

Leszek KASPRZYK*
Filip LASKOWSKI*

KONCEPCJA POJAZDU NAPĘDZANEGO ENERGIĄ SŁONECZNĄ

W pracy dokonano przeglądu samochodów zasilanych energią słoneczną. Opisano stosowane ogniwa fotowoltaiczne i akumulatory oraz omówiono ich najważniejsze parametry. Zaprezentowano zależności umożliwiające wyznaczenie energochłonności pojazdów samochodowych. Główną część pracy stanowi projekt układu zasilania samochodu napędzanego energią słoneczną. Przedstawiona została problematyka eksploatacji poszczególnych elementów układu napędowego oraz analiza podstawowych parametrów pojazdu. Praca stanowi opis części projektu budowy samochodu solarnego realizowanego przez studentów Politechniki Poznańskiej zrzeszonych w zespole "PUT Solar Dynamics".

SŁOWA KLUCZOWE: samochód solarny, ogniwa PV, akumulatory

1. WPROWADZENIE

Wiele współczesnych koncernów stawia sobie za główny cel poprawę aspektów ekologicznych swoich produktów, a w szczególności wzrost ich efektywności energetycznej. Tendencja ta wynika zarówno z rosnącej świadomości dotyczącej ochrony środowiska naturalnego, jak i stale wprowadzanych regulacji prawnych. Podobny trend dotyczy światowej gospodarki, ponieważ większość złóż ropy naftowej, stosowanej obecnie powszechnie w transporcie, znajduje się w rejonach niepewnych politycznie. Nie da się również ukryć, że niezwykle istotna dla gospodarki poszczególnych państw jest niezależność energetyczna. Powoduje to rozwój ekologicznych, odnawialnych technologii pozyskiwania energii elektrycznej. Fakt niedogodnego położenia złóż ropy naftowej oraz ich nieustannego wyczerpywania się powoduje konieczność rozwoju alternatywnych rozwiązań napędów stosowanych w transporcie.

Większość źródeł literaturowych wskazuje lata 2080–2100 jako koniec eksploatacji złóż ropy naftowej, a obecny czas – szczyt światowego wydobycia tego surowca [3]. Ze względu na czynniki techniczne i ekonomiczne coraz prężniej rozwija się przemysł samochodów elektrycznych. To właśnie energia elektrycz-

* Politechnika Poznańska.

na jest najpoważniejszą alternatywą dla ropy naftowej. Prognozy wskazują wzrost produkcji i sprzedaży samochodów elektrycznych – szacuje się, że w roku 2040 samochody elektryczne stanowiąc będą od 30 do 40% pojazdów samochodowych na świecie.

Z tego powodu, w pracy zajęto się tematyką pojazdów łączących w sobie cechy alternatywnego transportu i ekologicznych źródeł energii. Warunek ten spełniają samochody elektryczne zasilane energią słoneczną, tak zwane samochody solarne.

2. SAMOCHODY ZASILANE ENERGIĄ SŁONECZNĄ

Pojazdy solarne jako pojazdy elektryczne charakteryzują się wieloma zaletami. Jedną z najważniejszych jest fakt, że napęd elektryczny umożliwia znaczne uproszczenie konstrukcji samochodu w porównaniu do rozwiązań spalinowych. Budowa prostsza jest o takie elementy jak układ zapłonowy, układ wtryskowy, systemy oczyszczania spalin. Ich sprawność wynosi ponad 90%, a silników spalinowych 20–30% [5, 8]. Dodatkowo, stosując konstrukcję silnika elektrycznego bezpośrednio połączonego z kołem, wyeliminować można skrzynię biegów oraz sprzęgło, powodując tym samym wzrost sprawności całego pojazdu.

Kolejną zaletą samochodów elektrycznych jest możliwość odzyskiwania energii podczas hamowania. Energia odzyskana w ten sposób może zostać zgromadzona w akumulatorach lub oddana kołu zamachowemu, które odda energię przy przyspieszaniu. System ten pozwala znacznie zwiększyć zasięg samochodu osobowego przy jednoczesnym zwiększeniu żywotności elementów ciernych układów hamulcowych. Rozwiązania takie są wprawdzie stosowane również w samochodach spalinowych (w rozwiązaniach hybrydowych) lecz jest to wykorzystywane na małą skalę.

Koszty eksploatacyjne napędu elektrycznego są również ważną zaletą pojazdów elektrycznych. Pomijając konieczność wymiany akumulatorów, koszt pokonania 100 km autem elektrycznym wynosi 3–5 zł [6]. Lecz jeśli wziąć pod uwagę koszty eksploatacji związane z zużyciem akumulatorów, szybkim spadkiem ich pojemności oraz koniecznością ich wymiany – auta elektryczne wypadają zdecydowanie gorzej w porównaniu do samochodów spalinowych. Porównując samochody spalinowe i elektryczne o podobnej klasie i o podobnej mocy zauważalna jest znaczna różnica cen sięgająca nawet 50% na korzyść napędów spalinowych. Wynika to głównie z cen akumulatorów, których koszt sięga nawet 70% całego samochodu. Ich cena najprawdopodobniej będzie systematycznie spadać wraz z rozwojem nowych technologii, co spowoduje wzrost sprzedaży samochodów elektrycznych.

W przypadku samochodów solarnych napęd elektryczny zasilany jest nie tylko z akumulatorów, lecz również energią pochodzącą z ogniw fotowoltaicznych.

Aktualnie na świecie samochody solarne dominują wśród pojazdów przeznaczonych do udziału w zawodach tego typu pojazdów, np.: World Solar Challenge, American Solar Challenge czy też Sasol Solar Challenge. Zawody te stymulują dalece posunięty rozwój motoryzacji w kierunku syntezy z przemysłem fotowoltaicznym. Są one nie tylko okazją do ścigania się bolidów, ale również do prezentowania światu rozwiązań w dziedzinie samochodów osobowe. Głównymi kryteriami sukcesu w klasie Cruiser, w której biorą udział pojazdy z co najmniej dwoma osobami na pokładzie, są efektywność energetyczna, ergonomia oraz strategia jazdy. Organizatorzy pokazują w ten sposób potrzebę dążenia do stworzenia pojazdu, który – w sprzyjających warunkach atmosferycznych – jest niezależny energetycznie.

3. PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ FOTOWOLTAICZNYCH STOSOWANYCH DO ZASILANIA POJAZDÓW SOLARNYCH

Projekt w pełni funkcjonalnego samochodu napędzanego energią słoneczną stawia przed projektantami szereg wymogów, związanych z aspektami praktycznymi, predyspozycją do codziennego użytku oraz zasięgiem pojazdu. Należy bowiem zadbać o redukcję masy pojazdu, oporów aerodynamicznych i oporów toczenia przy jednoczesnym zapewnieniu wysokiej sprawności przemian energii.

Panele fotowoltaiczne dobiera się głównie pod względem wysokiej sprawności oraz niskich spadków mocy wraz ze wzrostem temperatury. Ich dodatkowymi zaletami są niska masa i elastyczność. Pierwsza cecha pozwala na redukcję ciężaru pojazdu, który przekłada się bezpośrednio na opory toczenia. Elastyczność paneli, powoduje natomiast brak potrzeby szukania kompromisu pomiędzy optywowym kształtem bryły pojazdu, a ułożeniem na jej powierzchni sztywnych, długich paneli, które zaburzyłyby jego aerodynamikę.

3.1. Monokrystaliczne ogniwa krzemowe

Jednym z najstarszych i najdłużej występujących na rynku rozwiązań ogniwa fotowoltaicznych są ogniwa z krzemu monokrystalicznego. Osiągana przez nie efektywność konwersji energii jest najwyższa spośród wszystkich technologii krzemowych, jednak przekłada się to na największy koszt produkcji.

Przewidywana maksymalna sprawność osiągnięta przez ogniwa monokrystaliczne wynosi 32,9%, natomiast na skalę masową to 24,7% [4]. Sprawność obecnych rozwiązań dystrybuowanych na szeroką skalę nie przekracza 20%, natomiast na specjalne zamówienie możliwe do pozyskania są rozwiązania o sprawnościach sięgających 25%. Cena tych pierwszych w handlu detalicznym wynosi średnio od 3 do 5 zł/W, drugich natomiast sięga nawet 100 zł/W.

Obok zadawalającego stosunku ceny do sprawności, najważniejszą zaletą ogniw monokrystalicznych jest ich żywotność. Zdecydowana większość producentów ogniw czy paneli fotowoltaicznych gwarantuje maksymalny spadek ich wydajności nie przekraczający 20% po 25 latach pracy [4]. Wieloletnia degradacja ogniw pod wpływem światła słonecznego prowadzi głównie do spadku jego absorpcyjności. Wypalenia spowodowane zacienieniami, delaminacja, mikro-pęknięcia, defekty złącz, awarie elektryczne, usterki mechaniczne czy wyeksploatowanie elementów instalacji w czasie jej eksploatacji mają również znaczny wpływ na osiągnięte przez nią sprawności.

Przy projektowaniu instalacji fotowoltaicznej zasilającej pojazd samochodowy należy wziąć pod uwagę również wpływ temperatury pracy ogniw na jego sprawność. Wzrost temperatury wpływa na spadek napięcia obwodu otwartego ogniw. Dla typowych rozwiązań ogniw monokrystalicznych spadek mocy oddawanej przez nie wynosi od 0,35 do 0,45% na 1°C [4]. W przypadku najefektywniejszych rozwiązań wartość ta spada w optymalnych warunkach do 0,32% na 1°C [10]. Ogniw fotowoltaiczne pracują często przy temperaturze sięgającej 75°C, która przewyższa temperaturę warunków standardowych (STC) wynoszącą 25°C. Z tego powodu moc znamionowa ogniw podana dla warunków STC może zmaleć na skutek wzrostu temperatury o ponad 20%. Ta niepomijalnie duża wartość spadku mocy musi zostać uwzględniona przy obliczaniu uzysku energetycznego z instalacji fotowoltaicznej.

Stosunek ceny do sprawności monokrystalicznych ogniw krzemowych oraz ich pozostałe właściwości techniczne spowodowały najpowszechniejsze wykorzystanie tej technologii do zasilania samochodów napędzanych energią słoneczną. W zawodach World Solar Challenge 2015, samochody z ogniwami krzemowymi stanowiły ponad 90% pojazdów.

3.2. Ogniw z arsenku galu

Ogniw wykorzystujące arsenek galu osiągają obecnie najwyższe sprawności wśród dostępnych na rynku. Główną tego przyczyną jest wysoka ruchliwość ładunków elektrycznych, przewyższająca tą w krzemie. Mniejsze znaczenie, niż w przypadku ogniw krzemowych, ma w ogniwach z arsenku galu temperatura pracy, która może sięgać nawet 400°C [7]. Spadek mocy wraz ze wzrostem temperatury nie przekracza 0,1% na 1°C. Predysponuje to te ogniw do współpracy z koncentratorami, które w sposób sztuczny powiększają natężenie promieniowania świetlnego. Prowadzi to do wzrostu generowanej przez ogniwo mocy oraz temperatury, która jest dla nich stosunkowo niegroźna.

Maksymalna sprawność teoretyczna ogniw wynosi 35%, natomiast na skalę masową osiągnięte sprawności to 26% [1]. Wszystkie wymienione zalety fotoogniw z arsenku galu dają im zdecydowaną przewagę techniczną nad technologiami krzemowymi. Kluczową kwestią jest jednak ich cena – koszt kilkumetro-

wej powierzchni takich ogniw potrzebny do zasilania samochodu solarnego to co najmniej 450000 zł, co przekłada się na jednostkowy koszt bliski 400 zł/W. Cena ogniw wynika z technologii ich produkcji. Zalety techniczne ogniw z arsenku galu w zastosowaniu motoryzacyjnym nie rekompensują ich wysokiej ceny.

3.3. Ogniwa wielozłączone

Najbardziej obiecującą obecnie technologią fotowoltaiczną są wielozłączone ogniwa słoneczne. Są one podzielone na warstwy, z których każda przystosowana jest do absorpcji światła o innej długości fali. Ich zwielokrotnienie daje ogniwu możliwość pochłaniania fotonów z szerokiego pasma długości fal świetlnych, co zwiększa znacznie jego sprawność.

Osiągane obecnie przez ogniwa wielozłączone maksymalne sprawności wynoszą od 45 do 50% [4, 7]. Badania i szacunki, wskazują na maksymalne osiągnięte przez te rozwiązania sprawności na poziomie od 70 do 86% [4, 7]. Duża sprawność, pozwala osiągnąć wysoką koncentrację mocy na jednostkę powierzchni, co z kolei predysponuje tę technologię do wykorzystania w miejscach o dużym zapotrzebowaniu na energię i dostępnym małym obszarze pod instalację fotowoltaiczną. Nie znalazły one dotychczas zastosowania w motoryzacji, jednakże ich wysoka koncentracja mocy na jednostkę powierzchni powinna wraz ze spadkiem ich cen spowodować szersze wykorzystanie tej technologii nawet w małogabarytowych pojazdach samochodowych.

Wysoka cena, sięgająca 900 zł/W mocno ogranicza powszechne zastosowanie tego rozwiązania. Uwzględniając dalszy rozwój tej dziedziny fotowoltaiki, można spodziewać się ciągłego spadku cen ogniw wielozłączowych i wprowadzanie ich na szeroką skalę do produkcji energii elektrycznej.

4. CHARAKTERYSTYKA MOBILNYCH UKŁADÓW MAGAZYNOWANIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Głównym wymaganiem stawianym samochodom elektrycznym przez użytkowników jest ich zasięg. W samochodach zasilanych dodatkowo energią słoneczną, pojemność akumulatorów może być odpowiednio mniejsza ze względu na energię wyprodukowaną w ogniwach fotowoltaicznych. Dodatkowym czynnikiem jest energia pochodząca z hamowania rekuperacyjnego. Optymalny dobór znamionowej ilości energii zgromadzonej w baterii, przy uwzględnieniu aspektów techniczno-ekonomicznych, jest kluczowym aspektem wyboru odpowiedniej strategii jazdy samochodów wyścigowych i osobowych.

Wybór mobilnego układu magazynowania energii opiera się głównie na ilości energii w nim zgromadzonej, gęstości masowej tej energii, zakresu tempera-

tur pracy urządzenia oraz przewidywanej liczby cykli ładowania/rozładowania. Głównym ograniczeniem ilości zmagazynowanej energii jest masa oraz koszt akumulatorów. Masa akumulatorów, a co jest z tym związane samochodu, ma największe znaczenie przy dynamicznych zmianach prędkości – przyspieszaniu i hamowaniu. Dostateczne zmniejszenie cen baterii przy jednoczesnym rozwoju technologii w kierunku wzrostu gęstości energii, w przyszłości pozwoli osiągnąć samochodom elektrycznym zasięg znacznie przekraczający 1000 kilometrów.

Do efektywnej pracy akumulatorów wymagany jest system zarządzania baterią BMS (z ang. *battery management system*). Jest to system nadzoru, który może monitorować pracę magazynów energii od akumulatora po pojedyncze ogniwa. Do jego głównych zadań należą pomiar napięcia, temperatury i poboru prądu ogniwa oraz balansowanie napięcia i ochrona termiczna ogniwa. BMS ogranicza negatywny wpływ eksploatacji na żywotność akumulatora oraz utrzymuje optymalne warunki pracy ogniwa.

4.1. Ogniwa litowo-jonowe

Wśród ogniwa powszechnie dostępnych na rynku ogniwa litowo-jonowe wyróżnia jedna z najwyższych gęstości energii, która, w zależności od producenta, wynosi do 250 Wh/kg (przewidywana, maksymalna do osiągnięcia przez ogniwa litowo-jonowe gęstość energii to ok. 500 Wh/kg) [2]. Żywotność baterii litowo-jonowych, w zależności od ich typu sięga od 500 do 2000 cykli [2]. Niewątpliwą zaletą akumulatorów litowo-jonowych jest fakt, iż w stosunkowo krótkim czasie można rozładowywać i ładować je wiele razy, nie zmniejszając przy tym ich pojemności. Wraz ze wzrostem temperatury, rośnie pojemność ogniwa, jak i napięcie ładowania. W przypadku pracy przy temperaturze -20°C napięcie ładowania spada z poziomu ok. 4,1 V do poziomu 3,6 V, a pojemność spada prawie dwukrotnie [2]. Optymalny zakres temperatur otoczenia dla eksploatacji ogniwa litowo-jonowych to od 20 do 40°C . Nieprawidłowa eksploatacja tych baterii, ich przegrzanie lub przeładowanie, grozi zapłonem i wybuchem.

Główną wadą tej technologii jest wysoka cena produkcji, skutkująca wysoką ceną sprzedaży ogniwa. Pomimo stałego spadku ich cen, są one nadal wielokrotnie droższe niż konkurencyjne rozwiązania, takie jak ogniwa niklowo-kadmowe, niklowo-metalowo-wodorkowy czy kwasowo-ołowiowe. Cena ogniwa litowo-jonowych jest od 2 do 4 razy wyższa niż cena ogniwa w technologiach niklowych i nawet do 10 razy niż baterii kwasowo-ołowiowych [9].

Są one najpowszechniejszymi obecnie magazynami energii w elektronice użytkowej oraz samochodach elektrycznych i hybrydowych. Akumulatory litowo-jonowe znajdują zastosowanie również w dziedzinie pojazdów zasilanych energią słoneczną, gdzie dominują wśród wybieranych rozwiązań. Ponad 90% pojazdów występujących w zawodach World Solar Challenge 2015 posiadało magazyn energii w postaci pakietów ogniwa litowo-jonowych 18650.

4.2. Ogniwa litowo-siarkowe

Głównym problemem technologii litowo-siarkowej jest zużycie wielosiarczków, które powstają w trakcie redukcji siarki na katodzie. W przeciwieństwie do siarki oraz powstającego finalnie na katodzie siarczku litu, bierze ona udział w reakcjach z elektrolitem, przez co część pierwotnego materiału jest bezpowrotnie tracona [9].

Ogniwa te cechuje przede wszystkim wysoka gęstość energii sięgająca obecnie 400 Wh/kg [9]. Własność ta wynika ze stosunkowo niskich gęstości litu oraz siarki. Badania wykazują spadek pojemności wynoszący 0,039% na jeden cykl. Charakterystyki napięciowo-pojemnościowe w zakresie temperatur od 23 do 60°C są również korzystniejsze dla ogniw litowo-siarkowych, w porównaniu do ogniw innego rodzaju [9].

Dalszy wzrost gęstości energii, żywotności oraz bezpieczeństwa ogniw litowo-siarkowych przy jednoczesnym rozpowszechnianiu ich na rynku powinien spowodować wyparcie przez nie ogniw litowo-jonowych.

4.3. Ogniwa litowo-polimerowe

Technologia ogniw litowo-polimerowych jest bardzo zbliżona do technologii litowo-jonowej. Główna różnica to zastąpienie standardowego elektrolitu przewodzącymi polimerami. Wprowadzenie w roli elektrolitu polimerów zdolnych do przewodzenia prądu elektrycznego pozwoliło konstruować ogniwa o małej grubości oraz wysokiej elastyczności. Wyeliminowanie ciekłych soli litu z roli elektrolitu spowodowało znaczny spadek odporności ogniwa na przeładowanie i nadmierne rozładowanie. Wymaga to wprowadzenia do ich układu złożonych, elektronicznych systemów balansujących. Zabezpieczają one również przed możliwym, nawet przy niewielkim uszkodzeniu ogniwa, pożarze i wybuchu. Kolejną wadą ogniw litowo-polimerowych jest ich żywotność, która wynosi od 300 do 400 cykli [9]. Zaletę stanowi natomiast ich gęstość energii, która w porównaniu do ogniw litowo-jonowych jest wyższa i sięga 350 Wh/kg [9].

4.4. Ogniwa litowo-żelazowo-fosforanowe

Ogniwa litowo-żelazowo-fosforanowe są bardzo zbliżone do ogniw litowo-jonowych. W tym przypadku różnią się materiałem, z którego zbudowane są katody – w tym rozwiązaniu wykonane są z tlenku litowo-żelazowo-fosforanowego. Stabilność reakcji chemicznych oraz brak zagrożeń dla użytkownika przy fizycznym uszkodzeniu stawiają tę technologię jako najbezpieczniejszą ze wszystkich opisanych w tej pracy. Cechuje je również wysoka żywotność – po 1000 cykli pracy zachowują 95% pojemności pierwotnej, a liczba cykli życia sięga od 2000 do 3000 [9]. Dodatkowo, niepełne ładowanie nie po-

woduje utraty pojemności ogniów, co determinuje ich zastosowanie w wymagających warunkach. Osiągają niższą gęstość energii od standardowych ogniów litowo-jonowych, wynoszącą od 100 do 150 Wh/kg [9].

Akumulatory litowo-żelazowo-fosforanowe znajdują zastosowanie w podobnych dziedzinach co akumulatory litowo-jonowe, lecz na mniejszą skalę.

5. KONCEPCJA POJAZDU SOLARNEGO

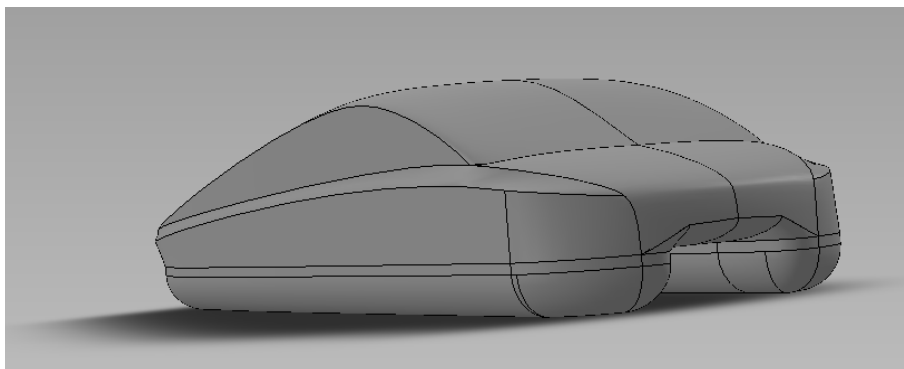
Samochód solarny projektowany jest z zamysłem udziału w zawodach World Solar Challenge 2017, których regulamin narzuca wymagania dotyczące stosowania pewnych rozwiązań [11]. Projekt realizowany jest zgodnie z koncepcjami zespołu PUT Solar Dynamics działającego przy Politechnice Poznańskiej, który zajmuje się budową rozważanego pojazdu. Dwuosobowy samochód ma spełniać wymagania funkcjonalności oferowane przez klasyczne samochody. Finalnym celem projektu jest uzyskanie zasięgu wynoszącego co najmniej 500 km, co pozwoli na przejechanie wymaganego, dziennego odcinka trasy podczas zawodów bez zatrzymywania się, jadąc między godz. 8:00 a 17:00. Na potrzeby projektu przyjęte zostają:

- dopuszczalna przez regulamin zawodów powierzchnia monokrystalicznych, krzemowych ogniów fotowoltaicznych $S = 5 \text{ m}^2$,
- średnia prędkość jazdy $v = 70 \text{ km/h}$,
- masa samochodu $m_s = 425 \text{ kg}$,
- masa dwóch pasażerów $m_p = 160 \text{ kg}$,
- współczynnik oporu aerodynamicznego zaprojektowanego nadwozia $c_x = 0,2$,
- powierzchnia czołowa zaprojektowanego nadwozia $A = 1,8 \text{ m}^2$,
- gęstość powietrza $\rho = 1,21 \text{ kg/m}^3$,
- instalacja elektryczna pracująca przy napięciu $U = 96 \text{ V}$,
- płaska droga poruszania się pojazdu.

Poza układem elektrycznym, również nadwozie wpisywane jest w strategię efektywności energetycznej, dlatego przyjęto specyficzny kształt pojazdu, którego opory aerodynamiczne mają być możliwie niskie. Bryła pojazdu solarnego, projektowanego przez zespół PUT Solar Dynamics, przedstawiona została na rysunku 1. Masa całego pojazdu zredukowana jest poprzez zastosowanie ultralekkich i wytrzymałych materiałów, jak m.in. włókno węglowe i mieści się w zakresie 400–425 kg, dlatego zastosowanie znajdują tutaj bardzo cienkie opony.

W projekcie wybrano opony Ecopia Solar Race Tire firmy Bridgestone, które wraz z dobranymi łożyskami zapewniają współczynnik oporu toczenia f_t , nieprzekraczający wartości 0,005 [12]. Wyznaczona, dla założonej masy pojazdu wraz z pasażerami m , siła oporu toczenia wynosi:

$$F_t = mgf_t = 28,7 \text{ N} \quad (1)$$



Rys. 1. Bryła pasażerskiego samochodu solarnego projektowanego przez zespół PUT Solar Dynamics [autor: Adam Kłós]

Przyjęty współczynnik oporu aerodynamicznego oraz powierzchnia czołowa wynikają z zamodelowanej bryły pojazdu. Dla tych parametrów, siła oporu aerodynamicznego wynosi:

$$F_a = \frac{1}{2} \rho c_x A v_w^2 = 82 \text{ N} \quad (2)$$

Sumując siły oporu toczenia i oporu powietrza uzyskano niezbędną siłę napędową:

$$F_N = F_t + F_a = 110,7 \text{ N} \quad (3)$$

Przy założonej prędkości ruchu, moc na kołach wyznaczono z zależności:

$$P_k = (F_t + F_a)v = 2147 \text{ W} \quad (4)$$

Na podstawie obliczonej potrzebnej mocy na kołach, przyjęte zostają dwa bezszczotkowe silniki prądu stałego Solar Car M2096D–III firmy Mitsuba, o sprawności znamionowej η_s równej 95% oraz mocy znamionowej $P_{s_{zn}} = 2000 \text{ W}$ każdy. Jest to rozwiązanie dedykowane pojazdom solarnym. Charakterystyki silników gwarantują ich wysoką sprawność w szerokim zakresie obciążenia, dlatego ich zastosowanie jest uzasadnione w przypadku, gdy każdy będzie pracował przy około 60% obciążenia znamionowego. Zostaną one zamontowane w tylnych kołach samochodu, eliminując tym samym potrzebę wykorzystania przekładni. Na podstawie znanej sprawności wyznaczono moc elektryczną silników wynoszącą $P_S = 2260 \text{ W}$ (po 1130 W na każdy silnik). Zakładając, że każdego dnia samochód będzie poruszał się przez 9 godzin ze stałą prędkością, zapotrzebowanie energetyczne silników wynosi $W_S = 20,34 \text{ kWh}$.

Dla założonego zakresu mocy i napięcia pracy dobrane zostały sterowniki WaveSculptor22 firmy Tritium, dedykowane do zastosowania w samochodach elektrycznych. Najważniejsze parametry wybranego sterownika to:

- zakres napięcia wejściowego 0–165 V,

- zakres napięcia wyjściowego 0–120 V,
- maksymalny chwilowy prąd wyjściowy 100 A,
- maksymalna chwilowa moc wyjściowa 20 kVA [15].

Ze względu na stosunek wydajności do ceny, z możliwych rozwiązań fotowoltaicznych wybrane zostały monokrystaliczne ogniwa krzemowe C60 firmy SunPower. Ich najważniejsze parametry to: napięcie znamionowe $U_{\text{mpp}} = 0,577$ V, sprawność $\eta_o = 22,1\%$, współczynnik zależności mocy od temperatury $\gamma = -0,32\%/^{\circ}\text{C}$ oraz wskaźnik $NOCT = 45^{\circ}\text{C}$.

Każdego dnia zawodów, samochody mogą pokonywać trasę jedynie w godzinach 8.00–17.00. Z tego powodu przyjęto, że pojazd porusza się bez przerwy w wymienionych godzinach. Na podstawie szacowanej chwilowej lokalizacji samochodu określony został kąt padania promieni słonecznych na ogniwo α , uwzględniający nachylenie dachu. Podobnie zdefiniowane zostało natężenie promieniowania słonecznego E , temperatura otoczenia T_o oraz współczynnik korelacji nasłonecznienia dla powierzchni horyzontalnej w zależności od pochylecia ogniwa ε . Na podstawie obliczeń uwzględniających wyżej wymienione parametry, wyznaczona została liczba ogniw n_o przypadająca na założoną powierzchnię pojazdu przeznaczoną na ogniwa w kształcie kwadratu o boku $d = 0,125$ m:

$$n_o = \frac{S}{d^2} = 320 \quad (5)$$

oraz ilość energii wyprodukowanej przez instalację fotowoltaiczną w ciągu jednego dnia zawodów (od godziny 8:00 do godziny 17:00):

$$W_o = \int_{t=8}^{t=17} E(t) \cdot \eta_o \cdot dt = 7,71 \text{ kWh} \quad (6)$$

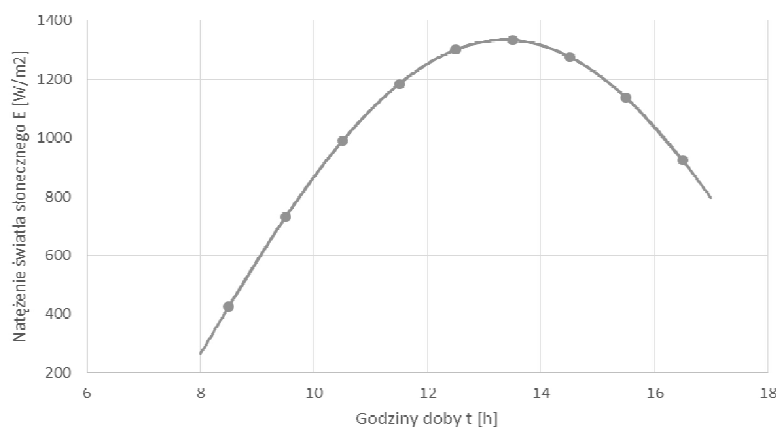
gdzie: $E(t)$ – nasłonecznienie [W/m^2], η_o – sprawność ogniwa (wg katalogu) [–].

Zależność nasłonecznienia w czasie trwania jednego dnia zawodów przedstawiono na rysunku 2.

Założono, że ogniwa zostaną połączone w dwa stringi zbudowane z 160 ogniwa, a do optymalizacji uzysku energetycznego z instalacji fotowoltaicznej zastosowane będą regulatory (po jednym regulatorze na każdą gałąź ogniwa) MPPT typu DC/DC Boost MPPT Race V 4.0 firmy Drivetek AG. Ich najważniejsze parametry to:

- ciągła moc wejściowa 5–800 W,
- maksymalna moc wejściowa 1250 W,
- maksymalny prąd wejściowy 9 A,
- napięcie wejściowe 36–144 V,
- napięcie wyjściowe 40–200 V,
- stosunek napięcia wyjściowego do wejściowego 1,05–4 [16].

Zapotrzebowanie energetyczne, które nie zostanie zaspokojone przez energię wytworzoną przez ogniwa fotowoltaiczne, będzie uzupełnione przez akumulatory. Ilość tej energii wynika z różnicy energii potrzebnej do jazdy oraz energii dostarczonej przez ogniwa i dla założonych warunków wynosi 12,66 kWh. Jednak ze względu na to, że nie można dopuszczać do pełnego rozładowania akumulatorów, ponieważ skutkuje to znacznym spadkiem żywotności baterii litowo-jonowych, przyjęto minimalny poziom naładowania akumulatorów $SOC = 30\%$. W związku z tym, przyjęto wartość energii koniecznej do zgromadzenia w akumulatorach $W_a = 20$ kWh.



Rys. 2. Założone nasłonecznienie w ciągu dnia zawodów

Ze względu na wysoką gęstość energii, szeroki zakres temperatur pracy oraz możliwość głębokiego rozładowania dobrano akumulatory w postaci ogniw litowo-jonowych typu NCR-18650B firmy Panasonic, o napięciu znamionowym $U_{O_n} = 3,6$ V oraz pojemności znamionowej $C_{O_n} = 3,350$ Ah (pojemności energetycznej $W_{O_n} = 12$ Wh).

Ze względu na występującą stale wysoką temperaturę otoczenia na zawodach w zakresie $30\text{--}40^\circ\text{C}$, zakłada się temperaturę pracy baterii litowo-jonowych $T_O = 60^\circ\text{C}$. W związku z tym, należy uwzględnić zmianę pojemności baterii, ponieważ wartość podana w karcie katalogowej dotyczy pracy baterii w temperaturze 25°C . W tej sytuacji, na podstawie charakterystyk producenta, przyjmuje się względny wzrost pojemności na poziomie 2% [13]. Zatem rzeczywista wartość pojemności pojedynczego ogniwa wynosi nieznacznie więcej ($W_{O_{rz}} = 12,3$ Wh).

Z tego powodu wymagana liczba ogniw litowo-jonowych n_O , tworzących magazyn energii jest równa:

$$n_o = \frac{W_a}{W_{O_{12}}} = 1626 \quad (7)$$

W celu uzyskania na wyjściu magazynu energii napięcia zgodnego z napięciem układu sterowania silnikiem, konieczne jest połączenie ogniw w pakiety. Przyjęto, że w pojedynczym pakiecie znajdować się będzie 27 ogniw połączonych szeregowo, a liczba pakietów połączonych równolegle wyniesie 61. Dla takiej konfiguracji połączeń akumulatorów sprawdzono także ograniczenia producenta ogniw pod kątem prądów na pojedynczym ogniwie (który dla założonych warunków pracy wyniesie 0,392 A) oraz łączną masę akumulatorów (77,2 kg).

W celu optymalizacji i kontroli pracy magazynu energii stosuje się systemy zarządzania BMS. Dla zaprojektowanego układu wybrano elektroniczny system Orion BMS Standard, który realizuje następujące zadania:

- pomiar napięcia i ochrona przed przekroczeniem granicznych jego wartości,
- pasywne balansowanie ogniw,
- pomiar temperatur i ochrona przed przegrzaniem [14].

Każde ogniwo zostanie podłączone do systemu BMS, dzięki czemu będzie indywidualnie balansowane. BMS ma również możliwość chłodzenia baterii przy pomocy powietrza, wody lub innej cieczy chłodniczej. W rozważanym projekcie przyjęto chłodzenie z wykorzystaniem wody.

6. WNIOSKI

Alternatywne, elektryczne napędy są niewątpliwie przyszłością transportu. Ich współpraca z odnawialnymi źródłami energii może zagwarantować im w sprzyjających warunkach pełną niezależność energetyczną. Spośród źródeł odnawialnych najlepiej do tego celu nadają się ogniwa fotowoltaiczne. Materiały wykorzystywane do budowy wysokosprawnych pojazdów o zasilaniu solarnym są obecnie zbyt drogie, żeby myśleć o wprowadzeniu ich na masową skalę na rynek motoryzacyjny. Lecz ciągły rozwój technologii fotowoltaicznych oraz mobilnych magazynów energii, przy jednoczesnym spadku ich cen oraz wzroście popularności, może w przyszłości doprowadzić do rozwoju powszechnej produkcji właśnie samochodów solarnych.

Co ważne, samochód podczas postoju może być ładowany przez ogniwa słoneczne, nie czerpiąc energii ze źródeł zewnętrznych. W tym celu wykorzystywane są specjalne układy, dzięki którym podczas postoju można odchylić lub całkowicie odłączyć powierzchnię dachu samochodu. Pozwala to na bezemisyjną jazdę samochodem elektrycznym. Niezależnie od tej koncepcji, możliwe jest również szybkie, tradycyjne ładowanie akumulatorów z sieci elektroenergetycznej.

Poruszany temat stanowi bardzo ważne zagadnienie ze względu na perspektywę wyczerpujących się paliw kopalnianych, a także z uwagi na współczesny trend dotyczący odejścia od napędów spalinowych na rzecz elektrycznych.

Studencki zespół PUT Solar Dynamics projektując samochód solarny skupił się przede wszystkim na maksymalizacji sprawności przemian energetycznych zachodzących we wszystkich urządzeniach.

Zaprojektowany zasięg pojazdu, który był głównym kryterium doboru elementów układu napędowego i związanych z tym obliczeń, przekroczył 700 km. Oznacza to, że projektowany samochód dorównuje zasięgiem pojazdom elektrycznym najwyższej klasy. Wskaźnik ten jest obecnie jednym z najważniejszych aspektów świadczących o praktyczności aut elektrycznych.

LITERATURA

- [1] Anspaugh B., GaAs Solar Cell Radiation Handbook, National Aeronautics and Space Administration, USA 2014.
- [2] Brodd R., Kozawa A., Yoshio M., Lithium–Ion Batteries: Sciences and Technologies, Springer International Publishing, USA 2009.
- [3] Goodstein D., Out of Gas: The End of the Age of Oil, WW. W. Norton & Company, USA 2005.
- [4] Jastrzębska G., Ogniwa słoneczne: budowa, technologia i zastosowanie, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2014.
- [5] Krykowski K., Silniki PM BLDC. Właściwości, sterowanie, aplikacje, Wydawnictwo BTC, Legionowo 2015.
- [6] Larminie J., Lowry J., Electric Vehicle Technology Explained, John Wiley & Sons Ltd, England 2003.
- [7] Rath J., Multijunction Solar Cells: Theory and Applications, Taylor & Francis Group, USA 2012.
- [8] Wajand J., Wajand T., Tłokowe silniki spalinowe średnio- i szybkoobrotowe, Wydawnictwa Naukowo–Techniczne, Warszawa 2005.
- [9] Zhengcheng Z., Sheng S., Rechargeable Batteries, Springer International Publishing, Switzerland 2015.
- [10] <http://www.sun-life.com.ua/doc/sunpower%20C60.pdf> [dostęp: 03.02.2017].
- [11] https://www.worldsolarchallenge.org/files/1504_2017_bwsc_regulations_final_release_version__11.pdf [dostęp: 09.02.2017]
- [12] http://images.wikia.com/solarcar/images/3/35/NGM_Bridgestone_Ecopia_Tire_Specs.pdf [dostęp: 09.02.2017]
- [13] http://www.bto.pl/B2CProdukt.aspx?id_artykulu=42324 [dostęp: : 09.02.2017]
- [14] <http://www.electrircarpartscompany.com/Orion-BMS-Standard-Up-to-180-Cells-Extended> [dostęp: 09.02.2017]
- [15] http://tritium.com.au/wp-content/uploads/2012/07/TRI88.003v2_Datasheet.pdf [dostęp: 12.02.2017].
- [16] http://www.drivetek.ch/fileadmin/user_upload/MPPT-Race_Spec_Sheet_Version4_bruegg.pdf [dostęp: 12.02.2017].

CONCEPT OF A VEHICLE POWERED BY SOLAR ENERGY

The presented thesis provides an overview of solutions used in vehicles powered by solar energy. It describes types of used solar cells and rechargeable batteries and their major parameters. It presents depending describing the energy consumption of the vehicle. The main part of the thesis is the power system project of a vehicle powered by solar energy. It presents exploitation problems of various system components and the analyze of basic parameters reached by that car. This thesis is a part of building a solar car project, implemented by Poznan University of Technology students, affiliated to the team "PUT Solar Dynamics".

(Received: 13. 02. 2017, revised: 27. 02. 2017)