TACOM, jaki opracowano wcześniej jako część programu tzw. inteligentnej dystrybucji (*Smart Distribution Program*). Przykładowo miał być zdolny do szybkiego działania, samodzielnego dokonywania operacji załadunkowych i rozładunkowych oraz operowania w niesprzyjającym otoczeniu – środowisku taktycznym. Ogólnie w wymaganiach co do FTTS-MSV założono, że zapewni on dostawy wszelkiego rodzaju ładunków bez potrzeby korzystania z zewnętrznego systemu operowania ładunkami (*external Material Handling Equipment – MHE*). Będzie mógł m.in. transportować sprzęt i wyposażenie, platformy NATO, różne moduły misyjne – wymienne nadwozia/kontenery (przykładowo zbiorniki na wodę bądź paliwo, przewóz amunicji i klasycznych ładunków – *cargo transport*) oraz operować i przewozić standardowe kontenery 20-stopowe (*Twenty-foot Equivalent Units – TEU*). Zadanie FTTS-MSV miało bowiem polegać na zabezpieczeniu taktycznego i strategicznego transportu oraz dostaw w ramach wszystkich elementów komponentów bojowych zdolnych do wykonywania całego spektrum misji bojowych i wsparcia (*Unit of Action – UA*). W celu pozytywnego zakończenia misji w ramach UA wymagano zatem lądowego systemu logistycznego, charakteryzującego się wysoką mobilnością, efektywnością oraz nadzwyczajną niezawodnością i elastycznością. FTTS-MSV miał być w stanie dotrzymywać kroku wzrastającej mobilności oraz szeroko rozproszonym manewrowym siłom zależnym od *objective force operational* i *organizational plan*.

Poza tym FTTS-MSV miał mieć zdolność do zbierania, otrzymywania i wysyłania informacji niezbędnych do monitorowania przesyłek oraz informacji diagno-

stycznych/prognostycznych. Dane te dotyczyły dostaw znanych i realizowanych w trybie alarmowym oraz systemów zarządzania obsługą w czasie rzeczywistym – w momencie zamawiania (*supply and maintenance management systems*).

Pod względem klasyfikowania FTTS-MSV miał zaś być równoległą hybrydą klasy tonażowej ciężkiej, zaprojektowaną w roli bazy dla wielofunkcyjnej pojedynczej rodziny taktycznych ciężarówek (*multi-functional single tactical truck family*), jaka w parku taborowym sił zbrojnych USA zastąpi klasyfikowane jako 2½-tonowy lekki średni pojazd taktyczny (*Light Medium Tactical Vehicle*), 5-tonowy średni pojazd taktyczny (*Medium Tactical Vehicle*), rozszerzoną mobilną taktyczną ciężarówkę klasy tonażowej ciężkiej (*Heavy Expanded Mobility Tactical Truck* – HEMTT) oraz pojazdy wchodzące w skład spaletyzowanego systemu ładunkowego (*Palletized Load System* – PLS).

Pierwotnie nad elektrycznymi hybrydowymi przyszłymi demonstratorami ciężarówek klasy tonażowej ciężkiej dla sił zbrojnych USA pracowała firma Stewart & Stevenson. Niemniej w 2006 roku jej dział pojazdów taktycznych nabył inny amerykański podmiot – Armor Holdings. Dlatego ostatecznie od niego pochodziły dwa egzemplarze demonstracyjne napędzane przez elektryczne systemy napędu UQM, które w marcu 2007 roku rozpoczęły testy tzw. *Military Utility Assessment* (MUA).

Zgodnie z wymogami zamawiającego auta te zaprojektowano pod kątem uzyskania zwiększonej – poprawionej efektywności paliwowej. Oznaczała ona wzrost zasięgu na jednym tankowaniu do 600-900 mil, w zależności od warunków taktycznych czy operacyjnych realizacji postawionych zadań, z przeciętnie 300 mil uzyskiwanych wtedy, przy zachowaniu tej samej ilości zabieranego paliwa. W tym celu zamontowano system równoległego hybrydowego zespołu napędowego, opracowany przez Armor Holdings we współpracy z AVL. Układ ten integrował silnik Caterpillar C9, automatyczną skrzynię biegów Allison, silnik elektryczny UQM w układzie hybrydowym oraz zespół akumulatorów. Bazowe źródło napędu stanowił 8,8-litrowy, rzędowy silnik wysokoprężny Caterpillar C9, rozwijający moc maksymalną 450 KM. Normalnie instalowany byłby silnik przynajmniej 12-13-litrowy, o mocy maksymalnej 450-550 KM. Ten mniejszy silnik połączono z silnikiem elektrycznym/generatorem wyprodukowanym przez UQM i osiągającym moc maksymalną 120 kW. Moc tego silnika elektrycznego odpowiadała zatem 160 KM, z czego do 30 kW mogło być przekazywane na zewnątrz – do zasilania urządzeń zewnętrznych. W układzie przeniesienia napędu wystąpiła 7-biegowa, automatyczna skrzynia przekładniowa Allison. Układ napędowy integrował jeszcze moduł akumulatorów Cobasys NiMH 336V o pojemności 3 kWh. W rezultacie MSV okazał się właśnie znacznie bardziej oszczędny – efektywny paliwowo niż odpowiadające mu i wykorzystywane przez U.S. Army ciężkie 4-osiowe pojazdy wsparcia logistycznego w układzie napędowym 8×8. W zależności od warunków drogowych i rodzaju realizowanej misji zasięg na jednym tankowaniu – bez uzupełniania paliwa dochodził do 960-1440 km. Tym samym w układzie eksploatacyjnym MSV dał się wykorzystać do obsługi ruchu zarówno lokalnego, jak i liniowego – na krótkich i długich dystansach, ponownych dostaw – realizacji uzupełnień w zaopatrzeniu oraz powiązanych misji taktycznych.

W zakresie konstrukcyjnym MSV miał układ 4-osiowy, z napędzanymi wszystkimi osiami, zaopatrzonymi wyłącznie w pojedyncze ogumienie. Jego zawieszenie cechowało się możliwością regulacji wysokości nad powierzchnią gruntu i tym samym zwiększania prześwitu w zakresie 14-18 cali. Ładowność taktyczna – w terenie – wynosiła 13 000 kg, a do samodzielnego załadunku i rozładunku wystandaryzowanych platform i kontenerów służył półautomatyzowany (*semi-robotic*) hydrauliczny system załadunkowy. Co istotne i przy tym ciekawe, w roli urządzenia załadunkowego zamontowano nie system hakowy – niezwykle popularny w takich zastosowaniach, lecz jedynie żuraw Hiab o bardzo dużym udźwigu. W ten sposób eliminowano konieczność montażu systemu hakowego, gdyż żuraw o bardzo dużym udźwigu zastępował i ten system, i ewentualnie żuraw o mniejszym udźwigu za kabiną. Ten żuraw o bardzo dużym udźwigu znalazł się za modułem zakabinowym i mógł również obsługiwać przyczepę. W efekcie ta jedna jednostka załadunkowa – dzięki swojej elastyczności eksploatacyjnej – mogła być wykorzystywana do przeładunku innych ładunków. Mogła też być sterowana bezpośrednio z kabiny kierowcy, bez potrzeby jej opuszczania w strefach walk, a samochód przygotowano do holowania dedykowanych przyczep 3-osiowych. Te ostatnie, poprzez m.in. założenie tylko pojedynczego ogumienia, dostosowano do jazdy w warunkach terenowych.

Ponadto, ponieważ pojazd opracowano pod kątem wykorzystania na asymetrycznym polu walki, wyposażono go w integralnie opancerzoną długą kabinę, o kształcie w przekroju diamentu. Zapewniała ona ochronę przeciwko amunicji małokalibrowej i odłamkom pocisków artyleryjskich oraz miała dachowy obserwacyjny luk ewakuacyjny. Opcjonalnie pojazd dało się wyposażać w dachowe manualnie bądź zdalnie sterowane stanowisko strzeleckie z bronią maszynową małego lub średniego kalibru albo z małokalibrowym granatnikiem. Oprócz tego na stanie znalazł się system kamery do obserwacji dookrężnej (360°), pozwalający na kontrolę załadunku i rozładunku z wnętrza opancerzonej kabiny.

Testy ukierunkowane na sprawdzenie samochodów w różnych warunkach eksploatacji przeprowadzono w Fort Lewis, w stanie Waszyngton. Przed testami MUA dwa demonstratory z powodzeniem ukończyły próby na dystansie około 3000 mil w Michigan Proving Grounds oraz armijnym U.S. Army's Aberdeen Proving Grounds. Ostatecznie zbudowano jednak tylko te dwa prototypy, które pozostały wyłącznie modelami demonstracyjnymi.

Inny projekt rozpoczął się w 2001 roku¹⁴, gdy Narodowe Centrum Motoryzacyjne (National Automotive Center) udzieliło Oshkoshowi grantu dla integracji jego systemu napędu elektryczno-hybrydowego ProPulse w tzw. demonstratorze Transformation HEMTT. Już wówczas przedstawiciele firmy stwierdzili, że chociaż na-

¹⁴ Materiały firmy Oshkosh na temat tego projektu od 2000 roku, w tym: <https://oshkoshdefense.com/components/propulse/>; <http://www.hybrid-vehicle.org/hybrid-truck-hemtt.html>; <http://www.trucktrend.com/cool-trucks/1107dp-diesel-electric-hybrid-hemtt-oskosh-a3/>; <http://defense-update.com/features/du-3-05/feature-HED-trucks.htm>.

stępnej generacji HEMTT A3 nie był jeszcze zdefiniowany jako pojazd elektryczno-hybrydowy, technologia ProPulse mogła zdecydowanie pomóc w podniesieniu jego osiągnięć.

Jako pierwsze pokazano sześć z siedmiu elektryczno-hybrydowych przedprodukcyjnych egzemplarzy HEMTT. W porównaniu ze sprawdzonymi pojazdami koncepcyjnymi te hybrydy, określane jako seryjne, były odporniejsze – dostały wzmocnione komponenty, by sprostać wymaganiom i specyfikacji sił zbrojnych. Gdy demonstrator miał jeden silnik elektryczny na oś, egzemplarze produkcyjne miały mieć jeden silnik elektryczny na koło. W swoim demonstratorze koncepcji HEMTT LAS Oshkosh Truck Corp. z powodzeniem użył też superkondensatorów Maxwell Technologies do gromadzenia energii odzyskiwanej podczas hamowania (rekupercja), bez konieczności używania akumulatorów. Poza tym egzemplarz koncepcyjny wykorzystywał 450-konny silnik spalinowy, pracujący w stałym zakresie prędkości obrotowych i dedykowany do zasilania generatora elektrycznego o mocy 335 kW. Ten z kolei bezpośrednio napędzał silniki elektryczne w piastach kół bez żadnych sprzęgieł, przekładni, wałów i innych ciężkich komponentów układu napędowego. W dodatku, chociaż hybrydowa ciężarówka Oshkosh powstała głównie pod kątem potrzeb i wymagań sił zbrojnych, może z powodzeniem służyć na misjach humanitarnych czy pomocowych, takich jak te realizowane przez ONZ.

Demonstrator HEMTT A3 (*Heavy Expanded Mobility Tactical Truck* – ciężka ciężarówka taktyczna o powiększonej mobilności) zdaniem korporacji Oshkosh jest pierwszą gotową do produkcji seryjnej taktyczną militarną ciężarówką zasilaną przez energetycznie sprawny system napędu spalinowo-elektrycznego – dieslowo-elektrycznego, nazwany ProPulse. Może on zwiększyć efektywność paliwową o 20% lub nawet więcej, w zależności od rodzaju wykonywanych misji.

HEMTT A3 cechuje się wysoką ładownością taktyczną, rzędu do 13 000 kg i został zaopatrzony w niezależne zawieszenie klasy HD (*heavy duty*) TAK-4, pozwalające kołom na stałe utrzymywanie kontaktu z podłożem, nawet w najtrudniejszych warunkach drogowych. Powyższe, w połączeniu z kołami bezpośrednio napędzanymi przez układ elektryczny, z silnikami mogącymi dostarczyć moment o odpowiedniej wartości w odpowiedniej chwili, wpływa na zdecydowaną poprawę mobilności taktycznej – dzielności terenowej auta. Ponadto HEMTT A3 ma zawieszenie o regulowanej wysokości, pomocne m.in. w trakcie wykonywania czynności załadunkowych.

Samochód przygotowano do tzw. dualnego – podwójnego wykorzystania: może pracować jako generator energii elektrycznej o mocy 200 kW oraz ma, po pierwsze, pokładowy system diagnostyczny dla uproszczenia wykonywania w warunkach polowych przeglądów czy napraw i, po drugie, zespół napędowy – tzw. *power pack*, składający się z silnika/generatora i systemu ładowania. Zespół ten może być wyjęty i wymieniony w czasie około 30 minut czy nawet mniej, co znacznie redukuje czas postoju – wyłączenia pojazdu z ruchu oraz ułatwia polowe przeglądy i naprawy głównych komponentów – modułów składowych. Sam system napędu ProPulse

wykorzystuje unikatowe, modułowe rozlokowanie seryjnego układu hybrydowego (*series-hybrid*) w celu uproszczenia przenoszenia napędu na koła. Spalinowy silnik wysokoprężny, umieszczony poprzecznie za kabiną, napędza połączony z nim bezpośrednio zblokowany elektryczny generator. Ten z kolei dostarcza energię bezpośrednio do silników w kołach, tym samym eliminując potrzebę instalacji sprzęgła hydrokinetycznego, automatycznej skrzyni przekładniowej, skrzyni rozdzielczej oraz wałów napędowych. System nie ma także akumulatorów, w zamian wykorzystując superkondensatory do gromadzenia energii. Dzięki funkcji rekuperacji energii podczas hamowania jej straty ulegają redukcji, a energia ta, już jako energia elektryczna, może być spożytkowana do zasilania systemu elektrycznego. Dodatkowo zmniejsza się obciążenie tradycyjnego układu hamulcowego, co pozytywnie przekłada się na koszty eksploatacji.

Na postoju HEMTT A3 może zaś zostać stacją zasilającą – przenośnym generatorem, wytwarzającym do 200 kW energii do wykorzystania na zewnątrz, przy bazowo zamontowanym silniku spalinowym o mocy 450 KM. W przypadku podwyższenia mocy maksymalnej silnika spalinowego do 505 KM może generować do 400 kW energii elektrycznej. Ponadto jest o 3000 funtów – około 1360 kg lżejszy niż jego poprzednik, zachowując ładowność 13 000 kg w terenie oraz jednocześnie wyróżniając się poprawioną pewnością eksploatacyjną wskutek zastosowania lżejszych, bardziej wytrzymałych materiałów. Pozwala to na jego przerzut w ładowni samolotu C130 jako pierwszego z przedstawicieli rodziny HEMTT. Do tego integralnie opancerzona kabina w warunkach polowych może być zamocowana w mniej niż osiem godzin, umożliwiając dowództwu bardziej adekwatną i szybszą odpowiedź na zmieniające się taktyczne zagrożenia i sytuację na polu walki.

Z czysto użytkowego punktu widzenia eksploatacja następnej generacji hybrydowego systemu napędowego Oshkosh dla posiadaczy takich pojazdów oznacza wiele korzyści dotyczących wydajności i efektywności eksploatacyjnej floty, w tym:

- poprawioną ekonomikę paliwową – spalanie niższe nawet o 40% podczas jazdy w trudnym terenie w porównaniu z tradycyjnym odpowiednikiem;
- mniejsze wymagania logistyczne, określone jako *smaller logistics footprint* – mniejszy ślad logistyczny. Ponieważ w systemie nie są wykorzystywane akumulatory, nie istnieje potrzeba ich przewozu i wymiany. W zamian jako źródło energii, w tym jej magazyn, służą super-/ultrakondensatory, w następstwie czego zmniejsza się ilość paliwa niezbędna do zasilania auta z systemem ProPulse;
- pokładowy generator; system pracuje jako stacjonarny generator dostarczający wystarczającą ilość energii elektrycznej do zasilania nawet bloku mieszkalnego, szpitala polowego, lotniska polowego albo stanowiska dowodzenia;
- zmniejszoną sygnaturę termalną; ciężarówka może być eksploatowana w trybie w pełni elektrycznym, bazując na energii z systemu ProPulse do zasilania wymagającego tego sprzętu. W efekcie nie generuje żadnej sygnatury termalnej z tytułu braku potrzeby załączenia silnika spalinowego;

- zaawansowaną technologię bezpieczeństwa. W odróżnieniu od innych systemów, użytkownicy mogą rozładować całą zgromadzoną w pojeździe energię elektryczną, dzięki czemu personel dokonujący przeglądów czy napraw może pracować całkowicie bezpiecznie.

W kolejnych latach prace te kontynuowano. Pod koniec drugiej dekady AFC GVSC miała już hybrydowy elektryczny zestaw modyfikacyjny do taktycznej ciężarówki M977 *Cargo Heavy Expanded Mobility Tactical Truck* (HEMTT), jak wykazano w badaniu *Tactical Vehicle Electrification Kit* (TVEK) z listopada 2019 roku. W badaniu tym osiągnięto oszczędność paliwa operacyjnego o 15-25%, przy o 56% skróconym całkowitym czasie pracy silnika i dodatnim zwrocie z inwestycji (ROI) w mniej niż 24 miesiące¹⁵.

Nowe projekty Oshkosh¹⁶ – hybrydowy opancerzony pojazd taktyczny eJLTV

25 stycznia 2022 roku Oshkosh Defense, spółka zależna należąca w całości do Oshkosh Corporation, ujawniła fakt opracowania i zaprezentowała pierwszy w historii hybrydowy, cichy pojazd taktyczny z rodziny JLTV, oznaczony jako eJLTV. Pojazd ten oferuje armii amerykańskiej i amerykańskiemu korpusowi piechoty morskiej ten sam poziom wydajności i ochrony co podstawowy JLTV, z dodatkem cichego napędu, możliwości pokonywania większych odległości w trybie w pełni elektrycznym – czyli maksymalnie cichym, zwiększone oszczędności paliwa oraz zwiększoną moc napędu możliwą do przekazywania na zewnątrz, co pozwala na jej użycie do napędu innych urządzeń.

Pojazd eJLTV ładuje akumulator podczas użytkowania – całkowity czas ładowania akumulatora litowo-jonowego wynosi 30 minut. Można więc sobie wyobrazić oszczędności paliwa, ponieważ nie ma potrzeby pracy na biegu jałowym przez osiem godzin. Poza tym Oshkosh zwraca uwagę, że przeprowadzono już wiele testów wykazujących oszczędność paliwa na poziomie około 20%, lecz koncern wciąż chce wprowadzić kilka modyfikacji w tym pojeździe, aby uzyskać kolejne od 3 do 5% oszczędności paliwa. Po kilku poprawkach firma ma zatem nadzieję uzyskać większy dystans i prędkość w trybie bateryjnym. Eliminuje to potrzebę posiadania infrastruktury do ładowania, która pozostaje jednym z najważniejszych wyzwań dla powszechnej elektryfikacji taktycznej floty pojazdów kołowych. Tym samym zastosowanie układu hybrydowego, a nie w pełni elektrycznego, na tym

¹⁵ *White Paper – Electrification of U.S. Army Ground Force (An evolutionary revolution)*, 2019, s. 12, https://calstart.org/wp-content/uploads/2020/10/Vehicle_Electrification_Paper_29JUN20.pdf.

¹⁶ <https://breakingdefense.com/2022/10/army-planning-hybrid-tactical-vehicle-tests-next-year/>; <https://www.wpr.org/oshkosh-defense-receives-new-patents-hybrid-military-vehicle>; J. Brach, *Hybrydowy opancerzony pojazd taktyczny Oshkosh eJLTV*, <https://www.auto-motor-i-sport.pl/ciezarowki-i-autobusy/Hybrydowy-opancerzony-pojazd-taktyczny-Oshkosh-eJLTV,46554>.

etapie przekłada się na przewyższenie istotnych ograniczeń infrastrukturalnych. W tym kontekście Oshkosh Corporation i Oshkosh Defense od wielu lat opracowują, testują i rozwijają hybrydowo-elektryczne warianty swoich ciężkich i średnich taktycznych pojazdów kołowych. Teraz, dzięki eJLTV, oferują klientom wojskowym niedrogi sposób na zelektryfikowanie ich floty lekkich taktycznych pojazdów kołowych bez uszczerbku dla osiągnięć terenowych lub wysokiej ochrony niezbędnej w operacjach bojowych.

We wrześniu 2022 roku armia amerykańska zaczęła realizować kolejny kontrakt na produkcję pojazdów JLTV. Kontynuacja kontraktu o wartości 6,5 mld USD obejmuje dodatkowe 15 468 pojazdów i pięć lat dostaw, uzupełnionych o przedłużenie kontraktu w ramach opcji na następne pięć lat, co oznacza przedłużenie produkcji JLTV do roku obrotowego 2032. Podczas gdy w ramach przetargu na JLTV armia amerykańska nie poprosiła o hybrydowo-elektryczny typ JLTV, eJLTV dowodzi, że Oshkosh Defense ma dzisiaj zespół i możliwości techniczne, aby wyprodukować ten wysoko wydajny pojazd.

Zasadnicze cechy eJLTV są następujące:

- wygląd maksymalnie zbliżony do klasycznego JLTV,
- utrzymanie wydajności i poziomu ochrony sprawdzonego Oshkosh Defense JLTV,
- poprawa ekonomiki paliwowej – redukcja zużycia paliwa o ponad 20%,
- zapewnienie pojemności baterii 30 kWh z możliwością dalszego zwiększania w miarę rozwoju technologii akumulatorowej,
- eliminacja potrzeby stosowania holowanego generatora, gdyż moc możliwa do przekazania na zewnątrz – do napędu urządzeń zewnętrznych wynosi do 115 kW.

Ogólnie na swoich akumulatorach hybrydowy JLTV może jechać z prędkością do 45 mil na godzinę przez 30 mil (ponad 48 km). Może działać w trybie cichym przez osiem godzin. Do tego, podobnie jak komercyjne hybrydy, hybrydowy JLTV odzyskuje energię po uruchomieniu hamulców. Jednak akumulatory sprawiają, że jest on o około 1000 funtów (ponad 453 kg) cięższy niż zwykła wersja na paliwo spalinowe. Firma twierdzi, że istniejące egzemplarze JLTV – wyprodukowane w liczbie ponad 18 000 – mogą zostać doposażone w wersję hybrydową, jeśli armia zechce.

Oshkosh Defense ogłosił 22 sierpnia 2022 roku, że otrzymał pięć nowych patentów na hybrydowy elektryczny pojazd wojskowy. Hybrydowy elektryczny pojazd taktyczny *Joint Light Tactical Vehicle* (eJLTV), po raz pierwszy ujawniony w styczniu 2022 roku, stanowi hybrydową wersję tradycyjnego *Joint Light Tactical Vehicle* i w stosunku do tradycyjnego odpowiednika zmniejsza zużycie paliwa o ponad 20%. Patenty dotyczą podejścia do napędu osprzętu, integracji akumulatora i falownika oraz zasięgu i możliwości samego auta. Przy tym technologia pojazdów hybrydowych z napędem elektrycznym zapewnia cichszą jazdę, wydłużony czas cichej pracy, zwiększoną oszczędność paliwa i zwiększoną moc podawaną na zewnątrz, co umożliwi jej wykorzystanie w scenariuszach bojowych i rozpoznawczych.

Zgodnie z planem strategii klimatycznej opublikowanym w lutym 2022 roku armia amerykańska postawiła sobie za cel wprowadzenie do 2035 roku pojazdów taktycznych z napędem hybrydowym. Armia musi dostosować się do potrzeb całego społeczeństwa i celowo realizować strategię ograniczania emisji gazów cieplarnianych, aby zmniejszyć ryzyko klimatyczne. W takim układzie korzystanie z pojazdów hybrydowych i elektrycznych w zastosowaniach taktycznych może wykazywać wiele zalet, w tym w sferze zarządzania ryzykiem. Zmniejsza mianowicie zależność od zasobów, które trzeba sprowadzać z zewnątrz. Za każdym razem, gdy należy przemieszczać zapasy z jednego miejsca do miejsca docelowego, wiąże się to z kosztami i ryzykiem. Oprócz większej oszczędności paliwa, zmniejszony hałas i mniej gazów spalinowych lub ich całkowity brak z pojazdów hybrydowych i elektrycznych mogą być zaletą w warunkach wojskowych.

Zgodnie z komunikatem prasowym eJLTV ma funkcję cichego napędu i funkcję w pełni elektrycznego zasilania w oczekiwaniu. Sam Oshkosh Defense nadal ma 18 oczekujących wniosków patentowych na eJLTV.

Testy hybrydowych pojazdów taktycznych planowane przez armię amerykańską w 2023 roku¹⁷

Po przetestowaniu hybrydowych pojazdów bojowych Bradley armia sprawdzi hybrydowe Humvee i JLTV. Będą to m.in. manewry nad skałami oraz przejeżdżanie przez przeszkody terenowe, co ma pokazać możliwości lekkich pojazdów taktycznych *Joint Light Tactical Vehicle* do manewrowania na nierównych powierzchniach w Fort McCoy w Wisconsin.

Armia amerykańska planuje tę serię testów hybrydowych pojazdów elektrycznych, starając się wykorzystać obietnicę operacyjną i środowiskową zielonej technologii. Podczas gdy służby testowały w 2021 roku hybrydowo-elektryczny pojazd bojowy Bradley, RCCTO (*Rapid Capabilities and Critical Technologies Office* – Biuro ds. Zdolności Szybkich i Technologii Krytycznych) armii ma podpisane kontrakty na integrację technologii hybrydowo-elektrycznej z lekkim pojazdem taktycznym (*joint light tactical vehicle*) i wielozadaniowym pojazdem kołowym o wysokiej mobilności. Siłą napędową tych wysiłków jest strategia klimatyczna armii, której celem jest wprowadzenie do 2035 roku „specjalnie skonstruowanych” taktycznych pojazdów hybrydowych i do 2050 roku w pełni elektrycznych pojazdów hybrydowych. Plan ten ma również na celu zmniejszenie do 2030 roku emisji gazów cieplarnianych przez tę służbę o 50% w porównaniu z poziomami z 2005 roku.

RCCTO uruchomiło swój hybrydowy elektryczny pojazd Bradley w styczniu 2022 roku, armia zaś rozpoczęła testy pierwszego pojazdu w lipcu na poligonie w Aberdeen w stanie Maryland, a dodatkowe testy zaplanowano na wrzesień w Yumie

¹⁷ <https://breakingdefense.com/2022/10/army-planning-hybrid-tactical-vehicle-tests-next-year/>; R. Kness, *The future of electric vehicles in the army's fleet*, <https://news.clearancejobs.com/2022/11/02/the-future-of-electric-vehicles-in-the-armys-fleet/>.

w Arizonie. Drugi hybrydowy Bradley rozpoczął testy w Yumie w sierpniu, a testy obu pojazdów zakończyły się w grudniu tego samego roku.

Armia amerykańska szacuje, że w ciągu pięciu lat plan klimatyczny będzie kosztował ponad 6,8 mld USD. Gdy prace nad Bradleyami nabrały tempa na początku 2022 roku, armia przyznała również prototypowe kontrakty na kolejne umowy transakcyjne, aby rozpocząć hybrydyzację dwóch innych pojazdów roboczych w swojej flocie: *Joint Light Tactical Vehicle* i Humvee. Kontrakty zostały przyznane w marcu 2022 roku. Oba programy mają ten sam zestaw celów. Pierwszym jest wykazanie wykonalności hybrydowego napędu elektrycznego w taktycznych pojazdach kołowych, aby zmniejszyć zależność armii od paliw kopalnych, co stanowi kluczowy element strategii klimatycznej. Drugim celem jest generowanie większej ilości energii organicznej na pokładzie w celu zasilania zintegrowanych systemów uzbrojenia, czujników lub innego sprzętu elektronicznego. Oprócz możliwości generowania i magazynowania dodatkowej energii, takie pojazdy dodadzą również dodatkową zdolność operacyjną, umożliwiającą im działanie w trybie cichej mobilności (tylko akumulator). To dodatkowe magazynowanie energii na pokładzie zwiększy też zdolność pojazdów hybrydowych do cichej obserwacji w porównaniu z wariantem niehybrydowym.

Testy hybrydowych Humvee, przyznane Gale Banks Engineering w Azusa w Kalifornii i Michigan Technological University w Houghton w stanie Michigan, potrwać przez 18 miesięcy. RCCTO poinformowało, że testy rozpoczną się we wrześniu 2023 roku, a zakończą w grudniu 2024 roku. Oczekuje się, że firma AM General, producent Humvee, w 2023 roku zaprezentuje swój własny hybrydowy elektryczny typ Humvee, skierowany specjalnie do jednostek Gwardii Narodowej. Jeśli bowiem jakakolwiek flota pojazdów w armii amerykańskiej powinna zostać najpierw zelektryfikowana, to powinien to być właśnie Humvee. To mianowicie pojazd użytkowy, a nie bojowy.

Projekt hybrydowego JLTV jest prowadzony przez MATBOCK, LLC., małą firmę z siedzibą w Virginia Beach w Wirginii. Zgodnie z oświadczeniem hybrydowy elektryczny JLTV to 15-miesięczny projekt, którego testy rozpoczęły się w czerwcu 2023 roku, a zakończyły we wrześniu tego roku. Według RCCTO główne kamienie milowe dla obu programów obejmują ukończenie przeglądów projektów, budowanie pojazdów, kontrolę integracji i obiektów, testy wykonawców i żołnierzy. Intencją punktów kontaktowych „Soldier” jest włączenie żołnierzy na wczesnym etapie cyklu życia projektu, aby pomóc w informowaniu o wymaganiach, dostarczaniu operatorom i serwisantom informacji zwrotnych na temat decyzji projektowych, oraz upewnienie się, że budowane są prototypy zapewniające wzrost ogólnej zdolności operacyjnej i funkcjonalności w porównaniu z wariantem platformy niehybrydowej.

Poza tym armia amerykańska, zgodnie ze swoim planem elektryfikacji pojazdów, sukcesywnie od 2005 roku zaczęła redukować swoją nietaktyczną flotę zasilaną paliwem kopalnym. Do końca 2020 roku zmniejszyła tę flotę o 18 000 pojazdów, jednocześnie dodając 3000 pojazdów hybrydowych. Dotychczas sama ta

inicjatywa pozwoliła armii zaoszczędzić 50 mln USD i 13 mln galonów paliwa. Do ostatecznego terminu budowy floty całkowicie elektrycznej armia planuje wykorzystać opcje napędu hybrydowego jako propozycję czasową – prowizoryczną, dopóki nie będzie w stanie opracować całkowicie elektrycznej floty działającej około 2050 roku.

2.3. Prace dotyczące hybrydowych lekkich gašienicowych wozów bojowych prowadzone w Japonii¹⁸

Kilka lat temu w Japonii powstał gašienicowy bojowy hybrydowy pojazd elektryczny (*Tracked Combat Hybrid Electric Vehicle* – T-HEV) opracowany przez Acquisition, Technology i Logistics – Agencję Zakupów, Technologii i Logistyki Ministerstwa Obrony Japonii (ATLA-MOD). W jego badaniu mierzono osiągi w zakresie mobilności dotyczące przyspieszania, prędkości maksymalnej, zdolności pokonywania wzniesień i skrętu, które były oceniane na betonowych drogach. Skupiono się też na wskazaniu zalet napędowego hybrydowego systemu elektrycznego dla pojazdów bojowych.

Badany pojazd cechowały wymiary (długość × szerokość × wysokość) 5,7 × 2,8 × 2,2 m, masa 13 t metrycznych oraz układ napędowy złożony z dwóch silników. Silnik spalinowy był 6-cylindrowy, wysokoprężny, rzędowy, uzyskujący moc maksymalną 168 kW przy 2200 obr./min i maksymalny moment obrotowy 968 Nm. Wraz z nim wystąpił silnik elektryczny typu synchronicznego z magne sem trwałym o mocy maksymalnej 250 kW przy obrotach maksymalnych 5000 obr./min i maksymalnym momencie obrotowym 2034 Nm. Do tego doszedł moduł baterii litowo-jonowych o pojemności maksymalnej 32,6 kWh.

Jako zasadnicze kryteria oceny przyjęto: przyspieszenie i uzyskiwaną prędkość maksymalną, zdolność do pokonywania wzniesień oraz manewrowość.

Przyspieszenie i uzyskiwana prędkość maksymalna. T-HEV przyspieszał od 0 do 56 km/h (35 mil na godzinę) w około 15 sekund, czyli o 12 sekund szybciej niż opancerzony transporter M113A3 armii amerykańskiej. Ponadto prędkość maksymalna wyniosła około 73 km/h i była o 10% większa niż w przypadku M113A3. Ponieważ T-HEV napędzały silniki elektryczne, przyspieszenie było znacznie płynniejsze i mocniejsze niż w odniesieniu do konwencjonalnego pojazdu z mechanicznym układem napędowym, co stanowiło jedną z zalet seryjnego układu hybrydowego. Co więcej, T-HEV osiągnął blisko 40-procentową poprawę ekonomiki paliwowej

¹⁸ H. Taira, T. Yoshikawa, K. Jumonji, *Development of tracked combat hybrid-electric vehicle*, Mobility Research Division, Ground Systems Research Center Acquisition, Technology and Logistics Agency, Ministry of Defense of Japan (ATLA-MOD) Sagami-hara-shi, Kanagawa, Japan, https://www.dst.defence.gov.au/sites/default/files/basic_pages/documents/ICSILP18Thu1430_Taira_et_al-Tracked_Hybrid-Electric_Combat_vehicle.pdf.

– oszczędności paliwa w porównaniu z konwencjonalnym transporterem opancerzonym, co jawiło się jako kolejna zaleta systemu hybrydowego.

Zdolność do pokonywania wzniesień. Badano prędkości i kąty nachylenia nadwozia podczas próby równości na stoku o nachyleniu 60%. Stwierdzono, że T-HEV stabilnie pokonuje zbocze o nachyleniu 60% nawet przy niskiej prędkości (około 5 km/godz.) dzięki właściwościom silnika, tj. charakterystyce silnika elektrycznego – tzn. dużemu momentowi obrotowemu przy niskiej prędkości obrotowej, mimo że na 60-procentowym zboczu kąt nachylenia nadwozia przekraczał 60% (31°) z powodu ugięcia zawieszenia. Poza tym, ponieważ w tym sprawdzianie wystąpiły zmiany kątów położenia obiektu badawczego przy wjeździe i zjeździe z 60-procentowego zbocza, kąt nachylenia pojazdu zmieniał się przed osiągnięciem i po osiągnięciu 60-procentowego nachylenia.

Wydajność ruchu obrotowego. Badano tu prędkości obrotowe silnika, przełożenia przyspieszenia podczas obrotu zgodnie z ruchem wskazówek zegara, gdzie 100% współczynnika przyspieszenia oznacza stan pełnego otwarcia przepustnicy. Znak prędkości obrotowej silników reprezentuje kierunek obrotu i znak dodatni oznacza kierunek do przodu, a znak ujemny kierunek do tyłu. Wraz ze wzrostem przełożenia przyspieszenia prędkości obrotowe prawego i lewego silnika wzrastają, aby w trakcie ruchu obrotowego napędzić każdą z gąsienic w przeciwnych kierunkach. Udowodniono, że T-HEV może wykonać obrót z mechanicznie odłączonymi silnikami, gdy prędkości obrotowe i momenty obrotowe prawego i lewego silnika są odpowiednio sterowane.

Tym samym sprawdzian w Japonii ewidentnie wykazał, że hybrydowy – spalinowo-elektryczny układ napędowy w porównaniu z układem tradycyjnym, jedynie spalinowym, oznacza wyraźną poprawę:

- dynamiki – lepsze przyspieszenia, wyższa prędkość maksymalna,
- zdolności pokonywania wzniesień oraz zachowania się pojazdu na stromych wzniesieniach,
- ekonomiki paliwowej – redukcję zużycia paliwa – należy przypuszczać, że im trudniejsze warunki drogowe, tym redukcja ta będzie wyższa,
- manewrowości w sferze m.in. dokonywanego obrotu wokół własnej osi.

Rozpoczęły się już pierwsze próby wdrożenia w siłach zbrojnych pojazdów bez silnika spalinowego jako zasadniczego źródła napędu. Takie rozwiązanie występuje w pojazdach w pełni elektrycznych, pojazdach elektrycznych z przedłużaczem – zwiększaczem zasięgu oraz w pojazdach z ogniwami paliwowymi, czyli z układem gazowo-elektrycznym.

3.1. Projekt Holenderskiej Królewskiej Marynarki Wojennej – Koninklijke Marine i jego ocena

15 lutego 2023 roku¹ ukazała się informacja, że w porcie marynarki wojennej w Den Helder Dowództwo Królewskiej Marynarki Wojennej Holandii (Commando Zee-estrijdkrachten) wprowadziło do eksploatacji w pełni elektryczną ciężarówkę Scanii – 3-osiowy typ 25P 6×2*4 (BEV – tzw. bateryjny pojazd elektryczny). Podwozie to zaopatrzone w krótką, dzienną kabinę, tylną oś skręcaną przeciwbieżnie w stosunku do przednich kół kierowanych oraz zabudowę kurtynową. Pomalowano je także na kolor żółty, a nie barwy ochronne. Energię na pokładzie zapewnia pięć zestawów akumulatorów o łącznej zainstalowanej pojemności 165 kWh. Silnik elektryczny ma ciągłą moc wyjściową 230 kW (310 KM). Poza tym pojazd został objęty umową serwisową na okres ośmiu lat. W tym czasie Scania gwarantuje pełne korzystanie z elektrycznej ciężarówki – jej tzw. pełną mobilność. Pojazd ten jest także pierwszą elektryczną Scanią wdrożoną w siłach zbrojnych. Używając ten pierwszy egzemplarz, dowództwo Królewskiej Marynarki Wojennej Holandii chce zdobyć niezbędne doświadczenie, które pomoże określić ewentualną dalszą rozbudowę floty pojazdów elektrycznych w bazie. Pierwsze wrażenia kierowców są bardzo pozytywne. Decydującą rolę odgrywają tutaj komfort jazdy, cisza i siła uciągu auta. Niezbędne urządzenia do ładowania znajdują się na terenie portu morskiego. Pojazd BEV otrzy-

¹ <https://www.scania.com/nl/nl/home/about-scania/newsroom/news/2023/koninklijke-marine-neemt-eerste-elektrische-scania-in-gebruik.html>; <https://zbiam.pl/krolewska-holenderska-marynarka-wojenna-wprowadzila-do-uzytku-pierwsza-elektryczna-ciezarowke/>; J. Brach, *Holenderska Królewska Marynarka Wojenna wprowadza do użytku pierwszą elektryczną Scanię 25P do zaopatrywania okrętów w porcie*, <https://transport40.com/holenderska-krolewska-marynarka-wojenna-wprowadza-do-uzytku-pierwsza-elektryczna-scanie-25p-do-zaopatrywania-okretow-w-porcie/>.

mał złącze ładowania CCS. Przy ładowaniu prądem stałym o mocy 130 kW pięć akumulatorów zostaje naładowanych do 80% pojemności w mniej niż 55 minut. Samochód można również ładować poprzez hamowanie rekuperacyjne. Będzie on używany głównie na terenie portu marynarki wojennej w Den Helder, gdzie będzie wykonywał zadania o typowo logistycznym charakterze, zasadniczo służąc do zaopatrywania w porcie okrętów operacyjnych. W takim zastosowaniu napęd w pełni elektryczny może się sprawdzić – prace załadowcze mogą być bowiem wykonywane bez hałasu nawet nocą.

Należy założyć zatem, że właśnie pojazdy wykorzystywane przez armie do wykonywania takich prac będą elektryfikowane najszybciej. Warianty w pełni elektryczne, szczególnie te cięższe – klasy tonażowej średniej czy tym bardziej ciężkiej, w siłach zbrojnych w pierwszym etapie będą służyć do realizacji klasycznych prac logistycznych – zaopatrzeniowych w bazach materiałowych położonych w kraju macierzystym czy przewozów między takimi bazami, gdy jednak odległości między nimi nie przekroczą 150-200 km przy braku możliwości doładowania na trasie oraz 250-300 km, gdy taka opcja istnieje. Najczęściej wybieranymi zabudowami będą: skrzyniowa, być może uzupełniona o zakabinowy żuraw, kurtynowa, furgonowa, chłodnicza/izotermiczna z możliwością niezależnego zasilania agregatu z paneli słonecznych zamocowanych na tym nadwoziu. Powyższe naturalnie nie wyklucza prób i wdrożeń wojskowych z systemami wykazującymi większe chwilowe zapotrzebowanie na energię, jak wywrotki czy systemy załadowcze (hakowe). Zarazem takie pojazdy nie będą wysyłane na misje zagraniczne, przede wszystkim bojowe, gdy o dostawę energii może być zwyczajnie trudno (energia i paliwa na takich misjach zazwyczaj są dobrem wyjątkowo rzadkim i cennym).

Trudno też obecnie wyrokować, jak długo potrwa ta faza. Można przyjąć, że nawet kilka/kilkanaście lat, a okres jej trwania będzie silnie uzależniony od licznych elementów i czynników niezwykle trudnych w przewidywaniu (prognozowaniu). Wśród nich wymienić trzeba m.in.:

- tempo, koszty oraz kierunki zachodzenia pełnej elektryfikacji w segmencie cywilnym,
- dojrzałość technologii elektryfikacyjnych, pozwalającą na ich bezproblemowy montaż w pojazdach wojskowych pozalogistycznych,
- wolę polityczną,
- zadania stawiane przed danymi armiami i możliwość ich skutecznej realizacji w momencie postępującej elektryfikacji konkretnych typów sprzętu/taboru,
- dalszą komercyjną dostępność tradycyjnych jednostek i układów napędowych,
- ogólną światową sytuację geopolityczną.

Zadania typowo logistyczne, realizowane przy użyciu zabudowy kurtynowej czy furgonowej, zaliczają się naturalnie pod względem energetycznym do najłatwiejszych. Nie wymagają mianowicie dodatkowego pokładowego zaopatrywania w energię nadwozia. Problem pojawia się, gdy taka konieczność zaistnieje, co występuje w odniesieniu do zabudów specjalizowanych i specjalistycznych, w tym

o długotrwałym i względnie znacznym zapotrzebowaniu na energię, jak wojskowe systemy radarowe, WRE czy łączności. W takiej sytuacji każda konsumpcja energii z pokładowych baterii przez urządzenia zabudowy – przy zadanej pojemności baterii – oznacza skrócenie zasięgu, niekiedy wręcz dramatyczne. Wówczas albo instaluje się pokładowe baterie o większej pojemności, ze wszystkimi tego negatywnymi następstwami, jak wzrost ceny tak skompletowanego pojazdu (nieraz potencjalnie znaczny) i spadek ładowności, albo pewne rozwiązanie stanowi wprowadzenie tzw. przedłużacza zasięgu w postaci dodatkowo zamontowanego w pojeździe w pełni elektrycznym zwiększacza zasięgu (*range extender*). Takim przedłużaczem zasięgu jest silnik spalinowy, ale mniejszy i słabszy niż w modelach typowo hybrydowych. Bazowo taki pojazd opiera się więc nadal na napędzie w pełni elektrycznym. Natomiast spalinowy przedłużacz zasięgu jest uruchamiany w sytuacjach:

- większego chwilowego zapotrzebowania na energię,
- długotrwałej pracy urządzeń zabudowy wymagających zasilania energetycznego,
- doładowania baterii pokładowych, gdy poziom energii w nich zgromadzonej osiągnie tzw. wartość krytycznie niską. Ma to pomóc w dalszej realizacji zadań czy/i możliwości późniejszego bezpiecznego powrotu do bazy.

3.2. Problematyka przedłużaczy – zwiększaczy zasięgu

Takie właśnie przedłużacze – zwiększacz zasięgu stosuje się w elektrycznych karetkach i pożarniczych pojazdach ratowniczo-gaśniczych². Przykładowo taki pojazd opracował znany austriacki koncern Rosenbauer. Pojazd ten w formie studialnego prototypu o nazwie CFT (*Concept Fire Truck*) został zaprezentowany w 2017 roku, a w oparciu o niego przygotowano przedseryjny model o nazwie RT (*Revolutionary Technology*). W tych przypadkach w sferze spalinowego napędu dodatkowego Rosenbauer współpracował z BMW Group, z którą już od dawna współdziałał przy realizacji innych projektów. Specjalne partnerstwo rozwojowe z BMW Group dla CFT rozpoczęło się dokładnie w 2014 roku. Dla wzrostu zasięgu, jako tzw. zwiększacz – przedłużacz zasięgu, został tu wdrożony 6-cylindrowy silnik wysokoprężny do aut osobowych o pojemności 3 l i mocy 200 kW. Dlatego potem Rosenbauer chciał włączyć ten wysoko wydajny silnik do rozwoju przedseryjnego modelu RT i mógł z powodzeniem kontynuować współpracę rozwojową z BMW Group oraz zawrzeć stałą umowę na dostawę 6-cylindrowych silników wysokoprężnych B57 z fabryki silników BMW w austriackim Steyr. W układzie konstrukcyjnym energia ze zwiększacza zasięgu napędza generator z modułowego systemu napędowego Volvo za pośrednictwem skrzyni rozdzielczej.

² <https://innovation.rosenbauer.com/de/concept-fire-truck/>; <https://www.rosenbauer.com/de/int/group/presse/wirtschaftspresse/wirtschaftspresse-detail/nd/rosenbauer-startet-den-internationalen-verkauf-seiner-rt-modellreihe-mit-hybridem-antrieb>; <https://www.rosenbauer.com/de/int/presse/fachpresse/nd/vorhang-auf-fuer-den-rt>.

W takiej sytuacji można przyjąć, że montaż zwiększająca zasięgu stanowi *de facto* nie wyjście docelowe, lecz zapewne przejściowe (na lata?) i suboptymalne. Wynika on z nadal notowanych ewidentnych niedoskonałości technologii akumulatorów – ich zbyt małej pojemności na jednostkę masy (kWh/kg) oraz oznacza:

- wzrost kosztów;
- wzrost stopnia skomplikowania budowy tak skonfigurowanego pojazdu;
- konieczność mimo wszystko zabierania tradycyjnego paliwa, chociaż w ilości zdecydowanie mniejszej, niż gdyby napęd stanowił jedynie konwencjonalny silnik spalinowy bądź byłby używany napęd hybrydowy – spalinowo-elektryczny;
- zabranie przestrzeni w pojeździe, która mogłaby być spożytkowana na inne, bardziej militarnie konieczne cele. Naturalnie dzisiaj wiele pojazdów pancernych, jak wozy bojowe i czołgi, wyposaża się w spalinową jednostkę pomocniczą – tzw. napęd pomocniczy APU (*Auxiliary Power Unit*). Przy czym ma on służyć jedynie do zasilania niezbędnych systemów pokładowych, tak by nie trzeba było w tym celu uruchamiać silnika zasadniczego, co podnosi koszty (większe zużycie paliwa) oraz ułatwia wykrycie pojazdu (wzrost jego sygnatury termalnej). APU nie służy więc do przejmowania roli zasadniczego napędu pojazdu. W efekcie może to być lekki i kompaktowy silnik spalinowy o mocy kilkunastu/kilkudziesięciu kW. Tymczasem moc zwiększająca zasięgu, ze względu na stawiane przed nim bazowe wymagania, musi być kilkakrotnie wyższa, co przekłada się na konieczność montażu większej i cięższej jednostki napędowej. To klasyczny duomat, trudny do rozwiązania, analogicznie jak trilemat pancerny (wysokie siła ognia, stopień ochrony i mobilność przy jak najmniejszej masie własnej i jak najniższych kosztach).

Oczywiście nie wyklucza to dalszych prac projektowych nad pełną elektryfikacją. Jednocześnie należy zaznaczyć, że pełna elektryfikacja pojazdów wojskowych już teraz może wykazywać ograniczony sens, przede wszystkim gdy:

- są to pojazdy przewidziane do eksploatacji wyłącznie w kraju macierzystym,
- w kraju macierzystym nie ma problemów z dostawami taniej i najlepiej ekologicznie powstałej energii elektrycznej (panele fotowoltaiczne, elektrownie wodne i wiatrowe, elektrownie atomowe),
- dane siły zbrojne zwyczajnie stać na taką modernizację i skokowe, wręcz rewolucyjne unowocześnienie w tej sferze.

Taka właśnie sytuacja w znacznej mierze występuje w Stanach Zjednoczonych. Armia tego państwa ma około 170 000 pojazdów nietaktycznych³, głównie lżejsze samochody i ciężarówki, których używa w bazach wojskowych. Do tego dochodzi 240 000 pojazdów taktycznych używanych w strefach konfliktów i walk, które mają przejść jako pierwsze na pojazdy hybrydowe. Tym bardziej, że napęd hybrydowo-

³ <https://mwi.usma.edu/the-lethality-case-for-electric-military-vehicles/>.

-elektryczny (HED) może zmniejszyć zużycie paliwa o około 35%⁴. Dlatego to właśnie takie lekkie nietaktyczne pojazdy różnych typów wręcz idealnie nadawałyby się do elektryfikacji. Co więcej, armia amerykańska już zobowiązała się do wystawienia do 2027 roku „całkowicie elektrycznej floty lekkich pojazdów nietaktycznych”⁵. Powyższe zaszło po udanych programach pilotażowych, a korpus piechoty morskiej czyni postępy w kierunku elektryfikacji swojej floty nietaktycznych pojazdów kołowych w wybranych bazach i inwestuje w stacje ładowania jako środek oszczędnościowy.

3.3. Prace australijskie nad pojazdem w pełni elektrycznym⁶

W sierpniu 2022 roku odbył się pokaz całkowicie elektrycznego chronionego – opancerzonego pojazdu wojskowego Bushmaster (ePMV) podczas prezentacji ukazującej, w jaki sposób siły obronne staną się „gotowe na przyszłość”. W ramach tej elektryfikacji pojazd jest zasilany akumulatorem zapewniającym maksymalny zasięg w trybie całkowicie elektrycznym 100 km. ePMV można również skompletować z większym akumulatorem, gwarantującym zasięg do 300 km. Wersja w pełni elektryczna zostanie przetestowana w celu zbadania przydatności i innych czynników, ale oczekuje się, że ostatecznie ePMV wejdzie do użytku z hybrydowym napędem elektrycznym o mocy 140 kW i stałym momentem obrotowym 480 Nm, z silnikiem wysokoprężnym, działającym jako przedłużacz zasięgu. Dodanie akumulatora daje pojazdowi dodatkową „supermoc” w terenie i zmniejsza zależność od logistyki paliw kopalnych. Do tego dochodzi oczywiście możliwość całkowicie bezgłośnej jazdy, przynajmniej wtedy, gdy silnik wysokoprężny nie zostaje uruchomiony. 11-tonowy pojazd 4×4 z ochroną przeciwwybuchową i balistyczną ma ładowność 4 t i zapewnia ochronę przed minami i improwizowanymi urządzeniami wybuchowymi, odłamkami artylerii oraz ostrzałem z broni strzeleckiej. W terenie zoptymalizowany system zarządzania energią może zapewnić 24-36 godzin pracy w trybie cichym przy zasilaniu wyłącznie bateryjnym. W oświadczeniu udostępnionym przez Departament Obrony wiceminister Matt Thistlethwaite powiedział, że nowy ePMV reprezentuje kolejny innowacyjny etap w tej tradycji⁷. Bushmaster ePMV będzie testowany w celu określenia jego przydatności w terenie.

⁴ <https://defensecommunities.org/2021/11/dod-sending-private-sector-a-signal-about-its-electric-vehicle-commitment-hicks-says/>.

⁵ <https://mwi.usma.edu/the-lethality-case-for-electric-military-vehicles/>.

⁶ <https://www.thedefensepost.com/2022/08/11/australia-bushmaster-electric-vehicle/> oraz informacje na temat pojazdu koncernu Thales Australia.

⁷ Tamże.

3.4. Prace amerykańskie nad lekkim pojazdem terenowym z ogniwami paliwowymi

Wodorowe ogniwa paliwowe można również łączyć z akumulatorami i silnikami elektrycznymi. Armia USA eksperymentowała z lekką ciężarówką GM (General Motors) ZH2⁸ napędzaną układem z ogniwami paliwowymi, wykazującą większość takich samych zalet jak pojazd elektryczny, ale zasilaną wodorem zamiast ładowania akumulatora. Szczególnie, że technologia ogniw paliwowych szybko ewoluuje wraz z technologią akumulatorów i stanowi kolejną opcję, którą wojsko powinno dokładnie rozważyć w przypadku pojazdów taktycznych. Tym bardziej, że na Hawajach Siły Powietrzne Stanów Zjednoczonych obsługiwały już prototypy zasilanych wodorem, nietaktycznych pojazdów. Te zmiany wskazują, że seryjne hybrydowe – elektryczno-wodorowe – układy napędowe są znacznie bardziej przyszłościowe niż inne architektury pojazdów, gdyż ich zbiorniki paliwa oraz pokładowe generatory można skonfigurować do pracy na innym paliwie (takim jak wodór) lub nawet wymienić na inne systemy wytwarzania energii (jak ogniwa paliwowe).

Ponieważ w sytuacji taktycznej ostatnią rzeczą, jakiej chce żołnierz, jest ujawnienie swojej pozycji wrogowi, pojazd elektryczny – oznaczony jako ZH2 – na wodorowe ogniwa paliwowe ma zapewnić ten ważny element ukrycia. Pojazd ten przygotowany i pokazano w 2017 roku. W układzie kompletacyjno-konstrukcyjnym to w zasadzie zmodyfikowany lekki Chevrolet (Chevy) Colorado, wyposażony w wodorowe ogniwo paliwowe i napęd elektryczny. Został złożony dość szybko, od maja do września, a jeszcze w tym roku był testowany przez żołnierzy w warunkach polowych.

Przede wszystkim ZH2 jest cichy i trudno wykrywalny w różnych spektrach, gdyż jego układ napędowy nie wytwarza dymu, hałasu, zapachu ani sygnatury termicznej. GM opracował ten samochód i związane z nim technologie, by zapewnić żołnierzom szereg innych korzyści, takich jak:

- wytwarzanie relatywnie wysokiego momentu obrotowego przez silniki elektryczne *de facto* już od startu, co przekłada się na wysoką dynamikę,
- wyposażenie w 37-calowe opony, umożliwiające pokonywanie nierównego i stromego terenu,
- fakt, że wodorowe ogniwo paliwowe może wyprodukować dwa galony (jeden galon amerykański cieczy to nieco ponad 3,78 l) wody pitnej na godzinę, co odgrywa ważną rolę w trakcie realizacji zadań w warunkach pustynnych czy innych, gdy notowane są braki w zaopatrzeniu,
- fakt, że kiedy pojazd się nie porusza, może generować 25 kW ciągłej mocy lub 50 kW mocy szczytowej; w dodatku w bagażniku auta znajdują się gniazda 120 i 240 V, co ułatwia zasilanie urządzeń zewnętrznych,
- wyposażenie w wyciągarkę na przednim zderzaku, by ułatwić działanie w ekstremalnie niesprzyjającym otoczeniu drogowym.

⁸ D. Vergun, *Army showcases stealthy, hydrogen fuel cell vehicle*, 30 stycznia 2017, https://www.army.mil/article/181342/army_showcases_stealthy_hydrogen_fuel_cell_vehicle.

Podczas gdy GM opracował technologię i wyprodukował demonstrator, rolą armii będzie przetestowanie i ocena pojazdu w rzeczywistych warunkach polowych.

W ZH2 energia elektryczna napędza pojazd, ale nie pochodzi ona z akumulatorów, takich jak te występujące we współczesnych samochodach elektrycznych. Zamiast tego energia elektryczna jest wytwarzana z wysoko sprężonego wodoru, magazynowanego w pojeździe, a powstałego w wyniku reakcji elektrochemicznej. Niemniej problem wciąż stanowi wysoka cena pozyskiwania czystego i tym bardziej zielonego wodoru. Ta energia elektryczna może pochodzić z sieci lub ze źródeł odnawialnych, takich jak wiatr lub słońce. Przy czym istniejące paliwa, takie jak benzyna, propan i gaz ziemny, też mogą być wykorzystywane do pozyskiwania wodoru. Armia USA i GM porównują koszty i korzyści dla każdego podejścia i jeszcze nie ustalili, którą opcję zastosować. Niemniej koszt produkcji wodoru nie jest jedynym czynnikiem komplikującym; innym jest brak stacji tankowania wodoru. Do celu testów w terenie armia planuje przechowywać paliwo wodorowe w kontenerze ISO.

Kolejny koszt dotyczy samego układu napędowego z wodorowymi ogniwami paliwowymi. Stosy ogniw paliwowych pod maską przekształcają wodór i powietrze w użyteczną energię elektryczną. Składają się one ze stosów płytek i membran pokrytych platyną. W demonstratorze ZH2 jest około 80 g platyny, co kosztuje tysiące dolarów. Jednak przewidywano, że w ciągu kilku miesięcy specjaliści GM zdołają zredukować tę masę platyny do zaledwie 10 g potrzebnych do wyprodukowania działającego pojazdu. Szczególnie że udoskonalanie współczesnego silnika spalinowego na gaz i olej napędowy zajęło sto lat. Tymczasem GM próbował dokonać znaczącego postępu za pomocą wodorowych ogniw paliwowych w ciągu zaledwie kilku miesięcy. To ogromne przedsięwzięcie. Udoskonalenie projektu oznacza zaś obniżenie kosztów i zapewnienie trwałości, niezawodności i wysokiej wydajności. Rafinacja nie oznacza tylko zużycia mniejszej ilości platyny. W projekt włączono także wiele innych dziedzin nauki. Kwestia dotyczyła m.in. zaprojektowania zaawansowanych pomp, czujników czy sprężarek współpracujących z technologią ogniw paliwowych. Niezaprzeczalną korzyścią pozostają jednak imponujące osiągi ZH2 jak na tak szybko produkowany pojazd. Na przykład ogniwo paliwowe wytwarza od 80 do 90 kW mocy, a po dodaniu akumulatora buforowego prawie 130 kW. Auto natychmiast wytwarza moment obrotowy na poziomie 236 lb.-ft (funtów na stopę/320 Nm), przekazywany przez silnik do skrzyni rozdzielczej. Do tego zasięg na jednym tankowaniu wynosi około 150 mil/240 km, ponieważ jest to pojazd demonstracyjny. Specjaliści z GM stwierdzili mianowicie, że w egzemplarzach seryjnych (przedserijnych), nie eksperymentalno-prototypowych, zasięg będzie zapewne znacznie większy.

Ogólnie, chociaż technologia wodorowych ogniw paliwowych w pojazdach wciąż czeka na pełniejszą komercjalizację, to GM pracuje intensywnie nad tym, by ona nastąpiła, co ma zajść „w najbliższej przyszłości”, lecz w zależności od wielu czynników, głównie od dostępności stacji tankowania paliw – np. taniego i najlepiej ekologicznie powstałego wodoru. Zarazem sama ta technologia nie jest obca armii amerykańskiej. Pojazdy Equinox firmy GM, napędzane wodorowymi ogniwami paliwo-

wymi, są bowiem używane w kilku lokalizacjach. Różnica polega na tym, że ZH2 to pierwszy pojazd zasilany wodorowymi ogniwami paliwowymi, który przeszedł terenowe próby taktyczne. Wartość przetestowania tego pojazdu przez armię polega na tym, że będzie on agresywnie prowadzony w terenie przez żołnierzy, którzy mogą przekazać swoje prawdziwe opinie przedstawicielom armii i GM. Oprócz zbierania subiektywnych opinii żołnierzy pojazd zawiera rejestratory danych dostarczające również obiektywne dane.

W 2017 roku testerzy sprawdzali ten pojazd w Fort Bragg w Północnej Karolinie, Fort Carson w Kolorado, Fort Benning w Georgii, bazie piechoty morskiej Quantico w Karolinie Północnej oraz na własnym poligonie doświadczalnym GM w Michigan.

Paul Rogers, dyrektor TARDEC (The U.S. Army Tank Automotive Research, Development and Engineering Center – Centrum Badań, Rozwoju i Inżynierii Czołgów i Pojazdów Samochodowych Armii Amerykańskiej), stwierdził: „Szybkość, z jaką można demonstrować i oceniać innowacyjne pomysły, jest powodem, dla którego relacje z przemysłem są tak ważne dla armii. Ogniwia paliwowe mają potencjał do znacznego rozszerzenia możliwości pojazdów wojskowych dzięki cichej pracy, eksportowanej mocy i solidnemu momentowi obrotowemu, wszystkie postępy, które skłoniły nas do zbadania tej technologii i dalszych działań”⁹.

Po rozpoczęciu testów ZH2 armia musiała ocenić zdolność pojazdu do cichej jazdy, zmniejszonej akustyki i termiki, dostępnego momentu obrotowego przy wszystkich prędkościach obrotowych dzięki napędowi elektrycznemu oraz niskiego zużycia paliwa w całym zakresie operacyjnym. Zarazem GM promuje Colorado ZH2 jako pojazd terenowy odpowiedni dla szerokiego grona potencjalnych użytkowników. W tym kontekście, sprawdzając go, armia nauczy się wszelkich ograniczeń i wyzwań w tej sferze, co może zdziałać system napędowy na ogniwa paliwowe, kiedy zostanie naprawdę wystawiony na próbę.

3.5. Porównanie przez specjalistów amerykańskich pojazdów z klasycznym układem napędowym, hybrydowych, elektrycznych ze zwiększaczem zasięgu i w pełni elektrycznych¹⁰

Specjaliści amerykańscy postanowili przeanalizować wybrane aspekty elektryfikacji układów napędowych trzech rodzajów terenowych lżejszych kołowych pojazdów typowo wojskowych. W analizie tej uwzględniono zatem trzy odmienne pojazdy

⁹ <https://aglomerado.digital/en/chevrolet-colorado-zh2-usa/>.

¹⁰ V. Mittal, B. Novoselich, A. Rodriguez, *Hybridization of US Army combat vehicles*, SAE Technical Paper 2022-01-0371, 2022 2022-03-29, <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2022-01-0371/preview/>.

pod kątem hybrydyzacji ich układów napędowych oraz wprowadzenia układów w pełni elektrycznych. Były to:

- *Infrantry Squad Vehicle (ISV)* – lekki pojazd sił specjalnych zdolny zabrać do dziewięciu żołnierzy, o ładowności 1500 kg i dopuszczalnej masie całkowitej 2400 kg, zajmujący powierzchnię 2,7 m² i napędzany przez 275-konny silnik. Pojazd ten jest produkowany przez koncern General Motors, a w układzie konstrukcyjnym bazuje na platformie modelu Chevrolet Colorado ZR2.
- *High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle (HMMWV)* – popularnie zwany Humvee, samochód o dopuszczalnej masie całkowitej 3700 kg i zajmowanej powierzchni 3,6 m², napędzany przez silnik 190-konny.
- *Joint Light Tactical Vehicle (JLTV)* – planowany jako docelowy następca HMMWV – samochód o dopuszczalnej masie całkowitej 11 000 kg i zajmowanej powierzchni 5 m², napędzany przez silnik 340-konny.

Należy zauważyć, że jeśli pojazd przechodzi proces elektryfikacji jego układu napędowego, staje się wyraźnie cięższy wskutek większej masy jednostkowej i mniejszej ilości energii przypadającej na jednostkę masy (0,8 MJ/kg) niż porównywalnej ilości tradycyjnego paliwa – oleju napędowego (ilości paliwa zapewniającej analogiczną ilość energii niezbędnej do poruszania się) – 44 MJ/kg. Dlatego w tej analizie przyjęto, że wzrost masy własnej pojazdu wskutek elektryfikacji jego układu napędowego został ustalony na 500 kg dla ISV i HMMWV oraz 1000 kg dla JLTV. Takie masy wybrano, by pozwolić pojazdom zabrać odpowiednią liczbę baterii (liczbę baterii o określonej pojemności), żeby zagwarantować akceptowalny zasięg. Niemniej wzrost masy własnej będzie tu negatywnie kompensowany przez spadek ładowności bądź/i spadek opancerzenia. W takim układzie zasadniczy cel polegał na tym, by wzrost masy własnej i całkowitej poszczególnych typów pojazdów dało się utrzymać na możliwe najniższym poziomie. Zarazem:

- wariant tradycyjny to wariant nadal napędzany tradycyjnym silnikiem spalinowym,
- wariant hybrydowy to tzw. hybryda równoległa, zaopatrzona w standardowe baterie litowo-jonowe (Li-ion), podobne do tych montowanych w nowoczesnych cywilnych autach elektrycznych,
- wariant elektryczny ma zwiększacz zasięgu – w roli tego zwiększacza wystąpił silnik Wankla (*rotary diesel engine* – silnik z tłokiem obrotowym) o mocy 40 KM; przy tym dla tej analizy ustalono pojemność zbiornika tradycyjnego paliwa na 15 l, by zapewnić odpowiednią ilość miejsca na baterie,
- wariant w pełni elektryczny to wariant jedynie z pokładowymi bateriami litowo-jonowymi.

Na podstawie tych założeń wyspecyfikowano dodatkowe komponenty niezbędne do elektryfikacji pojazdów oraz oceniono ich podstawowe cechy/parametry (tab. 1).

W oparciu o te podzespoły przeanalizowano elektryfikację wszystkich trzech typów samochodów, każdorazowo rozpatrując jako bazę napęd tradycyjny oraz

Tabela 1. Specyfikacja komponentów dodanych do pojazdów w celu ich elektryfikacji

Komponent	Parametr	Wartości
Silnik	Gęstość mocy	4 kW/kg
Inwerter	Masa	100 kg
Dodatkowe okablowanie	Masa	10 kg
Pozostałe akcesoria – komponenty	Masa	10 kg
Baterie	Gęstość energii	220 Whr/kg
Baterie	Efektywność – sprawność ładowania	90,00%
Seryjny zespół hybrydowy (<i>Hybrid engine</i>) – masa dodatkowego silnika elektrycznego	Masa wraz z alternatorem	40 kg
Zespół hybrydowy	Sprawność konwersji	35,00%

Źródło: V. Mittal, B. Novoselich, A. Rodriguez, *Hybridization of US Army combat vehicles*, SAE Technical Paper 2022-01-0371, 2022 2022-03-29, <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2022-01-0371/preview/>.

elektryfikację przeprowadzoną na trzy sposoby – poprzez hybrydyzację oraz wprowadzenie czystego układu w pełni elektrycznego i układu elektrycznego ze zwiększaniem zasięgu. W ramach zrealizowanych badań dla ogółu rozpatrywanych aut wyliczono wartości uznane tu za kluczowe – były nimi: masa paliwa, masa baterii trakcyjnych, masa całkowita pojazdu, zasięg w trybie autostradowym i miejskim, czas i zasięg w trybie jazdy cichej oraz zużycie paliwa (tab. 2 i 3).

Tabela 2. Dane porównawcze wyliczone dla pojazdu HMMWV*

Dane	Napęd standardowy	Napęd hybrydowy	Napęd elektryczny ze zwiększaniem zasięgu	Napęd czysto elektryczny – w pełni elektryczny
Masa paliwa (kg)	80,8	80,8	16,2	0
Masa baterii trakcyjnych (kg)	0	245	481	537
Masa całkowita pojazdu (kg)	3500	4000	4000	4000
Zasięg w ruchu autostradowym (km)	284	321	143	86
Zasięg w ruchu miejskim (km)	217	275	151	91
Czas jazdy w trybie cichym (min)	0	155	305	341
Dystans w trybie cichym (km)	0	57	112	125
Zużycie paliwa (kg/100 km)	32,2	31,2	24,5	25

* W przypadku poruszania się w trybie cichym elektrycznym czas i dystans są wyliczone przy założeniu poruszania się ze stałą prędkością 10 mil/godz. (mph).

Źródło: V. Mittal, B. Novoselich, A. Rodriguez, *Hybridization of US Army combat vehicles*, SAE Technical Paper 2022-01-0371, 2022 2022-03-29, <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2022-01-0371/preview/>.

Tabela 3. Dane porównawcze wyliczone dla pojazdu ISV*

Dane	Napęd standardowy	Napęd hybrydowy	Napęd elektryczny ze zwiększaczem zasięgu	Napęd czysto elektryczny – w pełni elektryczny
Masa paliwa (kg)	67,8	67,8	16,2	0
Masa baterii trakcyjnych (kg)	0	245	481	537
Masa całkowita pojazdu (kg)	2270	2770	2770	2770
Zasięg w ruchu autostradowym (km)	308	322	163	98
Zasięg w ruchu miejskim (km)	214	284	178	107
Czas jazdy w trybie cichym (min)	0	219	431	481
Dystans w trybie cichym (km)	0	80	158	176
Zużycie paliwa (kg/100 km)	26	26,5	21,1	21,5

* W przypadku poruszania się w trybie cichym elektrycznym czas i dystans są wyliczone przy założeniu poruszania się ze stałą prędkością 10 mil/godz. (mph).

Źródło: V. Mittal, B. Novoselich, A. Rodriguez, *Hybridization of US Army combat vehicles*, SAE Technical Paper 2022-01-0371, 2022 2022-03-29, <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2022-01-0371/preview/>.

Na podstawie przeprowadzonej analizy, uwzględniającej przyjęte kryteria i założenia, autorzy doszli do następujących wniosków.

Pojazdy z napędem tradycyjnym – jedynie spalinowym – cechują się najniższą masą własną oraz znacznym zasięgiem, zarówno w ruchu autostradowym, jak i miejskim. Niemniej zarazem na przebycie 100 km zużywają najwięcej paliwa. Nie mogą się także w ogóle poruszać w trybie cichobieżnym.

Napęd w pełni elektryczny przekłada się na najwyższą masę własną pojazdu. W dodatku taki pojazd wyróżnia się najmniejszym zasięgiem i na autostradzie, i w mieście. Jednak – z drugiej strony – wykazuje największy zasięg i czas jazdy w trybie cichym, bo jedynie w nim się może poruszać, a jego zużycie paliwa należy do najniższych z wyliczonych.

W tym układzie napędy hybrydowy oraz elektryczny ze zwiększaczem zasięgu stanowią pewne wyjście pośrednie między systemami napędowymi klasycznymi oraz w pełni elektrycznymi.

Napęd hybrydowy zapewnia największy zasięg ze wszystkich rozpatrywanych tu opcji – jest to zasięg nawet większy niż dla napędu klasycznego – czysto spalinowego – oraz zdecydowanie większy niż dla napędu w pełni elektrycznego. Do tego napęd hybrydowy zabezpiecza największy zasięg w trakcie trudnego ruchu miejskiego, wiążącego się z licznymi operacjami hamowania, przyspieszania i zatrzymywania się oraz manewrowania. Przy tym zużycie paliwa kształtuje się na poziomie porównywalnym ze zużyciem paliwa notowanym przez tradycyjny odpowiednik. Natomiast napęd elektryczny ze zwiększaczem zasięgu gwarantuje około

dwukrotnie dłuższy czas jazdy i wobec tego dwukrotnie większy pokonany dystans w trybie jazdy cichej niż napęd hybrydowy. Co więcej, ze wszystkich analizowanych tu opcji napęd elektryczny ze zwiększaczem zasięgu gwarantuje najniższe zużycie paliwa, nieco niższe nawet niż w odniesieniu do napędu w pełni elektrycznego. Pojazd elektryczny ze zwiększaczem zasięgu może też mieć nieco mniejsze akumulatory niż wersja w pełni elektryczna. Tym samym odmiana w pełni elektryczna wykazuje swoją przewagę nad innymi rozpatrywanymi tutaj napędowymi opcjami jedynie w sferze możliwości najdłuższego przemieszczania się w trybie cichym – może w nim wobec tego pokonać najdłuższy dystans. To z kolei prowadzi do przedstawienia następujących wniosków, formułowanych z punktu widzenia sił zbrojnych i zadań przed nimi stawianych.

1. Napęd klasyczny wciąż wykazuje wiele kluczowych militarnych zalet, szczególnie w kwestii autonomii paliwowej oraz masy własnej pojazdu – autonomia zalicza się do największych, z kolei masa do najniższych, ze wszelkimi tego pozytywnymi następstwami, jak masa opancerzenia czy zabieranego sprzętu/wyposażenia dodatkowego.

2. Napędy hybrydowy i elektryczny ze zwiększaczem zasięgu zabezpieczają akceptowalne zasięgi w powiązaniu z możliwością poruszania się w trybie w pełni cichym. Przy czym napęd hybrydowy zabezpiecza największy zasięg ze wszystkich rozpatrywanych tu napędowo-paliwowych przypadków. Napęd elektryczny ze zwiększaczem zasięgu gwarantuje około dwukrotnie większy zasięg w trybie w pełni elektrycznym niż napęd hybrydowy. Wykazuje również najniższe ze wszystkich analizowanych opcji zużycie paliwa, podczas gdy zużycie paliwa przy napędzie hybrydowym realnie kształtuje się na poziomie zużycia paliwa notowanym jak przy napędzie tradycyjnym – jedynie z silnikiem spalinowym.

Nie ma więc wyjścia idealnego. Zarazem specjaliści amerykańscy nie analizowali w tej sytuacji kwestii ekonomicznych – związanych z zakupem i militarnym TCO – oraz odnoszących się do ogólnych wymagań logistycznych i bezpieczeństwa użytkownika na polu walki. Skupili się jedynie na zagadnieniach dotyczących tematyki konstrukcyjnej i w znacznej mierze eksploatacyjnej. Niemniej:

- Najwięcej czysto militarnych zalet ma napęd hybrydowy. Za pewne rozwiązanie suboptymalne trzeba uznać napęd elektryczny ze zwiększaczem zasięgu.
- Zasadnicza przewaga napędu w pełni elektrycznego dotyczy wyłącznie możliwości najdłuższej, i co do czasu, i co do zasięgu, jazdy w trybie cichym. Jednak wykazywane w tym zakresie przewagi w stosunku do napędu elektrycznego ze zwiększaczem zasięgu nie są znaczne – różnica na korzyść napędu w pełni elektrycznego została określona na około 10%, co w warunkach bojowych może mieć drugorzędne znaczenie, gdy liczyć się będzie głównie zasięg bezwzględny uzyskiwany przez dany pojazd w ogóle. Tym bardziej, że od praktycznie żadnego/zdecydowanej większości pojazdów, oprócz wybitnie niszowych, specyficznych dla jednostek specjalnych, nie wymaga się jedynie poruszania w trybie wyłącznie cichym. Jednocześnie w większości innych rozpatrywanych ważnych

wojskowo aspektów, jak zasięg na autostradzie i w ruchu miejskim oraz masa własna, napęd w pełni elektryczny okazuje się najmniej korzystny. Co więcej, napędy klasyczny – spalinowy i hybrydowy wykazują większe zużycie paliwa niż ten napęd w pełni elektryczny na poziomie około 20%. Trudno jest ocenić, czy to dużo, czy mało, gdyż w tej analizie trzeba jeszcze wziąć pod uwagę zużycie energii niezbędne do dostarczenia energii/paliwa do danego pojazdu w danych warunkach eksploatacyjnych.

- Jakakolwiek elektryfikacja układu napędowego wiąże się ze wzrostem masy tak wyekwipowanego pojazdu. Nie jest to jednak wzrost militarnie pożądanym, gdyż przy zadanej masie własnej jego lepszymi wojskowo alternatywami są przykładowo: wzrost masy opancerzenia czy/i możliwość zabrania dodatkowych pozycji wyposażenia. Innymi słowy wzrost masy pojazdu wynikający ze wzrostu masy komponentów jego układu napędowego należy do wybitnie dyskwalifikujących, analogicznie jak jego kompensata przez wzrost masy dopuszczalnej danego środka przewozu. Dochodzi tu bowiem do kolejnego nakręcania bardzo niebezpiecznej spirali wzrostu masy, zapoczątkowanej w pierwszych latach tego stulecia.

Tym samym wybór którejś z konkretnych przedstawionych i analizowanych opcji napędowych w zasadniczym stopniu jest determinowany przez:

1. Cele stawiane przez dane siły zbrojne przed konkretnymi rodzajami taboru:

- tabor tradycyjny i hybrydowy zabezpieczają największy zasięg – autonomię paliwową, zawsze będącą czynnikiem krytycznym;
- fakt, że ze względu na najniższą masę własną pojazdy z napędem klasycznym mogą otrzymywać najcięższe – najbardziej rozbudowane opancerzenie. Niemniej, z drugiej strony, kompletnie inna aranżacja napędu w pełni elektrycznego może zredukować wymiary takiego pojazdu, powodując zmniejszenie powierzchni przeznaczonej do opancerzenia. Zarazem jednak ta korzyść może być łatwo zniwelowana przez potrzebę dodatkowego zabezpieczenia baterii – wprowadzenia ich dodatkowych, subsydiarnych osłon;
- tryb jazdy w pełni cichej okazuje się przydatny przede wszystkim tam, gdzie da się spożytkować jego zalety – tzn. w sytuacji bliskiej styczności z wrogiem czy w pojazdach z założenia przeznaczonych do skrytego operowania na linii frontu (jak zwiadowcze – rozpoznania) albo poza nią, nawet już na terenie kontrolowanym przez przeciwnika (jak pojazdy jednostek specjalnych). Dlatego cichobieżność wariantów typowo logistycznych nie zawsze okazuje się konieczna – dobrze, jeśli da się ją uzyskać, lecz wielokrotnie nie stanowi ona celu samego w sobie;
- specjaliści amerykańscy nie analizowali tu w ogóle problematyki ekonomicznej – kosztów elektryfikacji, bezpieczeństwa militarnego układów w pełni elektrycznych, w szczególności zabezpieczenia baterii przed uszkodzeniami, wybuchami i pożarami, oraz łatwości i szybkości uzupełniania energii/paliwa. We wszystkich tych rozpatrywanych składowych wciąż niewątpliwie szeregiem kluczowych militarnych zalet cechuje się napęd klasyczny – spalinowy,

a za wyjście drugie – pośrednie (*second best*) – należy uznać napęd hybrydowy. Szczególnie że kwestia dotyczy tu jedynie dostaw tego samego paliwa – oleju napędowego, relatywnie łatwego w dystrybucji i przechowywaniu oraz łatwego do zsubsydiowania w warunkach zagrożonej logistyki, przykładowo poprzez jednolite paliwo pola walki. W rezultacie o ile olej napędowy da się zamienić na benzynę czy korozynę, o tyle energii elektrycznej na nic zamienić się nie da.

2. Zadania, jakie dane siły zbrojne mają w ogóle postawione. Czy stawia się bardziej na ich działania obronne na własnym terytorium, czy na działania ekspedycyjne – misje zagraniczne? Przy czym wojny asymetryczne oraz działania prowadzone ze zwiększającym się udziałem dronów i amunicji krążącej powodują, że zapewnienie skrytości i maskowania własnego sprzętu, niezależnie od przewidywanego/założonego teatru walki, stale zyskuje na znaczeniu.

3. Realna możliwość skorzystania z gotowych propozycji komponentowo-produktowych z rynku cywilnego. Większość podzespołów używanych do elektryfikacji pojazdów wojskowych, z powodów głównie kosztowych, walidacyjnych i dostępnościowych, będą to części cywilne w wymaganym zakresie poddane jedynie koniecznej militaryzacji.

Dlatego na tym etapie rozwoju konkretnych rodzajów pojazdów, by dokonać właściwego wyboru, najlepszym wyjściem wydaje się sporządzenie przez wojskowych specjalistów i decydentów macierzy decyzyjnej, w której zasadniczymi rozpatrywanymi składowymi – elementami byłyby:

- masa własna i dopuszczalna pojazdu, przekładająca się na jego ładowność i podatność do opancerzania,
- wymagana minimalna objętość przestrzeni wewnątrz, by pomieścić w niej zakładaną liczbę żołnierzy czy/i innego sprzętu/wyposażenia, przy założonym poziomie ochrony oraz minimalnej wewnętrznej przestrzeni życiowej, bezpośrednio wpływającej na komfort załogi i tym samym skuteczność i efektywność czy sprawność realizowanych przez nią operacji,
- zasięg uzyskiwany w odmiennych scenariuszach działania – jazdy: droga, teren, ruch autostradowy, cykl miejski,
- konieczność poruszania się (czasowego) w trybie cichym,
- zużycie paliwa (energii) na pokonanie 100 km/wykonanie założonego zadania,
- koszt nabycia i wartość militarnych TCO i TCM (*military TCM* – całkowity koszt zapewniania tzw. wojskowej mobilności) w całym cyklu wojskowego życia,
- bezpieczeństwo eksploatacji i bezpieczeństwo w warunkach bojowych,
- wymagania co do mobilności taktycznej – dzielności terenowej – i ewentualnie mobilności strategicznej,
- wymagania logistyczne w warunkach polowych i bojowych – łatwość dostaw paliwa/energii, łatwość tankowania/ładowania, czas tankowania/ładowania, koszt – wydatek logistyczny na tankowanie/ładowanie, wymagania logistyczne (specyficzne) w założonych scenariuszach/teatrach wdrożenia,

- pozaekologiczne – wojskowe korzyści notowane z elektryfikacji układu napędowego,
- wymagania obsługowe, w tym specyficzne, dla poszczególnych rodzajów pojazdów, w tym łatwość skorzystania z cywilnego wsparcia obsługowo-naprawczego w założonych scenariuszach/teatrach wdrożenia.

Tym składowym muszą być oczywiście przyporządkowane określone wagi, wskazujące na znaczenie danego analizowanego czynnika dla danych sił zbrojnych – im wyższa waga, tym wyższe znaczenie konkretnego elementu. Dopiero na podstawie tam sporządzonej dogłębnej i w miarę obiektywnej analizy da się określić, które pojazdy wykazują większą naturalną podatność na elektryfikację oraz – już w ramach samej elektryfikacji – na konkretne jej rodzaje.

Jednocześnie nawet i taka analiza może być obciążona immanentnym błędem. Wynikać on będzie z tego, że aby w ogóle przeprowadzić taką ocenę, należy bezwzględnie dysponować bezspornymi danymi porównawczymi. Tymczasem w tej sytuacji specjaliści amerykańscy mieli tylko realne dane wyjściowe dla modeli podstawowych – klasycznych, podczas gdy parametry wydań zelektryfikowanych określali jedynie na podstawie własnych przypuszczeń i założeń. Mogą się one jednak różnić z rzeczywistością. W związku z tym teoretycznie, by stawiać właściwe wnioski, trzeba mieć odpowiedni materiał porównawczy – tzn. w faktycznych warunkach eksploatacyjnych przebadac ogół rozpatrywanych pojazdów. Niemniej realnie może się to okazać niezwykle trudne ze względu na bardzo wysokie koszty takiej operacji – musiałyby być bowiem zbudowane przynajmniej prototypy wszystkich wydań. Amerykanie na takie wyjście mogą sobie pozwolić, inne kraje, przedsiębiorstwa i armie – już niekoniecznie. Dlatego tę amerykańską analizę, merytorycznie bardzo dobrą, trzeba traktować nie jako wyrocznię, lecz pewną bazę – wyznacznik wskazujący na zasadnicze trendy i notowane wyniki. W rezultacie stanowi ona odpowiedni przyczynek do prowadzenia dalszych pogłębionych i poszerzonych badań w tej materii.

Osobną kwestię, także związaną z możliwością popełnienia określonych błędów, stanowi projekcja przyszłości. W sektorze cywilnym elektryfikacja transportu jest bardziej przeprowadzana na siłę i z przyczyn bardziej politycznych niż wynikających z takiej realnej potrzeby. Sektor cywilny stać też na ewentualne błędy, na jakie sektor militarny pozwolić już sobie nie może. Tym bardziej, że te nowe technologie napędowe trzeba umiejętnie wkomponować w tworzące się odmienne pole walki. Niemniej, co ciekawe, elektryfikacja na tym polu może wykazać wiele specyficznych zalet, jak skrytość funkcjonowania, dopóki przeciwnik nie nauczy się jej umiejętnie osłabiać czy eliminować, przykładowo za pomocą impulsów elektromagnetycznych, powodujących zniszczenie sprzętu elektronicznego i elektrycznego w promieniu rażenia (w tym radarów, elektroniki pojazdów itd.).

3.6. DURO-e – pierwszy całkowicie elektryczny pojazd terenowy 4×4 wprowadzony przez GDELS (General Dynamics European Land Systems)¹¹

DURO to wysoce mobilny terenowy wojskowy pojazd taktyczny i od lat „wół roboczy” armii szwajcarskiej. Nazwa DURO pochodzi od DURable i RObust – trwałe i wytrzymałe. Dzięki wyjątkowo zaprojektowanej modułowej konstrukcji DURO może być modyfikowany w wielu obszarach, aby jeden pojazd mógł wykonywać szeroki zakres zadań – od transportera wojsk, wersji dowodzenia i kontroli po transport logistyczny czy karetkę. W związku z tym GDELS we współpracy z MAGNA – Engineering Center Steyr i Phi-Power postanowił wybrać tę szwajcarską ikonę pojazdu terenowego, aby wprowadzić najnowsze technologie, takie jak hybrydyzacja, elektryfikacja, pokładowe wytwarzanie energii i technologie napędowe potrzebne do działania MUM-T z funkcjami pracy/jazdy automatycznej/autonomicznej.

DURO-e 4×4 był prezentowany po raz pierwszy na Eurosatory 2022 i zawierał całkowicie nowe podstawowe technologie, które mogą być wymagane przez klientów w niedalekiej przyszłości. Główne cechy i zalety DURO-e to:

- cyfrowa architektura pojazdu zgodna ze standardem NGVA,
- wymienny modułowy układ napędowy, począwszy od najnowocześniejszego silnika wysokoprężnego spełniającego normy od Euro 3 do Euro 6, całkowicie elektrycznego układu napędowego w wersji akumulatorowej lub elektrycznej z ogniwami paliwowymi,
- cichy napęd, przyspieszenie i rozszerzone możliwości cichego poruszania się,
- neutralność pod względem emisji CO₂ i ekonomiczna eksploatacja w codziennej służbie wojskowej,
- niska sygnatura cieplna i akustyczna – cichobieżność,
- wysoka efektywność energetyczna i samowystarczalne zaopatrzenie w energię.

¹¹ GDELS – zestaw materiałów prasowych na targi Eurosatory, Paryż, czerwiec 2022 roku.

Wnioski

Globalny rynek motoryzacyjny przesuwają się w kierunku pojazdów zelektryfikowanych. Dlatego w ostatnich latach zarówno wojskowi, jak i producenci oryginalnego sprzętu (OEM) opracowują i testują zelektryfikowane warianty środków przewozu. W takim układzie siły zbrojne powoli muszą naturalnie rozważyć tę alternatywę dla swojego kołowego i gąsienicowego taboru transportowego i bojowego. Szczególnie że modele zelektryfikowane oferują wiele zalet taktycznych w porównaniu z tradycyjnymi odpowiednikami z silnikami wysokoprężnymi, w tym wyższy moment obrotowy przy niższych prędkościach i mniejszą sygnaturę termalną. Niestety jednocześnie pełna elektryfikacja większości pojazdów wojskowych nie jest możliwa ze względu na masę i bezpieczeństwo wymaganego zestawu akumulatorów. Armia może jednak skorzystać z pojazdów zelektryfikowanych dzięki hybrydowym układom napędowym. Opcje hybrydowe pozwalają bowiem na wdrożenie pojazdów cichych i mocnych, które są mniej ograniczone przez technologię akumulatorów. Niemniej sama armia – poza *de facto* amerykańską – nie tworzy rynku (popytu pod względem wielkości) dla wdrażania specjalnych napędowych proekologicznych rozwiązań technicznych, komercjalizowanych wyłącznie czy niemal wyłącznie dla niej. W związku z tym zdecydowana większość opracowań będą to propozycje zapożyczone z sektora cywilnego, w wymaganych szerokości i głębokości jedynie militaryzowane pod kątem specyficznych niekiedy potrzeb sił zbrojnych. Ma to jednak i dobre strony, takie jak:

- dostęp do układów już gotowych i generalnie sprawdzonych oraz – ze względu na ekonomię skali – proponowanych na konkurencyjnych biznesowo warunkach,
- możliwość skorzystania z cywilnej obsługi posprzedażowej.

Niemniej w takich realiach elektryfikacja pojazdów wojskowych powinna być prowadzona z dużym rozmysłem i w tych obszarach, gdzie to rzeczywiście wykazuje sens wdrożeniowy, a nie – jak w przypadku sektora cywilnego – być implementowana na siłę, bardziej nieraz nawet ze względów czysto politycznych niż praktycznych i, wbrew pozorom, środowiskowych. Po prostu wciąż nie wszędzie pojazdy elektryczne się do końca sprawdzą i nie wszędzie mogą być pełnymi zamiennikami klasycznych odpowiedników. Tym bardziej, że siły zbrojne są specyficznym klientem, dla którego – jak pokazały już nieraz wydarzenia takie jak zamachy terrorystyczne czy obecna wojna na Ukrainie – zasadniczymi priorytetami nie są ekologia oraz poprawność polityczna, lecz:

- przyczynianie się przez wykorzystywane pojazdy do realizacji założonych celów taktycznych i strategicznych w różnych sytuacjach bojowych i na odmiennym polu walki – przy realizacji odmiennych scenariuszy prowadzenia działań,

- łatwość naprawy i podatność serwisowa w warunkach polowych,
- łatwość i względna taniość zaopatrzenia w paliwo/energię,
- zdolność do długotrwałego samodzielnego działania – duży zasięg operacyjny na jednym tankowaniu/ładowaniu,
- zajmowanie przez paliwo/zgromadzoną energię jak najmniejszej ilości miejsca oraz w jak najniższym stopniu negatywne wpływanie na ładowność/nośność,
- łatwa dostępność paliwa/energii w odmiennych warunkach taktycznych.

Tymczasem na tym etapie, jeśli porówna się zgodnie z tymi kryteriami odmiany szczególnie w pełni elektryczne i klasyczne, to odmiany klasyczne zdecydowanie górują nad w pełni elektrycznymi:

- ceną nabycia,
- tzw. militarnym TCO, kompletnie inaczej rozpatrywanym niż w przypadku odbiorców cywilnych,
- dużą elastycznością i uniwersalnością stosowanego paliwa,
- występowaniem zamienników oleju napędowego – analogiczny zamiennik energii elektrycznej nie istnieje,
- większym zasięgiem na jednym tankowaniu niż ładowaniu,
- większą pewnością dostaw paliw ciekłych niż energii elektrycznej, którą trzeba na polu walki wytwarzać w oparciu o agregaty pracujące na paliwa tradycyjne;
- występowaniem bezpośrednich zamienników, podczas gdy energia elektryczna takiego bezpośredniego zamiennika nie ma.

Poza tym paliwa ciekłe łatwo i efektywnie da się przechowywać – bez strat długoterwale magazynować oraz łatwo da się dystrybuować, podczas gdy bezprzewodowa dystrybucja energii elektrycznej jest nieopłacalna, z kolei jej przechowywanie w bateriach, w związku z niedoskonałością tych technologii, wiąże się z zauważalnymi i wydatnymi stratami.

Dlatego wyzwania związane z pełną elektryfikacją należą do dość poważnych. Przede wszystkim na tym etapie w wątpliwość trzeba podać długoterminową żywotność elektrycznych pojazdów wojskowych – ich baterie nie zachowują tej długości życia co pojazd, w jakim je zamontowano. Osobne problematyczne kwestie dotyczą masy samych akumulatorów oraz potrzeb w zakresie infrastruktury ładowania. W przypadku pojazdu w pełni elektrycznego dodatkowa masa akumulatora byłaby znacznie większa niż w przypadku pojazdu hybrydowego. Większe pojazdy, takie jak *Medium Tactical Vehicle Replacement* (MTVR), wymagałyby jeszcze większych – pojemniejszych akumulatorów, więc elektryfikacja tak naprawdę stanowi rozsądną opcję tylko dla mniejszych, lżejszych pojazdów. Przy tym, nawet przy spodziewanej w nadchodzących latach poprawie gęstości energii w akumulatorach, czyli cechowaniu się przez nie wyższą ilością energii na 1 m³ objętości/kg masy, wydaje się jednak mało prawdopodobne, aby znacząco zrekompensowała ona dodatkową masę, jaką te pojazdy będą musiały przenosić. W dodatku jeszcze większe mogą być wyzwania związane z ładowaniem pojazdów w pełni elektrycznych. Flota takich pojazdów wymagałaby bowiem niewiarygodnie ciężkiej i nieporęcznej infrastruktury do wytwarzania energii

i ładowania – z wyjątkiem niszowych ról w rozpoznaniu i małym lotnictwie bezzałogowym, które wymagają krótszego zasięgu i niższych sygnałów akustycznych. Taki rozległy konieczny system ładowania utrudniałby jednak armii znacznie mobilność. W sytuacji zastosowania w pełni elektrycznego taboru w kraju tabor ten musiałby bowiem korzystać ze stacjonarnych ładowarek. W sytuacji zaś realizacji misji zagranicznych zaopatrzenie wysyłane na takie misje musiałoby obejmować również dodatkowe agregaty prądotwórcze oraz dodatkowe paliwo do ich zasilania. Byłoby to oczywiście działanie logistycznie nonsensowne z ekonomicznego, praktycznego, organizacyjnego oraz strategicznego punktu widzenia. Zamiast mianowicie to paliwo wysyłać do zasilania mobilnych agregatów przeznaczonych do ładowania pojazdów elektrycznych, lepiej je wysyłać do bezpośredniego zasilania pojazdów z tradycyjnym układem napędowym, gdyż będzie to tańsze, prostsze i szybsze. A dostawy i dostępność lokalna paliwa stanowią jeden z tzw. czynników krytycznych większości misji zagranicznych (ekspedycyjnych), szczególnie jeśli odbywają się one na terenach o utrudnionym dostępie do materiałów pędnych i/czy na których toczą się działania wojenne.

W rezultacie, jak się obecnie wydaje, pełna elektryfikacja pojazdów wojskowych będzie procesem ewolucyjnym – krok po kroku, trwającym przez bardzo długi czas (nawet kilka dekad). W takich realiach, biorąc pod uwagę zaznaczone wyzwania, trudno bowiem sobie wyobrazić pełną elektryfikację pojazdów sektora wojskowego w najbliższym okresie. Na tym etapie stopnia rozwoju i pomimo pewnych swoich niezaprzeczalnych zalet, technologia pełnej elektryfikacji układów napędowych nie jest wciąż gotowa do wprowadzenia do pojazdów taktycznych¹, ponieważ z punktu widzenia sił zbrojnych i stawianych przed nimi zasadniczych celów wymaga zbyt wielkiego nakładu zasobowego w stosunku do potencjalnych korzyści – ochrona przyrody versus wzrost kosztów i wymagań logistycznych. Do tego w warunkach wojennych trudno doceniać ekologię – realną sensowność i konieczność stawiania na nią jako jeden z priorytetów. I ten pewien sceptycyzm co do możliwości pełnej elektryfikacji występuje, mimo że na rynku cywilnym sukcesywnie pojawia się coraz więcej innowacyjnych zastosowań. Niemniej fizyka podstawowych ograniczeń technologii akumulatorów nie zmieni się w najbliższym czasie, co znacznie ograniczy potencjał pojazdów w pełni elektrycznych do zastosowań taktycznych.

Czy zatem hybryda – napęd hybrydowy spalinowo-elektryczny stanowi odpowiednie wyjście? Obecnie, przy wszystkich wymienionych czynnikach, z uwzględnieniem przeszkód na drodze do przyjęcia pojazdów w pełni elektrycznych, technologia hybrydowa wydaje się bardziej atrakcyjna. Ponieważ akumulator może być ładowany samoczynnie – na pokładzie, gdy pojazd znajduje się w użyciu, rozwiązuje to problem infrastruktury do ładowania. Co więcej, chociaż pojazdy hybrydowe będą prawdopodobnie ważyć więcej, straty te nie okażą się tak duże jak w przypadku pojazdów w pełni elektrycznych. eJLTV waży dodatkowe 453 kg i chociaż nie pozostaje to bez znaczenia, jest to znacznie mniej niż masa akumulatorów, które byłyby wymagane do w pełni elektrycznego JLTV.

¹ <https://mwi.usma.edu/the-lethality-case-for-electric-military-vehicles/>.

Większość ekspertów zgodziłaby się, że wyzwania związane z wprowadzaniem technologii hybrydowej do sektora wojskowego są większe niż w przypadku cywilnych pojazdów użytkowych. Pojazdy wojskowe muszą być specjalnie zbudowane i stawić czoła większym wyzwaniom w porównaniu z cywilnymi pojazdami użytkowymi, od możliwości strzelania po możliwość bezproblemowego funkcjonowania również w ekstremalnych temperaturach i warunkach terenowych, czasami bez możliwości wcześniejszego sprawdzenia pokonywanego szlaku. Wszystko zatem, od elementów układu kierowniczego po szyby i mocowania, musi być zaprojektowane z myślą o tym. Jednak już nawet obecna pierwsza odsłona eJLTV pokazuje, że pojazdy hybrydowo-elektryczne systematycznie stają się bardziej realną opcją w przyszłości, głównie w przypadku lżejszych pojazdów.

W związku z tym dla armii jeszcze przez długie lata lepszą opcją niż napędy w pełni elektryczne mogą być różne formy napędów hybrydowych – spalinowo-elektrycznych, od lekkich hybryd jedynie wspomagających po układy bardziej rozbudowane, pozwalające w trybie w pełni elektrycznym na pokonywanie nawet kilkunastu czy kilkudziesięciu kilometrów, co w większości sytuacji taktycznych w zupełności wystarczy. Hybrydowe układy napędowe pozwalają mianowicie na w miarę skuteczne połączenie zalet tzw. dwóch światów – najlepszych cech obu rozwiązań: w pełni elektryczny napęd okazuje się wskazany w strefach bliskiej styczności z wrogiem, zaś technologia niskoemisyjnych silników wysokoprężnych nadal wykazuje liczne przewagi w innych lokalizacjach oraz sytuacjach taktycznych, jak przykładowo konieczność pokonania znacznego dystansu bez możliwości dotankowania/doładowania na trasie. Kwestia odnosi się więc do połączenia relatywnie dużego zasięgu, wciąż cechującego układ tradycyjny, z wykorzystaniem wielu zalet silnika elektrycznego, w tym odzyskiem energii w procesie rekuperacji podczas hamowania, cichobieżnością, praktycznie żadnymi wibracjami oraz bardzo wysokim momentem obrotowym, dostępnym już realnie od zera obrotów na minutę, co wpływa na wyraźną poprawę dynamiki oraz dzielności terenowej i zdolności do pokonywania wzniesień. Do tego dochodzi redukcja zużycia paliwa o realnie odczuwalne wartości, rzędu nawet 20-40%, w zależności od danych uwarunkowań eksploatacyjnych. Są to oczywiście elementy, które przemawiają za układami hybrydowymi nie tylko od strony taktycznej, ale również ekonomicznej i ekologicznej, gdyż:

- redukcja zużycia paliwa pozwala na kompensatę wyższych kosztów zakupu pojazdu z hybrydowym układem napędowym,
- redukcja zużycia paliwa przez tabor w linii przekłada się na niższe szeroko rozpatrywane koszty logistyczne – tzw. militarny ślad logistyczny – zaopatrywania tego taboru w odmiennych scenariuszach użycia,
- dochodzi do redukcji kosztów eksploatacji pojazdów wskutek m.in. mniejszej konieczności korzystania z tradycyjnego układu hamulcowego,
- redukcja zużycia paliwa przekłada się na niższą emisję CO₂ i innych substancji szkodliwych.

Przy tym stosowane w układach hybrydowych technologie elektryczne oraz układy sterowania całym systemem napędowym musiały osiągnąć odpowiednio wysoki stopień rozwoju, by hybrydy mogły być w pełni użytkową oraz w znacznym stopniu ekonomiczną alternatywą w stosunku do wyłącznie spalinowego odpowiednika. Szczególnie że w warunkach polowych prościej i szybciej da się uzupełnić paliwo w zbiorniku niż doładować baterie. Oprócz tego ważną rolę w takim uzupełnianiu odgrywają czynniki czysto użytecznościowe i masowe – jak masa zbiorników paliwa i masowy ekwiwalent baterii zapewniających ten sam zasięg co to paliwo w zbiornikach. Realnie więc kwestia odnosi się tu do połączenia relatywnie dużego zasięgu, wciąż możliwego do uzyskania przy wykorzystaniu tradycyjnego układu napędowego, ze spożytkowaniem szeregu zalet silnika elektrycznego, w tym odzyskiem energii w procesie rekuperacji podczas hamowania, cichobieżnością, praktycznie żadnymi wibracjami, niską sygnaturą termalną oraz bardzo wysokim momentem obrotowym, dostępnym już realnie od zera obrotów na minutę. Ponadto hybryda na określonym dystansie, w trakcie poruszania się w trybie w pełni elektrycznym, zachowuje taktyczne korzyści modelu w pełni elektrycznego wynikłe z wyeliminowania sygnatur hałasu i ciepła związanych z silnikami wysokoprężnymi, co przekłada się na zwiększoną „niewidzialność”. Do tego dochodzi możliwość wykorzystania pojazdów hybrydowych do eksportowania energii na zewnątrz tam, gdzie jest ona najbardziej potrzebna. A w przypadku pojazdów elektrycznych taka alternatywa nie wydaje się wskazana, gdyż pobór energii z ich akumulatorów mógłby te akumulatory rozładować niezwykle szybko, bez opcji własnego doładowania na pokładzie, a jedynie ze źródeł zewnętrznych. Zarazem pojazdy czysto spalinowe, by przekazywać napęd mechanicznie na zewnątrz, potrzebują odpowiednich przystawek odbioru mocy, zazwyczaj o limitowanych parametrach. Dlatego hybrydowe spalinowo-elektryczne układy napędowe pojazdów hybrydowych – realnie jako jedynych – mogą zostać skonfigurowane tak, aby na postoju móc występować w roli stacjonarnego agregatu prądowłórczego, służącego przykładowo do zasilania w energię elektryczną polowego wojskowego punktu szpitalnego, warsztatu czy innych obiektów, jak kontenery ze sprzętem elektronicznym, radarowym, WRE, lub zapewnić zasilanie awaryjne zespołom humanitarnym w strefie katastrofy. Omawiając tę pozapojazdową sferę implementacyjną, warto zwrócić uwagę na pewien specyficzny aspekt związany z kompletacją takich systemów hybrydowych. Na rynku cywilnym występują trzy zasadnicze tendencje:

- w hybrydach wspomagających – silnik spalinowy o takich parametrach (pojemność, moc, moment), jakby praktycznie nie było silnika elektrycznego. Ponieważ silnik elektryczny ma tu tylko wspomagać silnik spalinowy, jest to raczej nieduży i lekki silnik, o niezbyt wysokiej mocy;
- w hybrydach tradycyjnych, równoległych – silnik spalinowy o nieco niższej mocy (przy czym nie jest to reguła), niż gdyby występował on jako wyłączne źródło napędu, oraz dosyć mocny silnik elektryczny mogący zapewnić swobodny napęd pojazdu, w tym odpowiednią jego dynamikę w sytuacji, gdy ten pojazd porusza się w trybie jazdy w pełni elektrycznym;

- *downsizing* – silnik spalinowy o klasę niższej pojemności, niż byłby stosowany, gdyby stanowił jedyne źródło napędu pojazdu. Z jednej strony oznacza to jego niższą masę, w pewnym zakresie kompensującą masę dodatkowego układu elektrycznego, ale z drugiej – ze względu m.in. na niższą pojemność skokową, przekłada się na niższe uzyskiwane moc i moment obrotowy. Do tego występuje tu silnik elektryczny mniejszy i słabszy, niż gdyby miał stanowić stałe jedyne źródło napędu. Rozwiązanie powyższe często wykorzystuje się w autobusach miejskich, gdzie silnik elektryczny służy m.in. do ruszania pojazdem (silnik spalinowy załącza się dopiero po osiągnięciu określonej prędkości) oraz rekuperacji energii w trakcie hamowania.

Zaprezentowany podział jest jedynie ogólny, lecz pozwala zwrócić uwagę na kilka zasadniczych i powiązanych kwestii – układy hybrydowe na rynku cywilnym są głównie ukierunkowane na tzw. maksymalizację optymalizacji w określonych obszarach, żeby:

- mimo wszystko w układzie konstrukcyjnym pozostawały jak najmniej skomplikowane;
- w układzie masowym ważyły jak najmniej;
- w układzie przestrzennym zajmowały jak najmniej miejsca;
- w układzie ekonomicznym kosztowały jak najmniej, a zarazem, w porównaniu z tradycyjnymi odpowiednikami, przyczyniały się do redukcji zużycia paliwa oraz innych kosztów związanych z wydłużeniem życia – okresu eksploatacji – przykładowo wybranych komponentów w układzie hamulcowym. W środowisku miejskim układ hybrydowy – w zależności oczywiście od wielu czynników, w tym natężenia i płynności ruchu, liczby operacji start-stop, topografii pokonywanych tras, techniki jazdy – pozwala zaoszczędzić nawet do 35-40% paliwa, co oznacza analogiczną redukcję emisji CO₂, czyli ma dodatkowo wymiar czysto ekologiczny;
- w układzie użytkowym były jak najbardziej przyjazne dla kierowcy – maksymalnie ułatwiały mu pracę;
- w relacji z otoczeniem emitowały jak najmniej zanieczyszczeń i hałasu oraz powodowały jak najmniej wibracji, co uzyskuje się poprzez opcję czasowej jazdy pojazdu hybrydowego w trybie w pełni elektrycznym.

Dla wojska tymczasem kluczowe są: redukcja kosztów – militarnego TCO, w tym zmniejszenie zużycia paliwa i kosztów eksploatacji m.in. poprzez mniej wydatków na obsługę i naprawy, obniżona sygnatura termiczna i akustyczna, możliwość poruszania się i pracy w trybie w pełni cichym – bez uruchamiania pokładowej jednostki spalinowej, zredukowane wymagania logistyczne – mniejszy tzw. ślad logistyczny oraz ograniczony negatywny wpływ na środowisko – większa proekologiczność.

W odniesieniu do pojazdów wojskowych kompletacja napędowych układów hybrydowych także będzie jednak zależec od wielu czynników, w tym od rodzaju tych pojazdów. Pojazdy lekkie, do 5000-6000 kg masy całkowitej, wykorzystywane jako zwiadowcze, mogą mieć lekko odchudzone masowo układy hybrydowe, ale z bateriami o nieco większej pojemności, pozwalającymi na dłuższą jazdę w cichym trybie

w pełni elektrycznym. Pojazdy cięższe – o masie od 8000-12 000 kg do 20 000-28 000 kg – mogą mieć układy hybrydowe analogiczne jak ciężkie ciężarówki dystrybucyjne. Poza tym, w zależności od stwierdzonych potrzeb, można dodać moduł akumulatorów, by nie tylko zwiększyć zasięg poruszania się w trybie w pełni elektrycznym, ale głównie zabezpieczyć zasilanie dla pokładowych systemów elektronicznych oraz dachowego, sterowanego elektrycznie systemu uzbrojenia. W wojskowych ciężarówkach logistycznych, także terenowych, ale wieloosiowych – minimum 3-osiowych – można zaś wprowadzać:

- układy hybrydowe podobne jak w ciężkich cywilnych ciężarówkach dystrybucyjnych;
- układy hybrydowe wzmocnione czy/i przewymiarowane, tzn. z mocniejszymi silnikami spalinowym i elektrycznym, niż są niezbędne jedynie do samego napędu pojazdu/zespołu pojazdów. I właśnie takie układy mogłyby być bazowo przygotowane do odgrywania roli stacjonarnych agregatów napędowych, okresowo zastępujących klasyczne agregaty. Tym bardziej, że moc takich urządzeń mogłaby przekraczać 300-500 kW, co odpowiadałoby już mocy dość dużych agregatów tradycyjnych. W efekcie pozwalałoby już na zasilanie większych ważnych obiektów, jak duże szpitale tradycyjne i polowe, warsztaty polowe, lotniska polowe, systemy radarowe i WRE, obozy. W przypadku bowiem sił zbrojnych przy analizowaniu takiego wdrożenia czynnik ekonomiczny pełniłby mniej ważną funkcję, a ze zrozumiałych względów kluczowe stawałyby się większe mobilność, uniwersalność i elastyczność, przekładające się na wdrożenia/aplikacje ważne z militarnego punktu widzenia. Co więcej, opcję czasowej pracy jako stacjonarny agregat prądowórczy można też wprowadzić przy wszystkich innych rodzajach wojskowych hybryd. Hybrydy takie nie wyróżniałyby się naturalnie znaczną mocą, ale byłyby to moc wystarczająca do zasilania mniejszych obiektów. Oczywiście, z drugiej strony, większe upowszechnienie wojskowych pojazdów hybrydowych nie oznaczałoby automatycznie stopniowej rezygnacji ze stacjonarnych i przenośnych agregatów prądowórczych. Zasilanie z pojazdów należałoby mianowicie traktować jako zasilanie dodatkowe, awaryjne, typowo uzupełniające – wyjście zastępcze, stosowane gdy występują problemy z pozyskiwaniem/utrzymaniem zasilania z dotychczasowych źródeł, w tym rezerwowych, jak tradycyjne agregaty.

Poza tym wzmocnione wspomagające układy hybrydowe stanowią ciekawą propozycję w odniesieniu do bardzo ciężkich pojazdów, takich jak ciężkie uterenowione i terenowe ciągniki siodłowo-balastowe, przeznaczone do przerzutu wielotonowej techniki bojowej i zdolne tworzyć ponad 120-tonowe zestawy. W rozwiązaniu tym silnik elektryczny wspomagałby silnik spalinowy w momentach wzrostu zapotrzebowania na siłę napędową, czyli przykładowo w trakcie ruszania, pokonywania dłuższych, stromych podjazdów albo trudnego terenu czy poruszania się po śliskiej, mokrej nawierzchni. Dochodziłoby jeszcze wspomaganie przez silnik elektryczny tradycyjnego układu hamulcowego podczas hamowania.

Niemniej, co także stanowi bardzo dużą zaletę samej hybrydyzacji i jej specyficzną przewagę nad czystą elektryfikacją, elementy hybrydowego układu napędowego da się wprowadzać do już istniejących pojazdów, modyfikując ich dotychczasowy układ napędowy. Będzie to zmiana relatywnie tania i dosyć szybka. W dodatku może być przeprowadzana przy remontach okresowych bądź w trakcie już zaplanowanej kompleksowej ekologiczycznej przebudowy taboru. Tym bardziej, że:

- na rynku cywilnym wiele nowych ciężarowych hybryd bezpośrednio powstaje w oparciu o tradycyjne odpowiedniki – zachowany zostaje układ przeniesienia napędu z wałami kardana;
- niezależne podmioty budują pojazdy zelektryfikowane w oparciu o podwoziową bazę pochodzącą od OEM – tzw. wytwórców oryginalnych;
- elementy układu hybrydowego zdecydowanie łatwiej da się wprowadzić do już istniejącego podwozia niż elementy układu czysto elektrycznego;
- w przypadku hybryd istnieje kilka ich opcji – od hybryd jedynie wspomagających (*mild*) po pełne hybrydy z trybem jazdy w pełni elektrycznym. Dana propozycja może więc zostać dobrze dobrana – zeskalowana – do konkretnych potrzeb konkretnego użytkownika.

Na tym etapie podane wyżej rozwiązania stanowią oczywiście jedynie grupę wybranych przykładów i opcji. Wraz z dalszym rozwojem technologii napędowych mogą się pojawić kolejne opcje wdrożeniowe. Przy czym stosowane w układach hybrydowych technologie elektryczne musiały osiągnąć odpowiednio wysoki stopień rozwoju, by oparte na tych technologiach pojazdy hybrydowe mogły zacząć być w pełni użytkową oraz w znacznym stopniu ekonomiczną alternatywą w stosunku do wyłącznie spalinowego odpowiednika. W odniesieniu do wojska te składowe uzupełniałyby czynniki i aplikacje ważne z czysto militarnego punktu widzenia. Obecnie bowiem znajdujemy się dopiero w początkowej fazie komercjalizacji tych rozwiązań. W rezultacie same poszczególne armie muszą określić, czego dokładnie oczekują i potrzebują w tym zakresie. To z kolei wymaga przeprowadzenia po ich stronie poszerzonych i pogłębionych studiów w tej tematyce. Można mianowicie przyjąć, że strona podaźowa – dostawcy taboru – zaoferuje odpowiedni sprzęt. Niemniej to strona popytowa musi, a przynajmniej powinna, określić, czego dokładnie oczekuje od tego sprzętu – gdzie – w jakich zastosowaniach – oraz jak go będzie używać. To konieczne, by później nie pojawiły się nieporozumienia i dysonanse zakupowe.

W tym kontekście niezwykle ważną, wręcz krytyczną kwestię stanowi odpowiednie skonfigurowanie zelektryfikowanego układu napędowego tak od strony zamontowanego *hardware* – silnik spalinowy w układzie hybrydowym, silnik/silniki/elektryczne, baterie określonego rodzaju i o określonej pojemności nominalnej, przekładnie, jak i *software* – oprogramowanie sterujące całością, pozwalające na maksymalnie zoptymalizowaną pracę całego układu w sferze zarządzania energią i jej maksymalnym oszczędzaniem wraz z uwzględnieniem rekuperacji.

Kluczowym pytaniem we wszystkich tych badaniach i rozważaniach koncepcyjnych pozostaje więc to, w jakim stopniu technologia jest gotowa do użytku lub do

produkcji seryjnej². Wymaga to zwykle wieloletniego doświadczenia w pracy z systemami HED, a np. brytyjska firma QinetiQ od 10-20 lat coraz częściej pracuje nad takimi systemami. Podczas gdy w ostatnich dziesięcioleciach najnowocześniejsza technologia wojskowa często owocowała komercyjnymi pochodnymi na rynku cywilnym, ta zależność już się odwróciła. Obecnie komercyjne gotowe technologie (COTS) często zastępują rozwiązania *high-end* z różnych niszowych rynków militarnych, co dobitnie pokazuje, jak duży potencjał destrukcyjny drzemie w jednostkach napędowych HED. Cykle zakupowe w tej dziedzinie trwają od 10 do 20 lat, a w niektórych przypadkach znacznie dłużej. Tak więc, jeśli producenci napędów przegapią trend i nie będą w stanie dostarczyć tych innowacyjnych systemów na czas do przetargu, ich komponenty napędowe nie będą już instalowane w następnej generacji wyrobów. Oznacza to, że odpowiednie rynki byłyby prawdopodobnie zamknięte na dziesięciolecia i nie byłoby jasne, w jakim stopniu rynki te mogłyby zostać ponownie otwarte w późniejszym terminie. Przykładem zastosowania technologii napędowej COTS w pojazdach wojskowych jest bojowy wóz piechoty Lynx firmy Rheinmetall. Nie ma już wysoce wyspecjalizowanego silnika wojskowego, ale napędza go zmilitaryzowany cywilny silnik wysokoprężny Liebherr, normalnie stosowany w sektorze budowlanym. Te wypróbowane już silniki są solidne, trwałe, niezawodne, sprawdziły się w czasie i mogą być serwisowane na całym świecie. Oprócz tego są znacznie bardziej ekonomiczne i dostępne w odpowiednim czasie, po prostu ze względu na ich duże ilości produkcyjne. Teraz, gdy Liebherr ma również w swojej ofercie pierwsze układy hybrydowe, rozważenie hybrydyzacji Lynx staje się prawdopodobnie tylko kwestią czasu. Lynx jest potencjalnym kandydatem na następcę BWP Bradley w Stanach Zjednoczonych i można założyć, że ten program następcy będzie obejmował przynajmniej pewną hybrydyzację. Pod tym względem staje się oczywiste, jak fundamentalne jest zagrożenie ze strony przełomowych koncepcji HED dla strategicznej pozycji uznanych firm w tradycyjnej technologii napędowej. Wymaga wizji technicznej, aby dostosować orientację strategiczną tych firm do zmian technologicznych i zdobyć przywództwo technologiczne w nowych obszarach oraz wdrożyć technologię na całym świecie.

Wniosek na ten moment jawi się zatem jeden główny wieloaspektowy – elektryfikacja lądowych pojazdów wojskowych znajduje się dopiero w fazie przedwdrożeńowej. Prowadzone są konieczne prace analityczno-koncepcyjno-studialne oraz powstają pierwsze funkcjonalne egzemplarze eksperymentalne, które nawet trudno nazwać w pełni prototypowymi. Są to raczej tzw. demonstratory technologii. Elektryfikacja pojazdów wojskowych tym samym jest opóźniona pod różnymi względami w stosunku do elektryfikacji w sektorze cywilnym o około 10 lat. Niemniej w tej sytuacji powyższe nie stanowi zarzutu, a wręcz przeciwnie – wskazuje na uzasadnione oczekiwanie. Tym bardziej, że przed siłami zbrojnymi stoi wysiłek określenia

² M. Krause, *Hybrid drives for military vehicles?*, <https://actrans.de/en/hybrid-drives-for-military-vehicles/>, Insights.

i zdefiniowania, jak w ich przypadku ma/może zachodzić transformacja energetyczna. Na rynku cywilnym, na skutek przede wszystkim elementów politycznych i strategicznych, wspartych względami ekologicznymi, transformacja ta jest w znacznej mierze wymuszona i nakreślona przez prawo, czyli otoczenie polityczne. Czy tak samo i na skutek zbliżonych składowych będzie ona przebiegać w siłach zbrojnych, czas pokaże. Przy tym zdecydowanego prymatu polityki wykluczyć się nie da. Przy wdrażaniu architektury HED fundamentalne znaczenie ma tymczasem zapewnienie, że technologia stanowi rzeczywiste ulepszenie w porównaniu z konwencjonalnym układem napędowym w realistycznych warunkach pracy, w tym w odmiennych scenariuszach użycia. Elektryfikacji nie należy więc w siłach zbrojnych wdrażać tylko dlatego, że wydaje się nowoczesna, popularna i prośrodowiskowa, gdyż bilans emisji CO₂ przez specyficzne pojazdy sił zbrojnych z pewnością nie stanowi najważniejszego aspektu wojny.

Analizując te wnioski i spostrzeżenia, trzeba podkreślić pewną kluczową kwestię – we wstępie do pracy autor postawił kilka zasadniczych pytań badawczych, na które – realizując postawione cele – starał się odpowiedzieć. Niestety, na tym etapie rozwoju technologii elektryfikacji układów napędowych pojazdów wojskowych takich pełnych i pewnych odpowiedzi obiektywnie nie można udzielić. Pomijając wybrane poboczne przypadki, jak użycie w pełni elektrycznej ciężarówki w bazie wojskowej, realnie wszyscy zainteresowani – dostawcy sprzętu, taboru i komponentów, siły zbrojne, politycy, branżowi fachowcy – tak naprawdę dopiero się uczą, jak tę elektryfikację napędów wojskowych pojazdów kołowych czy gąsienicowych wprowadzać umiejętnie, efektywnie i skutecznie – czyli podtrzymywalnie, a *de facto* militarnie podtrzymywalnie³, a zatem w jak najszerszym i najgłębszym zakresie uwzględniając specyfikę sił zbrojnych jako takich. I to jest w tej sferze zasadnicze wyzwanie. Można bowiem ekologizować armijne pojazdy, lecz w porównaniu z traktowanymi tu jako baza do dalszych rozważań aktualnie stosowanymi paliwami tradycyjnymi ta ekologizacja i w jej ramach elektryfikacja:

- nie może oznaczać wydatnego wzrostu kosztów w całym cyklu życia pojazdów (militarne TCO – eTCO- ekologiczne TCO), a nawet powinna oznaczać spadek tych kosztów;
- nie może rodzić nowych wyzwań zasobowych, organizacyjnych i logistycznych;

³ Koncepcja ta nawiązuje do tłumaczenia na język polski słowa w języku angielskim *sustainable*. A. Skowroński, w artykule *Zrównoważony rozwój perspektywą dalszego postępu cywilizacyjnego*, Problemy Ekorozwoju, nr 2/2006, s. 47-57, wskazuje, że poprawne tłumaczenie angielskiego określenia *sustainable development* powinno właśnie brzmieć „rozwój podtrzymywalny”, a nie „zrównoważony”. Słowo „podtrzymywalny” wskazuje bowiem na szerokie znaczenie bazowego wyrażenia *sustainable* – ma być to nie tylko rozwój prowadzony w sposób nieobciążający sobą ekonomicznie, społecznie i ekologicznie przyszłych pokoleń, ale także wiążący się ze stałą możliwością dalszej poprawy warunków życia, przy możliwości dalszego nieskrępowanego korzystania ze wszelkich dobrodziejstw otaczającego środowiska naturalnego.

- nie może wpłynąć negatywnie na potencjał bojowy sił zbrojnych, a – wręcz przeciwnie – powinna ten potencjał jeszcze zwiększać – wzmacniać;
- nie może zagrozić bezpieczeństwu państwa i jego strategicznym celom/interesom za cenę dodatkowej emisji setek kilogramów czy ton CO₂ oraz innych zanieczyszczeń;
- powinna uniezależnić armię od paliw dostarczanych z zewnątrz, w jak największym stopniu bazując na tzw. energetycznym obiegu zamkniętym – tzn. pozyskiwaniu do napędu elektrycznych pojazdów wojskowych (ekologicznej) energii wytworzonej przez samą armię – głównie z użyciem paneli fotowoltaicznych oraz kogeneracji w oparciu o biopaliwa – biogazy. Chociaż w sektorze cywilnym ten kierunek rozwoju stanowi kuszącą alternatywę, w odniesieniu do sił zbrojnych wydaje się jednak pewną futurystyczną mrzonką. Nie można negocjować tej całkiem sensownej ścieżki poszukiwania określonych alternatyw paliwowo-energetycznych. Niemniej te alternatywy na teraz da się jedynie rozpatrywać jako pewną propozycję uzupełniającą, wspierającą, a nie substytucyjną. Ile bowiem trzeba paneli, by wyprodukować w każdych warunkach pogodowych energię do zasilania kilkudziesięciotonowego czołgu klasy Challenger bądź Abrams? W tej materii trzeba więc trzeźwo i obiektywnie oceniać sytuację. A to oznacza, że przy wymuszonej elektryfikacji na rynku cywilnym armie krajów zachodnich jeszcze na lata pozostaną jedynymi z głównych użytkowników setek czy tysięcy pojazdów wciąż zasilanych tradycyjnymi paliwami. Tu musi bowiem zwyciężyć głos rozsądku, a nie ekstremalnych ekologów. Wojna na Ukrainie wiele wszak uczy nowego. I co ciekawe – o ile sektor cywilny ma odchodzić od paliw kopalnych, o tyle armia wciąż musi na nich bazować, chociaż może w relatywnie malejącym stopniu, by być w stanie szybko i skutecznie zabezpieczać to, do czego została powołana.

Na koniec należy wskazać, że w naszym kraju do tej chwili nie powstał niestety nawet żaden funkcjonalny prototyp wojskowego pojazdu zelektryfikowanego o masie całkowitej powyżej 3500-5000 kg. Oczywiście odpowiednie prace analityczne są prowadzone m.in. w WITPiS, lecz od samych prac do przygotowania projektu, złożenia prototypu oraz ewentualnej komercjalizacji droga bywa zazwyczaj daleka. By takie prace były z powodzeniem prowadzone, musi być jednocześnie spełnionych kilka warunków. Są nimi:

- istnienie podmiotów gotowych przygotować takie technologie oraz doprowadzić je przynajmniej do fazy prototypowej, a najlepiej już przedkomercjalizacyjnej,
- istnienie odpowiedniego zaplecza naukowego w postaci wyższych uczelni oraz instytutów naukowo-badawczych,
- odpowiednie finansowanie takich prac ze środków własnych zainteresowanych podmiotów, środków publicznych (dotacje o charakterze naukowym, celowe dotacje MON),
- skłonność do ponoszenia ryzyka, zawsze towarzysząca nowym projektom,

- realne zainteresowanie ze strony rodzimych sił zbrojnych, przejawiające się określeniem bazowych wymagań, współfinansowaniem prowadzonych badań i rozwoju oraz, w dalszej kolejności, stosownymi zamówieniami.

W pierwszym przypadku sytuacja teoretycznie nie jest negatywna. Oczywiście w naszym kraju swojej siedziby macierzystej nie ma żaden z liczących się wytwórców motoryzacyjnych, na stosowne prace zdolny przeznaczyć znaczne sumy i do tego zdolny do przenoszenia – łatwego transferu już gotowych i sprawdzonych propozycji z rynku cywilnego do sektora zbrojeniowo-obronnego. Takie koncerny operują – jako na rynkach rodzimych – w Szwecji (Volvo i Scania), Niemczech (MAN – RMMV, Mercedes, IVECO – Magirus), we Francji (Renault Trucks/Arquus, częściowo IVECO i Scania), we Włoszech (IVECO), w Holandii (Paccar-DAF, częściowo Scania), Belgii (częściowo DAF i Volvo), Wielkiej Brytanii (Paccar-Leyland). Dochodzą tu jeszcze same koncerny militarne, jak BAE, Rheinmetall, KMW czy Nexter. Osobny rozdział stanowią Amerykanie z ich liderami w postaci korporacji Oshkosh i General Motors (GM). Niemniej elektryfikacja pokazała, że wcale nie muszą się nią wyłącznie z powodzeniem zajmować znani gracze, w dodatku dotychczas funkcjonujący. Otworzyła ona mianowicie pole do działania dla wielu małych i dynamicznych firm – typowych start-upów, które wielokrotnie w oparciu o pojazdową podstawę pochodzącą od potentatów są w stanie przedstawić autentycznie niezwykle ciekawe i bardzo zaawansowane konstrukcyjnie wyroby, nieraz lepsze niż odpowiedniki od wielkich graczy. Wystarczy tu chociażby wspomnieć takie przedsiębiorstwa, jak szwajcarski Design Werk (od 2021 roku w strukturach grupy Volvo), szwedzkie Enride i Volta, niemieckie Quantron Trucks i Hydron Trucks, austriacki Steyr Automotive czy brytyjska Tevva. Poza tym elektryfikację pojazdów prowadzą dotychczasowi niszowi dostawcy, tacy jak czeska Tatra, fińska Sisu Auto, niemiecki Paul Nutzfahrzeuge czy holenderski Ginaf, a nawet do segmentu elektrycznych ciężarówek weszli wytwórcy autobusów, jak hiszpański Irizar, czy nadwozi i sprzętu pożarniczego, jak austriacki Rosenbauer. W Polsce takich prac na większą skalę jak na razie brakuje. Tymczasem mogłoby je z powodzeniem prowadzić co najmniej kilka ośrodków, takich jak:

- Zakłady w Jelczu wraz z innymi wybranymi spółkami wchodzącymi w skład Polskiej Grupy Zbrojeniowej, jak przykładowo Huta Stalowa Wola, Rosomak czy Zakłady Mechaniczne Łabędy. Przy tym w tej sytuacji istniałaby możliwość wykorzystania w ramach jednej organizacji szerokich i głębokich efektów synergii, wynikłych z zastosowania pewnych opracowań – oczywiście po niezbędnych modyfikacjach – zarówno w pojazdach gąsienicowych, jak nowy BWP Borsuk, kołowych transporterach opancerzonych – KTO Rosomak – jak i w ciężarówkach Jelcza. Takim pierwszym modelem poddanym elektryfikacji układu napędowego poprzez jego hybrydyzację mogłaby być najpopularniejsza jelczańska ciężarówka, czyli typ 442.32 4×4 (Hybrid). Przy czym na etapie początkowym – próbnym można tu wciąż zachować oryginalny 326-konny silnik spalinowy MTU-Mercedes, a dopiero potem stawiać na inne rozwiązania,

przykładowo związane z downsizgiem jednostki spalinowej. Można też zachować ten silnik, by w ramach modułu generatora z silnikiem elektrycznym pełnił funkcję stacjonarnego agregatu prądowłórczego. Większa synergia konstrukcyjna może wystąpić w przypadku przygotowania kilku – maksymalnie dwóch-trzech – w określonym zakresie zunifikowanych linii hybrydowych zespołów napędowych dla:

- KTO Rosomak i ciężarówek Jelcza kategorii 6×6 i 8×8 (882 Hybrid);
- BWP Borsuk i najcięższych 4-osioowych Jelczy, jak podwozie typu 882.62 8×8, dotąd wykorzystane w projekcie ciężkiego terenowego ciągnika siodłowo-balastowego (projekt *Jak*), a w przyszłości być może ciężkiego kołowego terenowego opancerzonego wozu ewakuacji i ratownictwa technicznego.
- Szczęśniak Pojazdy Specjalne – dotychczas realizujący już kilka niszowych projektów związanych z opracowaniem typowo wojskowych pojazdów, jak Lekki Samochód Terenowy (LST) i Kołowa Platforma Wysokiej Mobilności (KPWM) – oba 2014 rok – oraz Kołowa Platforma Wysokiej Mobilności 3 – KPWM 3 – 2015 rok. Tym bardziej, że przede wszystkim LST czy KPWM bazuje na amerykańskiej filozofii konstrukcyjnej, zgodnie z którą finalny producent *de facto* pełni jedynie funkcję ostatecznego montażysty, składającego pojazd z podzespołów dostarczonych z zewnątrz, przez niezależnych kooperantów. W modelu tym to ci kooperanci ponoszą ryzyko związane z rozwojem określonych elementów. Ponieważ też zazwyczaj dostarczają je wielu odbiorcom, są w stanie uzyskać przy ich wytwarzaniu korzyści związane ze skalą i uczeniem się. W ten sposób dochodzi do spadku kosztu jednostkowego. Ponadto na tych zewnętrznych kooperantów przerzucone zostają zagadnienia związane z zagwarantowaniem wsparcia posprzedażowego na jak największym obszarze, w tym w jak największej liczbie państw w zakresie pełnej obsługi serwisowej i naprawczej. Ponadto właściciele firmy są zazwyczaj bardzo otwarci na ciekawe i perspektywiczne projekty militarne, o czym świadczy chociażby przygotowanie przez nich produkujących w swojej klasie kołowych wozów zabezpieczenia technicznego – ciężkich kołowych terenowych opancerzonych samochodów ewakuacji i ratownictwa technicznego – w kolejności KWZT-1 Mamut, KWZT-2 i KWZT-3⁴.
- AMZ-KUTNO SA – firma ta od dawna konstruuje specjalistyczne pojazdy wojskowe, w tym integralnie opancerzone, o coraz wyższych dopuszczalnych masach całkowitych. Początkowo były to warianty lekkie, lecz z czasem podmiot zaczął przedstawiać konstrukcje coraz bardziej zaawansowane technicznie i militarnie oraz coraz cięższe, jak rodziny pojazdów Żubr i Tur, a nawet ciężki – 26-tonowy, kołowy, 4-osioowy transporter Hipopotam, który dzięki modułowej budowie może spełniać wiele odmiennych zadań. Część z tych wyrobów, a szczególnie przedstawiciele linii Tur, ze względu na przewidywany dla nich

⁴ Szerzej J. Brach, *Kołowe Wozy Zabezpieczenia Technicznego firmy Szczęśniak PS*, Agencja Wydawnicza CB, Warszawa 2020, s. 80.

potencjalny zakres zastosowań, jak odmiany zwiadowcze, rozpoznania, dla sił specjalnych, wręcz idealnie nadaje się do wstępnej elektryfikacji – hybrydyzacji ich układów napędowych.

- Starachowicka Autobox Innovations Spółka z ograniczoną odpowiedzialnością Sp. j., od 2011 roku udanie seryjnie modernizująca legendarne Stary 266 do standardu oznaczonego jako 266M2. Poza tym firma zmodernizowała Honkera do standardu MAX – Honker MAX – oraz całkowicie we własnym zakresie przygotowała lekkie pojazdy AH 20.44 4×4 – 2021 rok i AH 23.44LC – 2023 rok. Swoje pierwsze hybrydy Autobox może przygotować w oparciu o Stara 266M2 (Hybrid) oraz typy AH20.44 bądź szczególnie AH 23.44LC, o dopuszczalnej masie całkowitej wyższej niż AH.20.4×4 aż o 2000 kg (5500 kg wobec 3500 kg), co otwiera kompletnie nowe możliwości użytkowe, wdrożeniowe oraz w sferze konfiguracji samego napędu. Przy czym o ile hybrydyzację układu napędowego Stara 266 należy raczej traktować w kategorii pewnego eksperymentu, ukierunkowanego na uczenie się i zbieranie praktycznych doświadczeń w tej materii pod kątem przygotowania w przyszłości analogicznych wdrożeniowo ciężarówek, o tyle hybrydyzację napędu AH 20.44 4×4 i głównie AH 23.44LC trzeba już rozpatrywać i analizować jako działanie docelowo w pełni uzasadnione, mające za zadanie przedstawienie produktu dojrzałego do komercjalizacji.

Do tego dochodzą ciekawe start-upy i *de facto* podobnie funkcjonujące przedsiębiorstwa, które w oparciu o komponenty z zewnątrz są w stanie zbudować całkiem nowoczesne pojazdy elektryczne. Spośród tego grona należy wymienić chociażby wrocławską spółkę Nysa Motors.

W kraju istnieje także niezbędne zaplecze naukowo-badawcze, jak choćby nasze przodujące politechniki w postaci warszawskiej, wrocławskiej, krakowskiej, krakowskiej AGH i poznańskiej, oraz instytuty naukowe, w przypadku sił zbrojnych na czele z WITPiS.

Czego w takim razie brakuje? Zdaniem autora w tym schemacie brakuje dwóch zasadniczych składowych – realnego zainteresowania ze strony MON oraz wystarczającego budżetowego finansowania czy przynajmniej współfinansowania określonych działań. To są czynniki niemal kluczowe. We współczesnych realiach życia gospodarczego sam biznes mianowicie nie zainwestuje własnych środków, jeśli nie będzie miał jasnej wizji – perspektywy ich późniejszego odzyskania. A gdy istnieje właściwe finansowanie, bez politycznej presji, pojawia się także odpowiednia – tu wymagana – skłonność do ponoszenia ryzyka. Naturalnie takie ryzyko zawsze wiąże się z możliwością popełnienia określonych błędów i pojawienia się tzw. chorób wieku dziecięcego, lecz z drugiej strony nieraz pozwala na zaproponowanie produktów przełomowych – innowacyjnych.

Wskazania i rekomendacje

1. Elektryfikacja pojazdów wojskowych pozostaje procesem o wiele bardziej złożonym i wielowymiarowym niż w odniesieniu do sektora cywilnego. Armia ma bowiem bazowo kompletnie inne zadania do wypełnienia.
2. Czynniki ekologiczne dla sił zbrojnych mogą się jawić jako pewien argument wdrożeniowy, lecz dla wojska zdecydowanie ważniejsze pozostają skuteczność i efektywność w działaniu niż problemy związane z emisją zanieczyszczeń, co w warunkach typowo bojowych stanowi przesłankę wręcz kuriozalną.
3. Główne wyzwania związane z technologią elektryfikacją dotyczą dystrybucji energii oraz jej przechowywania. O ile jeszcze jej dystrybucję da się zorganizować w sposób punktowy dzięki przenośnym agregatom, zasilanym paliwami kopalnymi (?) czy gazami, a najlepiej biogazem, o tyle problem przechowywania wciąż istnieje. Z punktu widzenia sił zbrojnych na tym etapie swojego rozwoju akumulatory cechuje mianowicie zbyt mała ich pojemność. Poza tym z czasem tracą one swoje właściwości. Dlatego o ile wykorzystanie częściowo zużytych akumulatorów w ramach ich drugiego życia w roli magazynów energii w sektorze cywilnym może wykazywać określone uzasadnienie, o tyle w przypadku armii w tej analizie trzeba uwzględnić dodatkowe kluczowe czynniki, istotne głównie w trakcie wykonywania misji zagranicznych. Są to czynniki takie jak:
 - zabezpieczenie takich magazynów akumulatorów przed atakami ze strony wroga, co w epoce masowego użycia dronów – amunicji krążącej może się realnie okazać co najmniej kłopotliwe;
 - obciążenie dla łańcuchów logistycznych przy przerzucie takich mimo wszystko relatywnie ciężkich modułowych pakietów akumulatorów. Taniej i szybciej nieraz da się przerzucić tradycyjne paliwo o takiej samej wartości energii jak ta zgromadzona w takich akumulatorach, szczególnie gdy realna pojemność tych baterii wynosi poniżej 70%.
4. Kolejny problem z technologią akumulatorową dotyczy zbyt krótkiego pierwszego życia tych akumulatorów. I to ograniczenie zapewne szybko nie zostanie usunięte. Stanowi ono bowiem większe wyzwanie niż wzrost pojemności oraz spadek ceny stosowanych baterii. Szczególnie że pojazd wojskowy może być wykorzystywany przez nawet 30-40 lat, a nie przez 10-15, jak cywilny, co może oznaczać, przy braku zasadniczego postępu w wydłużaniu żywotności, że w trakcie tego cyklu życia musi dojść do co najmniej dwóch wymian akumulatorów, co wiąże się z relatywnie wysokimi kosztami. Oczywiście trudno wyrokować, ile będą kosztowały (EUR/kWh) akumulatory za 10 czy 15 lat – równie dobrze mogą być już one względnie tanie, jak i nadal względnie drogie.

- Niemniej, niezależnie już od tej przyszłej ceny, będzie to dodatkowy wydatek, jakiego przy tradycyjnych zbiornikach paliwa ponieść nie trzeba.
5. Zasadnicze militarne korzyści związane z napędami elektrycznymi, jak cicha praca, niska sygnatura termalna, ograniczone drgania/wibracje, rekuperacja energii, są niedostępne dla napędów tradycyjnych, z wyłącznie spalinową jednostką napędową.
 6. W przypadku sił zbrojnych napędy hybrydowe wydają się lepszą suboptymalną opcją dla tradycyjnego układu napędowego niż napędy w pełni elektryczne. Zarazem obecnie są one najbardziej praktyczną i realną alternatywą dla układu w pełni elektrycznego ze względu na¹:
 - bardziej konkurencyjną cenę;
 - brak konieczności instalacji akumulatorów o dużej pojemności i tym samym masie;
 - możliwość czasowego spożytkowania zasadniczych zalet napędu w pełni elektrycznego, jak wspomniane wyżej cicha jazda, niska sygnatura termalna, rekuperacja energii w trakcie hamowania;
 - możliwość wykorzystania znacznego zasięgu wskutek zachowania silnika spalinowego jako głównego źródła napędu. Pewną opcję stanowi silnik spalinowy w roli tzw. przedłużacza zasięgu;
 - przyczynianie się do redukcji zużycia tradycyjnego paliwa, co oznacza istotne logistyczne odciążenie, przede wszystkim dla jednostek wysyłanych na misje w dalekie punkty globu, w dodatku z tzw. trudnym naturalnym dostępem (słaba sieć dróg, konieczność przemieszczania paliwa na duże odległości, cała problematyka ochrony konwojów z zaopatrzeniem, w tym z paliwem, brak dostępu na miejscu do energii elektrycznej);
 - brak konieczności zabezpieczenia stacjonarnej czy mobilnej infrastruktury do ładowania, co poza krajem macierzystym może się jawić jako istotny problem. Tymczasem hybrydy mogą, ale nie muszą, być doładowywane ze źródeł zewnętrznych zasilania;
 - fakt, że dzięki nim da się elektryfikować tradycyjny układ napędowy oraz można je wprowadzać do już użytkowanego taboru. Powyższe zdecydowanie potania i upraszcza ten proces oraz oznacza zasadnicze wydłużenie okresu życia pojazdów tradycyjnych, w miarę płynnie przenosząc je do epoki powszechniejszej elektryfikacji.
 7. Wielkie wyzwanie stanowi to, jak zapewnić bezpieczeństwo przeciwpożarowe pojazdów zelektryfikowanych, a szczególnie z w pełni elektrycznym układem napędowym. W warunkach bojowych, ze względu na liczbę zgromadzonych w nich akumulatorów, stają się one bardzo niebezpieczne – *de facto* są niemal tykającą bombą z opóźnionym zapłonem. O ile bowiem jeszcze płonący czy

¹ Porównaj S.V. Milićević, I.A. Blagojević, *Component sizing and energy management for a series hybrid electric tracked vehicle*, Vojnotehnički glasnik/Military Technical Courier, 2022, vol. 70, issue 4, s. 877-896.

- tłący się pojazd z napędem klasycznym da się ratować – gasić, o tyle nie istnieje sens gaszenia pojazdu bateryjnego. Pojazd ten natychmiast trzeba albo spisać na straty, szczególnie jeśli od razu spłonie, albo, gdy istnieją ku temu sprzyjające okoliczności i jeszcze nie zaczął się palić, przeholować go do bezpiecznego miejsca i odczekać założony okres, czy nie dojdzie do ponownego zapłonu. Niemniej dla armii na froncie taka procedura okazuje się co najmniej kłopotliwa.
8. Jakikolwiek wzrost stopnia elektryfikacji pojazdów wojskowych, co najwyżej pomijając wydania hybrydowe bez opcji doładowania z sieci, wiąże się ze wzrostem zapotrzebowania sił zbrojnych na pewne i niezakłócone dostawy energii. Będzie się to musiało też wiązać z rozbudową w obiektach wojskowych koniecznej infrastruktury, w tym infrastruktury zasilania awaryjnego w postaci agregatów, co pociąga za sobą konkretne wydatki inwestycyjne. Znaczne wyzwanie stanowić także będzie prewencyjne zabezpieczenie tej infrastruktury przed niepożądanymi działaniami ze strony wroga, tak by zagwarantować możliwie jak najbardziej nieprzerwane dostawy energii. Przy czym o ile jeszcze mobilne urządzenia zasilania awaryjnego da się relatywnie dosyć łatwo zabezpieczyć, o tyle w pełni skuteczne zabezpieczenie składowych infrastruktury energetyki systemowej jest praktycznie niemożliwe.
 9. Wojsko może rozważyć alternatywny rozwój systemów zasilania w oparciu o biogazy i biogazownie. Bazą dostaw koniecznych surowców w postaci odpadków mogłoby być tutaj już istniejące koszarowe zaplecze kuchenno-sanitarne. Z niego odpadki w jednostkach trafiałyby nie na wysypiska bądź do sieci kanalizacyjnej, lecz do kontenerowych biogazowni połączonych z kontenerowymi, zasilanymi tak pozyskanym biogazem, generatorami. Ponadto zredukowałyby to liczbę odpadków, koszty operowania nimi (opłaty za ścieki i wywóz nieczystości) oraz dało możliwość produkcji taniej ekologicznej energii na miejscu, w jednostkach. Co więcej, takie biogazownie znakomicie sprawdziłyby się na misjach zagranicznych, zdecydowanie redukując problemy logistyczne i sanitarne związane z produkcją fekaliiów i odpadków organicznych, jak resztki żywności.
 10. Problemy z eksploatacją pojazdów w pełni elektrycznych poza warunkami pokojowymi w krajach wysoko rozwiniętych. Zagadnienie dotyczy deficytu energii – trudności z jej dostawami w warunkach kryzysowych, polowych i wojennych. Przemyślenia i przeanalizowania w tym punkcie wymagają zatem następujące kwestie:
 - w sytuacji jakiegokolwiek konfliktu infrastruktura energetyczna – jako tzw. składowa infrastruktury krytycznej – może ulec najszybszemu zniszczeniu, co może ograniczyć dostawy energii;
 - jak zabezpieczyć dostawy energii na misjach w krajach, gdzie w ogóle istnieje brak pewności takich dostaw, a co dopiero w warunkach wojennych – czy wówczas w bazach należy uruchamiać przenośne agregaty, do których trzeba będzie transportować tradycyjne paliwo ze względu na ograniczoną podaż biomasy na miejscu;

- na misjach bojowych istnieją ważniejsze punkty zasilania w energię niż pojazdy zelektryfikowane.

Są to dosyć ważne elementy, jakie w swoich rozważaniach wdrożeniowych nawet częściowo może pominąć cywilny użytkownik, ale armia już nie. Nie może ona zatem stawiać na wyjście już na samym początku wiążące się z poważnymi ograniczeniami i mogące zagrozić niezakłóconej realizacji danej misji. Bez względu na pewność w skuteczności zaopatrzenia, walki i prewencji zachowuje tu mianowicie priorytet. Pojazd cywilny może realnie poczekać na doładowanie na trasie czy w bazie, a jego operatorowi za spóźnienie mogą co najwyżej grozić pewne strategicznie nieważne kary, jak kary finansowe czy biznesowe. Niemniej w tym kontekście bezpieczeństwo strategiczne państwa nie może zostać przeliczone na tony niewyemitowanych substancji szkodliwych. Sprzęt i tabor wojskowy w możliwie największym zakresie ma działać bez zarzutu – tego działania nie może limitować dostępność ładunków czy tym bardziej dostępność energii.

11. Niezależnie od tego, na jakim paliwie czy skąd pozyskiwanej energii siły zbrojne operują, we wszystkich sytuacjach muszą zachowywać pełne zdolności operacyjne – pełną mobilność taktyczną i strategiczną, pełną manewrowość oraz pełne zdolności bojowe na poziomie przynajmniej nie gorszym, niż gdyby korzystały z dostaw tradycyjnego ropopochodnego paliwa – łatwego w dystrybucji i magazynowaniu oraz *de facto* mającego co najmniej kilka zamienników, jak ciekłe paliwa alternatywne – biopaliwa, e-paliwa, alkohol, jednolite paliwo pola walki – F-34. To zdecydowanie podnosi elastyczność oraz może dawać ewentualną sposobność spożytkowania zapasów paliw zgromadzonych przez stronę przeciwną. Tymczasem obecnie energia elektryczna takich bezpośrednich zamienników w ogóle nie ma! Interesariusze – zaangażowani muszą bezwarunkowo uwzględnić ten fakt w swoich rozważaniach i prowadzonych działaniach w sferze jakiegokolwiek napędowej elektryfikacji sprzętu i taboru wojskowego. Element ten ma wymiar strategiczny.
12. Ciekłe biopaliwa w pojazdach wojskowych, chociaż mogą być w nich stosowane jako nieraz pełnoprawne zamienniki paliw tradycyjnych, to szybko na bardziej masową skalę stosowane w tych pojazdach nie będą. Należy wskazać na trzy zasadnicze przyczyny takiej sytuacji – są nimi: wysoka cena, ograniczona dostępność oraz zapotrzebowanie zgłaszane przez inne sektory transportu i działy gospodarki, jak lotnictwo, gdzie wdrożenie jako paliwa gazów czy elektryfikacja systemów napędowych na tym etapie wciąż nie mogą być rozważane.
13. Współczesny trend ekologizacyjny – elektryfikacyjny dotyczy dzisiaj głównie Europy Zachodniej, Ameryki Północnej i po części Chin. Do tej grupy da się także komercyjnie i militarnie dodać Japonię, Koreę Południową i Australię. Niemniej wciąż istnieje reszta świata – znaczna część Azji i praktycznie cała Afryka, zamieszkała przez setki milionów czy miliardy ludzi. Świat zachodni może od nich uciec ekologicznie w sferze cywilnej, lecz nie jest i jeszcze długo nie będzie

- w stanie uciec w sferze militarnej. I ten czynnik bezwzględnie musi być wzięty pod uwagę we wszelkich sporządzanych studiach i analizach strategicznych.
14. Elektryfikacja pojazdów sił zbrojnych musi najpierw oznaczać pewność dostaw dla nich energii elektrycznej we wszystkich rozpatrywanych scenariuszach działania i scenariuszach użycia, łącznie z tymi najbardziej niesprzyjającymi. I te studia oraz analizy muszą być wykonane *ex ante*, nie *ex post*. Powyższe oznacza, że najpierw muszą być w tych odmiennych scenariuszach zabezpieczone nadmiarowe dostawy energii elektrycznej – bo brakuje dla niej innych paliwowych alternatywnych możliwości, a dopiero potem można zacząć rozsądnie elektryfikować poszczególne rodzaje taboru.
 15. Elektryfikacja pojazdów wojskowych wymaga najpierw skalowania czasu i inwestycji oraz określenia nakładów, by wskazać chociaż przybliżony przebieg tego procesu w czasie. Realnie może się to jednak okazać trudne ze względu na niemożliwe do określenia czynniki, jakie w turbulentnym świecie – otoczeniu będą wpływać na przyszłe użycie danych sił zbrojnych w odmiennych scenariuszach i otoczeniu działania.
 16. Na pokładach w pełni zelektryfikowanych pojazdów wojskowych o energię z baterii z silnikiem do napędu głównego zaczyna systematycznie rywalizować coraz więcej systemów, jak systemy łączności, zakłócające i bojowe. Ta gra energetyczna o realnie limitowany zasób nie może jednak prowadzić do spadku zdolności bojowych i operacyjnych danej jednostki sprzętowej. Dlatego pewną soboptymalną opcję stanowią tzw. zwiększające zasięgu, zasilane już tradycyjnymi paliwami, lub jednostki APU, także na paliwo tradycyjne.
 17. Elektryfikację poprzez hybrydyzację można także zacząć nie tylko poprzez zakup samego takiego taboru fabrycznie nowego, ale poprzez elektryfikację hybrydową pojazdów już eksploatowanych. Przyczyni się to zapewne do redukcji kosztów. Może też stanowić dobre wyjście pośrednie, przed bardziej pogłębioną i poszerzoną elektryfikacją kołowych czy gąsienicowych środków transportu, wsparcia i walki.
 18. Obecnie realnie żadnych sił zbrojnych, może poza amerykańskimi, nie stać na to, by na dużą skalę wprowadzać do eksploatacji tabor w pełni zelektryfikowany, który nadaje się do bezproblemowego użycia jedynie w kraju macierzystym, a nie poza jego granicami na misjach zagranicznych. Taka dualizacja implementacyjna oznacza tu mianowicie jedynie dodatkowe koszty oraz problemy i wyzwania logistyczne. Tymczasem w obecnych realiach praktycznie każdy pojazd wojskowy musi być – o czym już wspomniano – dość elastyczny wdrożeniowo, tzn. nadawać się do niemal natychmiastowego zastosowania w odmiennym otoczeniu klimatycznym, geograficznym i infrastrukturalnym oraz przy odmiennych taktykach działania.
 19. Elektryfikacja pojazdów wojskowych w pierwszym rzędzie musi uwzględniać realia funkcjonowania danych sił zbrojnych. Kwestia dotyczy zatem trzech zasadniczych grup czynników:

- ekonomicznych – środków przeznaczanych przez dane państwo na obronność i w tym kontekście tego, by zwiększone wydatki na wejście w posiadanie pojazdów zelektryfikowanych nie stanowiły realnej konkurencji w stosunku do innych zbrojeniowych wydatków inwestycyjnych. Wydatki te mają więc być nie substytucyjne, lecz komplementarne;
 - czysto eksploatacyjnych – własnego, rodzimego środowiska możliwych prowadzonych działań oraz innych, wysoce prawdopodobnych takich środowisk. W takim układzie elektryfikacja w najmniejszym stopniu nie może źle wpływać na mobilność taktyczną i strategiczną, prezentowane możliwości bojowe oraz wymogi w zakresie wsparcia logistycznego i funkcjonujących łańcuchów dostaw – zaopatrzenia;
 - realnej konieczności takiej elektryfikacji i konieczności wypracowania w niej własnego, specyficznego postępowania wdrożeniowego. W rezultacie nie może (a przynajmniej nie powinna) być ona przenoszona jako swoista kalka – kopia czyichś działań. Szczególnie zagadnienie to odnosi się do możliwego imitowania działań amerykańskich, dotyczących kompletnie innych sił zbrojnych, funkcjonujących w kompletnie odmiennym otoczeniu ekonomicznym, politycznym i zadaniowym oraz zamawiających wielokrotnie większe ilości sprzętu. W związku z tym może się okazać, że pewne rozwiązania, jakie one przyjmą w tej sferze, będą kompletnie nietransferowalne czy trudne do efektywnej oraz skutecznej implementacji. Amerykanie są bowiem w stanie wytworzyć własny wewnętrzny rynek zbytu, cechujący się wielkością – pojemnością i szerokością, uzasadniającą uzyskiwanie przy takich wdrożeniach efektów skali, jakich żadne inne siły zbrojne Zachodu oddzielnie nie mogą wykreować. Do tego dochodzą własne, specyficzne schematy funkcjonowania. Tym samym projekty i wdrożenia realizowane przez Pentagon są ciekawe w sferze samych koncepcji, wyrobów i implementacji, lecz realnie trudne do wprowadzenia gdzie indziej, ze względu na zaznaczone już bariery kosztowe, wynikające z efektów skali – sumarycznie mianowicie siły zbrojne USA zamawiają więcej sprzętu i wyposażenia niż wszystkie inne armie NATO razem wzięte. Amerykanów przy tym stać na pewne eksperymenty, na jakich pełnoskalowe prowadzenie inni nie zawsze mogą sobie pozwolić.
20. Wdrożenie pojazdów zelektryfikowanych oznacza nowe wyzwania w sferze możliwego bezpieczeństwa i braku samozapłonu akumulatorów. Takie punkty krytyczne są tutaj trzy:
- bezpieczeństwo przerzutu strategicznego w ładowniach samolotów;
 - bezpieczeństwo przerzutu strategicznego w ładowniach statków;
 - wypracowanie procedur w sytuacji zapłonu i pożaru baterii. Po pierwsze bowiem, gaszenie baterii wymaga ich zalania. I po drugie, prewencyjnie pojazd z bateriami po wybuchu pożaru bądź grożący nim trzeba schłodzić wodą, tzn. zanurzyć w specjalnym kontenerze. O ile jeszcze w przypadku auta lekkiego, o dopuszczalnej masie do 7500 kg, nie powinno być z tym problemów, to jak jednak zanurzyć kilkunastotonową ciężarówkę czy kilkudziesięcotonowy czołg? Powyższe

wynika z faktu, że do podniesienia czołgu o masie 60 000-70 000 kg trzeba użyć co najmniej 120-150-tonowego żurawia. A takie żurawie, jak dotychczas, są raczej rzadko w posiadaniu sił zbrojnych. O ile jeszcze w kraju bogatym wyjście stanowi wówczas sprowadzenie takiego żurawia z przedsiębiorstw budowlanych sektora cywilnego, o tyle w warunkach bojowych, w tym szczególnie poza Europą, takie sprowadzenie będzie realnie niewykonalne.

21. Jak dotychczas to głównie sektor prywatny – same przedsiębiorstwa motoryzacyjne – inwestuje w elektryfikację pojazdów, w tym jeszcze niezwykle ograniczoną elektryfikację pojazdów wojskowych. To jednak w pewnym zakresie skazuje siły zbrojne na konieczność przejmowania tego, co będzie pochodziło z segmentu cywilnego i będzie tzw. komponentami, technologiami i rozwiązaniami COTS (*Civilian/Cost-Of-The Shelf* – cywilny/niskokosztowy z półki). Niemniej w takim układzie kluczowe stają się pytania, na które muszą odpowiedzieć przede wszystkim sami wojskowi decydenci:

- Czy produkty cywilne, nawet po określonej militaryzacji, są właściwe wdrożeniowo i użytkowo dla pojazdów wojskowych?
- Czy siły zbrojne zechcą finansować nie tylko programy elektryfikacji ich pojazdów w oparciu o propozycje z rynku cywilnego, ale także będą finansowały rozwój własnych, specyficznych opracowań od razu militaryzowanych – przy czym pojawia się tu pytanie, czy na takie opracowania będzie armie stać?
- Czy wojsko samo, w oparciu o wojskowe uczelnie i instytuty badawcze, ewentualnie we współpracy z czołowy podmiotami z sektora cywilnego i zbrojeniowego, a nawet utalentowanymi wynalazcami nie zechce tworzyć przedmiotowych organizmów celowych, funkcjonujących jako start-upy i przygotowujących pewne projekty z zakresu elektryfikacji – czy jedynie wybranych podzespołów, czy już gotowych układów i kompletnych systemów elektryfikacyjnych oraz skończonych pojazdów zelektryfikowanych?

Kluczową rolę w odpowiedzi na te pytania odegra strategia przyjęta w tym zakresie w powiązaniu ze środkami finansowymi przeznaczonymi na ten cel.

W tym kontekście siły zbrojne zasadniczo potrzebują sprzętu i taboru bardzo eksploatacyjnie uniwersalnego i elastycznego pod względem energetycznym. A takie właśnie uniwersalność i elastyczność wdrożeniowo-użytkową wciąż zabezpiecza tradycyjny układ napędowy. W porównaniu z nim układ zelektryfikowany, w tym w pełni elektryczny, wyróżnia zbyt wiele ograniczeń i różnorodnych wymagań, jakie szczególnie w warunkach polowych i bojowych mogą być niezwykle trudne do efektywnego i skutecznego spełnienia. A ich niespełnienie może wpłynąć negatywnie na zadania stawiane przed siłami zbrojnymi.

Dlatego wszelka elektryfikacja pojazdów wojskowych, niezależnie od jej rodzaju, bezwzględnie powinna być prowadzona w sposób militarnie podtrzymywalny (tab. 4). Oznacza to, że nie może być prowadzona na przysłowiową siłę i ze względów po części politycznych, co zachodzi w sektorze cywilnym, lecz przede wszystkim musi uwzględniać specyfikę działania armii. W związku z tym nie może

Tabela 4. Przewidywany przebieg procesu wprowadzania – analiza uproszczona

Rodzaj paliwa alternatywnego lub alternatywnego zespołu napędowego	Rodzaj pojazdu			
	logistyczne – wsparcia logistycznego szosowe	logistyczne – wsparcia logistycznego terenowe	rozpoznawcze	gąsienicowe bojowe
Gaz/biogaz	ograniczony zakres	brak celowości	brak celowości	brak celowości
Napęd hybrydowy	pełna możliwość już obecnie	wdrożenia testowe możliwe już teraz, komercjalizacja na ograniczoną skalę możliwa po roku 2030, w zależności od tempa rozwoju i komercjalizacji cywilnych technologii napędów elektrycznych	wdrożenia testowe możliwe już teraz	wdrożenia testowe możliwe już teraz
Napęd w pełni elektryczny	wdrożenia testowe możliwe już teraz	możliwe pewne wdrożenia, szczególnie w przypadku pojazdów lżejszych, o masie całkowitej poniżej 12000 kg; w przypadku pojazdów cięższych wciąż zbyt wiele wyzwań technicznych i w sferze zabezpieczenia pełnej mobilności, w tym przykładowo jak największego brodenia	ograniczona możliwość wdrożenia	obecnie brak technicznej możliwości oraz użytkowego sensu wdrożenia
Napęd elektryczny – gazowo-elektryczny – wodorowy z ogniwami paliwowymi	wdrożenia testowe możliwe już teraz	obecnie brak technicznej możliwości oraz użytkowego sensu wdrożenia	ograniczona możliwość wdrożenia	obecnie brak technicznej możliwości oraz użytkowego sensu wdrożenia

Źródło: opracowanie własne.

doprowadzać do spadku jej mobilności zarówno w układzie taktycznym, jak i strategicznym, oraz spadku zdolności bojowych, nie może też wiązać się z istotnymi problemami w niezakończonym bieżącym zabezpieczeniu logistycznym. Nie powinna także negatywnie rzutować na stronę kosztową – wydatki ponoszone na obronę z tego tytułu. Wręcz przeciwnie – od takiej elektryfikacji wdrażanej właśnie militarnie podtrzymywalnie wymaga się, by w pierwszym rzędzie:

- zwiększała mobilność taktyczną – dzielność terenową;
- pozytywnie przekładała się na walory eksploatacyjne taboru, oznaczając redukcję notowanego militarnego TCO;
- przyczyniała się do wzrostu efektywności energetycznej realizowanych operacji – pozwalała wykonać dane zadania przy mniejszym wydatku energetycznym;
- zwiększała możliwości bojowe – potencjał bojowy oraz dawała możliwość implementacji nowych scenariuszy działania – prowadzenia walki;
- nie oznaczała pogorszenia parametrów/właściwości w sferze możliwości dokonywania rzutu strategicznego sprzętu;
- nie wiązała się z żadnymi ograniczeniami i nowymi wyzwaniem oraz dodatkowymi kosztami w sytuacji realizacji misji zagranicznych, w tym rozjemczych i bojowych, łącznie z wojnami tradycyjnymi i asymetrycznymi;
- nie wpływała negatywnie na efektywność i skuteczność realizacji samego zabezpieczenia logistycznego, chociaż może się wiązać z pewną jego przebudową, wynikającą z zamiany konieczności dostarczania tradycyjnego paliwa na konieczność zabezpieczenia niezakłóconych dostaw energii elektrycznej. Niemniej, co trzeba tu jednoznacznie podkreślić – nie mogą z tego tytułu wzrosnąć koszty logistyczne, mierzone szerokim podejściem ogólnozasobowym, w którym ujmuje się nie tylko same koszty ekonomiczne – wydatki finansowe, ale też inne wydatki zasobowe, takie jak przykładowo czas i dodatkowa praca ludzka. Innymi słowami, ekologizacja ma te koszty zredukować, a nie podwyższać. Dodatkowo ma – a przynajmniej powinna – uprościć samą logistykę dostaw zapotrzebowania paliwowego – energetycznego nie tylko w kraju macierzystym, ale we wszystkich potencjalnych przypadkach użycia i tym samym również na pole walki, w tym na oddalone i zagrożone szerokim spektrum ataków;
- mogła dawać możliwość nowych opcji zastosowaniowych, jak wykorzystanie w hybrydzie modułu elektrycznego z generatorem do zasilania – eksportu energii do urządzeń zewnętrznych.

Na tej podstawie można przyjąć, że:

1. Napędy hybrydowe mogą już być stosowane w autach lżejszych, w tym terenowych, oraz logistycznych samochodach szosowych i uterenowionych. Do tej chwili (stan na 2023 rok) nie istnieją hybrydowe ciężarówki terenowe. Teoretycznie mogą one stanowić dosyć ciekawą opcję. Przy czym dotąd nie pojawił się żaden taki wariant na rynku cywilnym, chociaż z drugiej strony, RMMV wskazuje, że jego nowa militarna terenowa seria wysokotonażowa HX3 została bazowo przygotowana pod hybrydyzację jej układu napędowego. Większego ewentualnego upowszechnienia, ale związanego z tempem, charakterem i zasadniczymi kierunkami hybrydyzacji na rynku cywilnym, można oczekiwać po 2025 roku. Poza tym ten rodzaj napędu może być stosowany w pojazdach gaśnicowych, takich jak bojowe wozy piechoty, zarówno gaśnicowe, jak i kołowe, oraz czołgi. Na tym etapie są to wciąż jednak demonstracyjne prototypy.

Większe upowszechnienie wydaje się w tym przypadku możliwe po 2030 roku, przy założeniu jednak dużej dozy niepewności.

2. Napędy w pełni elektryczne mogą już trafiać do pojazdów szosowych, eksploatowanych głównie w zabezpieczeniu logistycznym. Większe upowszechnienie w sprzęcie transportowym różnych klas i typów będzie możliwe dopiero po 2030 roku, przy równoczesnym wskazaniu na szereg wyzwań, ograniczeń i niewiadomych temu towarzyszących. Na tym etapie napędy w pełni elektryczne nie są też jeszcze proponowane w wariantach terenowych, w tym o bardzo wysokiej mobilności taktycznej – zdolności do pokonywania trudnych bezdroży. W przypadku natomiast gąsienicowego sprzętu pancernego obecnie pełna elektryfikacja nie wydaje się możliwa ze względu na masę i wymiary baterii oraz ilość niezbędnej energii i czas ładowania akumulatorów. Innymi słowy, na tym etapie swojego rozwoju gąsienicowe bojowe pojazdy w pełni elektryczne, by mogły zacząć stanowić realną naturalną alternatywę wobec tradycyjnych odpowiedników, muszą zacząć otrzymywać akumulatory jako najbardziej krytyczny element w rozpatrywaniu uzasadnienia komercjalizacji elektryfikacji transportu drogowego, które w porównaniu z akumulatorami obecnie (stan na rok 2023) stosowanymi będą:

- nominalnie co najmniej o 90% tańsze – bezwzględnie oraz w przeliczeniu na kWh,
- cechować się pojemnością minimum 4-5-krotnie większą na 1 kg masy własnej, docelowo wskazana jest nawet 10-15-krotnie większa gęstość energii niż dla najnowocześniejszych baterii teraz użytkowanych (2023 rok),
- docelowo wyróżniać się masą analogiczną do masy pełnego zbiornika paliwa w porównywalnych warunkach zabezpieczającego analogiczny zasięg klasycznego pojazdu,
- nadawać się do utylizacji taniej, łatwej, szybkiej i nisko szkodzącej środowisku – utylizacja ta musi być tak samo zasobochłonna jak utylizacja zwykłych pojazdów ze spalinowymi jednostkami napędowymi,
- dawać się w pełni naładować w czasie zbliżonym do czasu tankowania pojazdu tradycyjnego o analogicznym zasięgu,
- charakteryzować się tzw. pierwszym cyklem życia o długości 12-15 lat,
- być łatwo wymienialne między pojazdami, tak samo jak zwykłe akumulatory, a nie optymalizowane do montażu w konkretnych miejscach w konkretnych typach środków przewozu,
- nie stwarzać dodatkowych zagrożeń w trakcie prowadzenia akcji bojowej, a zagrożenie wybuchem bądź pożarem po trafieniu ma być porównywalne z zagrożeniem obecnie notowanym w przypadku trafienia nawet w pusty zbiornik tradycyjnego paliwa,
- nie stwarzać dodatkowych zagrożeń w czasie i po prowadzeniu akcji ratowniczo-gaśniczych, takich jak możliwość ponownego samozapłonu czy porażenia prądem.

3. Napędy gazowo-/wodorowo-elektryczne. Na rynku cywilnym dopiero rozpoczyna się ich komercjalizacja. Na relatywnie większą skalę trafiają już one do autobusów miejskich oraz są montowane w pierwszych *de facto* testowych ciężarówkach, przeznaczonych przede wszystkim do wykonywania zadań w dystrybucji miejskiej i służbach komunalnych. Pierwsze komercyjne wodorowe ciężarówki do obsługi ruchu na dłuższych trasach spodziewane są dopiero około roku 2025. Nie wiadomo także, czy się przyjmą (od razu/później?), szczególnie że konieczne są niemałe dalsze wydatki na niezbędną infrastrukturę. W związku z tym większego cywilnego upowszechnienia tej technologii można oczekiwać po 2030 roku. Wydaje się zatem, iż do wojska może ona trafić dopiero kilka lat (dekadę?) później. Niezwykle dyskusyjna wydaje się ponadto implementacja tej technologii w sprzęcie bojowym i generalnie użytkowanym na polu walki, blisko styczności z wrogiem. Osobny problem stanowią dostawy wodoru – gazu niezwykle niebezpiecznego, ponieważ w momencie eksplozji instalacji wodorowej bardzo łatwo wybuchającego w styczności z tlenem. Do tego, by wodór zachowywał odpowiednią gęstość energii, musi być skroplony, co wymaga znacznych nakładów energii. W dodatku niezwykle wysokie są nakłady energii niezbędne na utrzymanie wodoru w takiej ciekłej postaci. Dlatego zarówno sam transport wodoru, jak i jego przechowywanie w pojazdach pola walki – transportowych i bojowych – nie wydaje się dobrym (delikatnie to określając) rozwiązaniem. Z punktu widzenia sił zbrojnych sprzęt/tabor wodorowy może się zatem okazać propozycją niezwykle niebezpieczną, gdyż odpowiednie trafienie w zbiornik wodoru może nieść za sobą poważne konsekwencje (niemal natychmiastowe zniszczenie pojazdu, nikiel szanse na ocalenie załogi). A samo paliwo nie może być materiałem ograniczającym zdolności bojowe oraz zdolność przeżycia.

Jednocześnie trzeba zaznaczyć, że wskazane wyżej prognozy obarczone są wysokim ryzykiem popełnienia błędów. Z jednej strony technologie te są bowiem teraz niezwykle intensywnie rozwijane w krajach wysoko uprzemysłowionych. Z drugiej zaś wciąż występuje wiele zagrożeń i wyzwań związanych z ich dalszym rozwojem oraz implementacją, szczególnie wprowadzaną w sposób naturalny, a nie wymuszony. Za takie kluczowe czynniki sterujące (tzw. *drivery*) należy tu zatem uznać:

- tempo i zakres komercjalizacji poszczególnych technologii paliwowo-napędowych na rynku cywilnym,
- zdolność do sprostania przez poszczególne technologie surowym wymaganiom wojskowym, głównie w odniesieniu do kryteriów uniwersalności i elastyczności eksploatacyjnej oraz pewności stosowania w odmiennych scenariuszach użycia – wsparcia logistycznego i wdrożenia w warunkach pola walki – klasycznego, asymetrycznego, zdronizowanego – czy misji zagranicznych,
- koszty wdrożenia i zabezpieczenie pełnej logistyki wsparcia dla nowych pojazdów w kraju i za granicą – na misjach zagranicznych, jeśli konieczne/wymagane,
- dalszą dostępność jednak stale doskonalonych tradycyjnych układów napędowych,

- decyzje polityczne uwzględniające specyfikę sił zbrojnych jako nietypowego odbiorcę sprzętu/taboru i jego użytkownika. - tzn. pewne ekologizacyjne decyzje polityczne nie mogą nawet w najmniejszym stopniu ograniczyć zdolności bojowych oraz założonej projekcji siły w kraju macierzystym i poza jego granicami. Innymi słowy, w ekologizacji pojazdów sił zbrojnych trzeba zastosować podejście, w którym prym nad ekologią będą jednak wiodły kwestie czysto praktyczne. W rezultacie to raczej stosowane paliwa alternatywne i alternatywne zespoły napędowe trzeba dopasować do potrzeb i specyfiki sił zbrojnych, niż siły zbrojne mają się dopasowywać do tych paliw i napędów – tzn. armie mogą się ekologicznie zmieniać, lecz ekologizując tak, by dopasowywaniu ich schematu postępowania i funkcjonowania do specyfiki danych wdrażanych paliw czy napędów alternatywnych nie towarzyszyło nawet najmniejsze ograniczanie własnego potencjału bojowego w jakichkolwiek zaistniałych scenariuszach wprowadzenia i walki. Oczywiście, jeśli stosowanie paliw czy napędów alternatywnych wykazuje pełne uzasadnienie taktyczne, strategiczne, bojowe i logistyczne, jak rozsądne wdrożeniowo wprowadzanie układów hybrydowych, wówczas taką ekologizację poprzez elektryfikację trzeba uznać za jak najbardziej wskazaną i militarnie odpowiednio umotywowaną. Z tego powodu zarówno elektryfikacja, jak i biopaliwa rzeczywiście mogą się kiedyś okazać niezbędne w wojskowej transformacji klimatycznej. Kwestia dotyczy jednak nie faktu „czy”, bo to kwestia po części polityczna, lecz „kiedy, w jakim zakresie oraz w jakim tempie”. To z kolei stanowi pochodną czynników takich jak postęp techniczny w tej dziedzinie, priorytety rozwoju danych sił zbrojnych i ich finansowanie, zdolność przemysłu do przedstawienia rozwiązań satysfakcjonujących armie, realna przydatność operacyjna pewnych propozycji, itd.

Literatura

- 10 steps to deploy military electric fleets. Optimal charging networks for reliability, resilience, and sustainability*, Black & Veatch, <https://webassets.bv.com/2022,2022-08/22GEx10StepsMilitaryElectricFeetsEbook%20%282%29.pdf> (pobranie danych 11.02.2023).
- A Whitepaper from the Army Applications Laboratory. Powering an electric vehicle infrastructure for the U.S. Army. Shared challenges point the way to shared solutions*, luty 2021, <https://aal.army/assets/files/pdf/whitepaper-power-transfer.pdf> (pobranie danych 23.02.2023).
- Bailey G., *The Red Ball Express – The unknown link in winning World War Two?*, http://www.historyisnowmagazine.com/blog/2015/8/12/the-red-ball-express-the-unknown-link-in-winning-world-war-two#.Y_J2EXbMJPY= (pobranie danych 21.01.2023).
- Bernhard W., *More efficient, quieter and cleaner: How trucks perform – today and in the future*, VDA konferencja, prezentacja, 25-26 czerwca 2014.
- Blakemore R., Nurkin T., *Power projection: Accelerating the electrification of US Military Ground Vehicles*, Issue Brief, listopad 2022, Atlantic Council Global Energy Center, <https://www.atlanticcouncil.org/wp-content/uploads/2022/11/Power-Projection-Accelerating-the-Electrification-of-US-Military-Ground-Vehicles.pdf> (pobranie danych 27.02.2023).
- Brach J., *Holenderska Królewska Marynarka Wojenna wprowadza do użytku pierwszą elektryczną Scanii 25P do zaopatrywania okrętów w porcie*, <https://transport40.com/holenderska-krolewska-marynarka-wojenna-wprowadza-do-uzytku-pierwsza-elektryczna-scanie-25p-do-zaopatrywania-okretow-w-porcie/> (pobranie danych 16.02.2023).
- Brach J., *Hybrydowy opancerzony pojazd taktyczny Oshkosh eJLTV*, <https://www.auto-motor-i-sport.pl/ciezarowki-i-autobusy/Hybrydowy-opancerzony-pojazd-taktyczny-Oshkosh-eJLTV,46554> (pobranie danych 12.04.2022).
- Brach J., *Kołowe Wozy Zabezpieczenia Technicznego firmy Szczęśniak PS*, Agencja Wydawnicza CB, Warszawa 2020.
- Brach J., *Nowe spojrzenie na ekologizację i proekologizację napędów pojazdów wojskowych*, Nowa Technika Wojskowa, nr 3/2023.
- Brach J., *Nowe układy napędowe wojskowych pojazdów Tatra*, <https://zbiam.pl/nowe-uklady-napedowe-wojskowych-pojazdow-tatra/> (pobranie danych 1.09.2023).
- Brach J., *Nowe układy napędowe wojskowych Tatr*, <https://transport40.com/nowe-uklady-napedowe-wojskowych-tatr/> (pobranie danych 2.09.2023).
- Brach J., *Nowoczesna europejska ciężarówka wojskowa w przyszłości – implikacje dla Polski*, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, Wrocław 2017.
- Brach J., *Wybrane aspekty podniesienia w warunkach zachodnioeuropejskich efektywności ciężkich i mega-ultraciężkich miejskich przewozów dystrybucyjnych*, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, Wrocław 2023 (w druku).
- Brach J., *Zastosowanie paliw alternatywnych i alternatywnych zespołów napędowych w samochodach ciężarowych klas tonażowych średniej i ciężkiej w warunkach zachodnioeuropejskich. Wyzwania i ograniczenia – aspekty praktyczne*, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, Wrocław 2022.
- British Army, *British Army approach to battlefield electrification*, maj 2022, <https://www.army.mod.uk/media/17010/british-army-approach-to-battlefieldelectrification.pdf> (pobranie danych 27.02.2023).
- Cao W., Zhang J., Li H., *Batteries with high theoretical energy densities*, Energy Storage Materials, nr 26/2020.

- Dalsjø P., *Hybrid electric propulsion for military vehicles. Overview and status of the technology*, Norwegian Defence Research Establishment (FFI), 24 czerwca 2008.
- Drive Electric Inc., *What is an EV?*, <https://driveelectric.org.nz/individuals/what-is-an-ev/> (pobranie danych 21.01.2023).
- Goldie-Scot L., *A behind the scenes take on lithium-ion battery prices*, 5 marca 2019, Bloomberg NEF, <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/> (pobranie danych 10.08.2023).
- Hummel P., Q-Series Reports, UBS Global Research, *USB evidence lab electric car teardown-disruption ahead?*, 18 maja 2017, <https://neo.ubs.com/shared/d1wkuDIEbYPjF/> (pobranie danych 2.02.2023).
- Hybrid hydraulic vehicle fuel economy evaluation*, https://en.wikipedia.org/wiki/Family_of_Medium_Tactical_Vehicles (pobranie danych 11.02.2017).
- Ilie C.O., Barothi L., Marinescu M., Giurgiu I.T., *Aspects of electric transmission implementation on a battle tank*, AITS 2021 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1220 (2022) 012017 IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/1220/1/012017, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1220/1/012017/pdf> (pobranie danych 21.02.2023).
- Janiszewski M., *Hybrydowe pojazdy wojskowe*, rozdz. XII, [w:] P. Simiński (red.), *Rozwój pojazdów wojskowych*, BEL Studio, Warszawa 2013.
- Judson J., *Is the army warming up to electric vehicles in its fleet?*, Defense News, 12 lipca 2021, <https://www.defensenews.com/land/2021/07/12/is-the-armywarming-up-to-electric-vehicles-in-its-fleet/> (pobranie danych 27.02.2023).
- Kness R., *The future of electric vehicles in the army's fleet*, <https://news.clearancejobs.com/2022/11/02/the-future-of-electric-vehicles-in-the-armys-fleet/> (pobranie danych 19.02.2023).
- Khalil G., *Challenges of hybrid electric vehicles for military applications*, Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf., September 2009.
- Krause M., *Hybrid drives for military vehicles?*, <https://actrans.de/en/hybrid-drives-for-military-vehicles/>, Insights (pobranie danych 21.01.2023).
- Market Watch*, <https://www.marketwatch.com/story/10-things-that-make-the-tesla-a-great-car-2016-08-19> (pobranie danych 21.01.2023).
- McMahon J., *More electric cars mean fewer mechanical jobs*, Forbes, 30 maja 2019, <https://www.forbes.com/sites/jeffmcmahon/2019/05/30/more-electric-cars-fewer-manufacturing-jobs/#6ad250ff3378> (pobranie danych 2.02.2023).
- Miedema L., *Hybrid-electric military vehicles for the canadian army*, Her Majesty the Queen in Right of Canada, as represented by the Minister of National Defence, 2016 Canadian Forces College – Collège Des Forces Canadiennes JCSP 42 – PCEMI 42 2015 – 2016 JCSP Service Paper – PCEMI Étude Militaire.
- Miličević S.V., Blagojević I.A., *Component sizing and energy management for a series hybrid electric tracked vehicle*, Vojnotehnički glasnik/Military Technical Courier, 2022, vol. 70, issue 4.
- Mills W., Wiechens R., *The lethality case for electric military vehicles*, <https://mwi.usma.edu/the-lethality-case-for-electric-military-vehicles/> (pobranie danych 22.01.2023).
- Mittal V., Novoselich B., Rodriguez A., *Hybridization of US Army combat vehicles*, SAE Technical Paper 2022-01-0371, 2022 2022-03-29, <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2022-01-0371/preview/> (pobranie danych 5.04.2023).
- Motowidlak U., *Rozwój zrównoważonego transportu w świetle przepisów dyrektyw Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE oraz 2009/30/WE*, Logistyka, nr 2/2014.
- Nowicka K. (red.), *Gospodarka w obiegu zamkniętym, Cz. 2. Łańcuchy dostaw*, Oficyna Wydawnicza SGH, Warszawa 2022.
- Ogorkiewicz R., *Electric transmission for tanks*, Int. Defense Review, 1990, vol. 2, s. 196-197.
- Simiński P., *Hybryda wojskowa*, <http://www.militaryrok.pl/index.php/technika/159-hybryda-wojskowa.html> (pobranie danych 11.07.2016).

- Simiński P., Recenzja wydawnicza monografii dr. hab. J. Bracha, *Ekologizacja współczesnych pojazdów wojskowych – główne kierunki rozwojowe oraz zasadnicze wyzwania i ograniczenia. Wybrane zagadnienia*, maszynopis na prawach rękopisu, Siedlce, 21 marca 2023.
- Skowroński A., *Zrównoważony rozwój perspektywą dalszego postępu cywilizacyjnego*, Problemy Ekorozwoju, nr 2/2006.
- Taira H., Yoshikawa T., Jumonji K., *Development of tracked combat hybrid-electric vehicle*, Mobility Research Division, Ground Systems Research Center Acquisition, Technology and Logistics Agency, Ministry of Defense of Japan (ATLA-MOD) Sagamihara-shi, Kanagawa, Japan, https://www.dst.defence.gov.au/sites/default/files/basic_pages/documents/ICSILP18Thu1430_Taira_et_al-Tracked_Hybrid-Electric_Combat_vehicle.pdf (pobranie danych 22.02.2023).
- Vergun D., *Army showcases stealthy, hydrogen fuel cell vehicle*, 30 stycznia 2017, https://www.army.mil/article/181342/army_showcases_stealthy_hydrogen_fuel_cell_vehicle, (pobranie danych 21.01.2023).
- Vergun D., *Prototype aims to reduce fuel use, improve tactical vehicle performance*, DOD News, US Department of Defense, November 24, 2021, <https://www.defense.gov/News/News-Stories/Article/Article/2853649/prototype-aims-to-reduce-fuel-use-improve-tactical-vehicle-performance/> (pobranie danych 27.02.2023).
- White Paper – Electrification of U.S. Army Ground Force (An evolutionary revolution)*, 2019, https://calstart.org/wp-content/uploads/2020/10/Vehicle_Electrification_Paper_29JUN20.pdfm (pobranie danych 21.01.2023).
- Winston A., *Inside UPS's electric vehicle strategy*, Harvard Business Review, 29 marca 2018, https://hbr.org/2018/03/inside-upss-electric-vehiclestrategy?utm_source=feedburner&utm_medium=feed&utm_campaign=Feed%3A+harvardbusiness+%28HBR.org%29 (pobranie danych 11.02.2023).

Inne materiały

- GDELS – zestaw materiałów prasowych na targi Eurosatory, Paryż, czerwiec 2022 roku.
- Informacja prasowa Renault Trucks Defense, *VAB ELECTER at Eurosatory 2016*, Renault Trucks Defense, 8 czerwca 2016 roku.
- Informacje przekazane na seminarium Tatry w dniu 20 października 2021 roku, Koprzywnica.
- Materiały wewnętrzne Arqus i CapGemini przygotowane na seminarium, prezentacja 26 października 2022 roku.
- Materiały prasowe GDLSE, targi Eurosatory, Paryż, czerwiec 2022 roku.
- Materiały Thales Australia na temat pojazdu Bushmaster, 2022 rok.
- RMMV-MAN, zestaw oficjalnych materiałów przekazanych na temat serii HX3 oraz informacje przekazane na konferencji, Wiedeń, 6 maja 2021 roku.
- Scania, zestaw materiałów prasowych i informacyjnych na targi Eurosatory 2018, Paryż, czerwiec 2018 roku.

Strony internetowe

- <https://agglomerado.digital/en/chevrolet-colorado-zh2-usa/> (pobranie danych 21.01.2023)
- http://www.artsa.com.au/assets/library/2003_artsa_matheson_tmc.pdf (pobranie danych 11.02.2017)
- <https://www.arqus-defense.com/newsroom/news/end-combustion-engine-military-vehicles> (pobranie danych 22.01.2023)
- <https://www.army.mod.uk/news-and-events/news/2021/07/army-hybrid-vehicles-power-forward/> (pobranie danych 21.01.2023)
- <https://www.baesystems.com/en-us/feature/hybrid-electric-drive-for-the-military-of-tomorrow>, (pobranie danych 11.02.2023)

- <http://www.bosch-prasa.pl/informacja.php?idinformacji=1502> (pobranie dsanych 11.02.2020)
- [www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA579702 – M1078](http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA579702-M1078) (pobranie danych 11.02.2017)
- Hybrid Hydraulic Vehicle Fuel Economy Evaluation <https://breakingdefense.com/2022/10/army-planning-hybrid-tactical-vehicle-tests-next-year/> (pobranie danych 26.01.2022)
- <https://defensecommunities.org/2021/11/dod-sending-private-sector-a-signal-about-its-electric-vehicle-commitment-hicks-says/> (pobranie danych 21.01.2023)
- <http://defense-update.com/features/du-3-05/feature-HED-trucks.htm> (pobranie danych 12.04.2017)
- <https://www.defenseone.com/technology/2022/10/hybrid-electric-troop-transport-are-moving-toward-battlefield/378460> (pobranie danych 11.02.2023)
- <https://eda.europa.eu/docs/default-source/posters/11---hybrid-drive-trains-for-military-purpose---hybridt.pdf> (pobranie danych 11.02.2023)
- <https://www.ffi.no/en/publications-archive/hybrid-electric-propulsion-for-military-vehicles-overview-and-status-of-the-technology> (pobranie danych 11.02.2023)
- <http://www.hybrid-vehicle.org/hybrid-truck-hemtt.html> (pobranie danych 12.04.2017)
- <http://www.globalsecurity.org/military/systems/ground/fts-msv.htm> (pobranie danych 11.07.2017)
- <https://innovation.rosenbauer.com/de/concept-fire-truck/> (pobranie danych 9.12.2021),
- <https://www.joint-forces.com/defence-equipment-news/54790-texelis-wheeled-armoured-vehicle-electrification> (pobranie danych 22.02.2023)
- <https://magtec.co.uk/magtec-powers-hybrid-military-vehicles-for-battlefield-of-the-future/> (pobranie danych 21.01.2023)
- http://www.military-today.com/trucks/maneuver_sustainment_vehicle.htm (pobranie danych 11.07.2017)
- <https://www.millbrook.co.uk/news/2021/hybrid-military-vehicle-programme-led-at-utac-s-millbrook-proving-ground-on-behalf-of-the-mod/> (pobranie danych 21.01.2023)
- <https://mwi.usma.edu/the-lethality-case-for-electric-military-vehicles/> (pobranie danych 21.01.2023)
- https://en.wikipedia.org/wiki/Family_of_Medium_Tactical_Vehicles (pobranie danych 11.02.2017)
- <https://oshkoshdefense.com/components/propulse/> (pobranie danych 12.04.2017)
- <https://www.rosenbauer.com/de/int/group/presse/wirtschaftspresse/wirtschaftspresse-detail/nd/rosenbauer-startet-den-internationalen-verkauf-seiner-rt-modellreihe-mit-hybridem-antrieb> (pobranie danych 14.12.2021)
- <https://www.rosenbauer.com/de/int/presse/fachpresse/nd/vorhang-auf-fuer-den-rt> (pobranie danych 14.12.2021)
- <https://www.scania.com/nl/nl/home/about-scania/newsroom/news/2023/koninklijke-marine-neemt-erste-elektrische-scania-in-gebruik.html> (pobranie 16.02.2023)
- <https://sisuauto.com/sisu-auton-strategiset-tavoitteet-vientitoiminnassa/> (pobranie danych 21.01.2018),
- <https://sisuauto.com/en/sisu-polar-hybrid-deliveries-commence/> (pobranie danych 25.12.2020)
- <https://sisuauto.com/sisu-polar-hybrid-mallisto-vie-kuorma-autojen-huipputehot-uuteen-luokkaan/> (pobranie danych 25.12.2020)
- <https://www.thedefensepost.com/2022/08/11/australia-bushmaster-electric-vehicle/> (pobranie danych 21.01.2023)
- <http://www.trucktrend.com/cool-trucks/0901dp-manuever-sustainment-vehicle/> (pobranie danych 11.07.2017)
- <http://www.trucktrend.com/cool-trucks/1107dp-diesel-electric-hybrid-hemtt-oskosh-a3/> (pobranie danych 12.04.2017)
- <https://www.wpr.org/oshkosh-defense-receives-new-patents-hybrid-military-vehicle> (pobranie danych 26.01.2022)
- <https://zbiam.pl/krolewska-holenderska-marynarka-wojenna-wprowadzila-do-uzytku-pierwsza-elektryczna-ciezarowke/> (pobranie danych 16.02.2023)

Spis tabel

1. Specyfikacja komponentów dodanych do pojazdów w celu ich elektryfikacji.....	112
2. Dane porównawcze wyliczone dla pojazdu HMMWV	112
3. Dane porównawcze wyliczone dla pojazdu ISV.....	113
4. Przewidywany przebieg procesu wprowadzania – analiza uproszczona	140

Greening of Modern Military Vehicles – the Main Development Directions as Well as Major Challenges and Limitations. Selected Issues

Abstract

This monograph is one of the first compact studies in our country on the subject of greening propulsion systems of military vehicles and discussing it in a relatively broad way. At the same time, the author would like to draw attention to several related issues. First of all, by the expression greening of military vehicles, the author means their electrification or gas-/hydrogen-electrification (fuel cell technology), because clean technologies based on methane to power the propulsion of military vehicles – apart from a few exceptions – are practically unsuitable. In addition, the work discusses the greening of only vehicles with a maximum permissible weight of 3500-5000 kg and more. At the same time, changes and progress in the discussed field occur extremely quickly, some views presented here may be disavowed very quickly, similarly to approximate assessments, conclusions, indications and predictions about the future. In this context, an extremely important – even critical – issue is the appropriate configuration of the electrified drive system from the side of the installed hardware – internal combustion engine in a hybrid system, engine/motors/electric, batteries of a specific type and with a specific nominal capacity, gears and software – software controlling the whole system, allowing for the maximally optimized operation of the entire system in the field of energy management and its maximum saving, including recuperation. The key question in all of these conceptual studies, therefore, remains to what extent is the technology ready for use or for series production. Especially since, while in recent decades, cutting-edge military technology has often resulted in commercial derivatives in the civilian market, this relationship has already been reversed. Currently, commercial off-the-shelf technologies (COTS) often replace high-end solutions from various niche military markets, which clearly shows how much destructive potential lies in HED (Hybrid Electric Drive) drive units. Purchasing cycles in this field last from 10 to 20 years, and in some cases much longer. So, if manufacturers of drivelines miss the trend and are unable to deliver these innovative systems in time for tender, their drive components will no longer be installed in the next generation of products. This means that the relevant markets would likely be closed for decades and it would be unclear to what extent these markets could be reopened at a later date. At the moment, therefore, one main multi-faceted conclusion appears here – the electrification of land military vehicles is only in the pre-implementation phase. Necessary analytical, conceptual and study works are carried out and the first functional experimental units are created, which can hardly even be called fully prototype. Rather, they are

so-called technology demonstrators. The electrification of military vehicles is thus delayed in various aspects in relation to electrification in the civil sector by about 10 years. However, in this case, the above does not constitute a complaint, on the contrary – it indicates a legitimate expectation. All the more so that the armed forces face an effort to determine and define how the energy transformation should/may take place in their case. In the civilian market, as a result of primarily political and strategic elements, supported by ecological elements, this transformation is largely forced and outlined by law, i.e. by the political environment. Whether it will proceed in the armed forces in the same way and due to similar components, time will tell. However, a strong political primacy cannot be ruled out. When implementing the HED architecture, it is of fundamental importance to ensure that the technology is a real improvement over a conventional powertrain under realistic operating conditions. Therefore, electrification should not be implemented in the armed forces only because it seems modern and popular, and the balance of CO₂ emissions by specific vehicles of the armed forces is certainly not the most important aspect of war.

