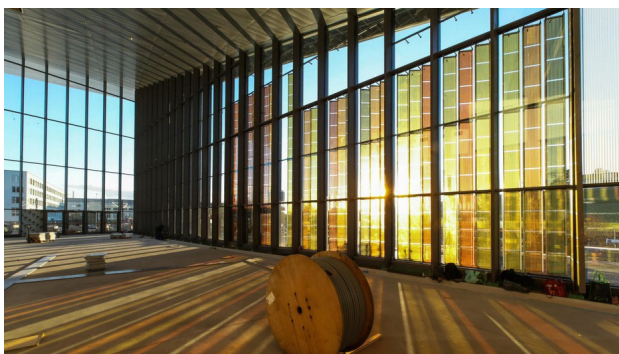


Jednakże ich niska sprawność i trudności pozyskania czynią na razie ten typ paneli nieużytecznym dla celów wojskowych.

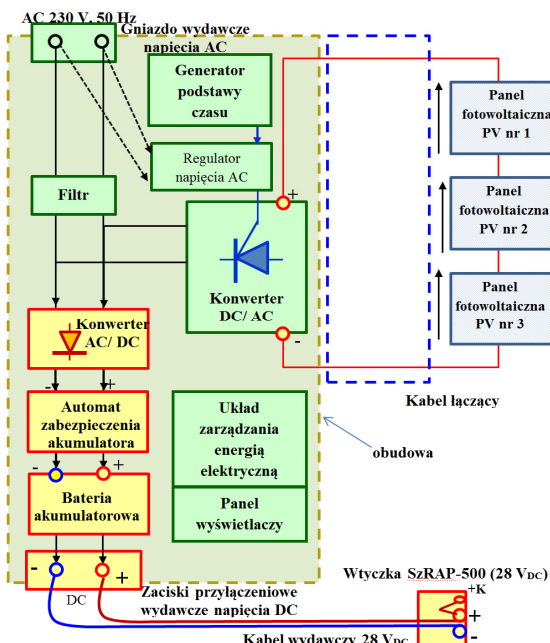


Rys. 1. Centrum Kongresowe EPFL (w czasie budowy) z ogniwami fotowoltaicznymi trzeciej generacji pełniącymi jednocześnie rolę kolorowych szyb [1].

Podstawowe informacje o systemie fotowoltaicznym do celów militarnych

System z ogniwami fotowoltaicznymi powinien zapewnić:

1. Niską wykrywalność: wzrokową, w spektrum podczerwieni, niskie wibracje akustyczne, niski poziom promieniowania w pasmach radiowych.
2. Wysoką podatnością na montaż i demontaż.
3. Możliwość wsparcia procesu rozruchu silników napędowych statków powietrznych (napięcie DC) spełniającego specjalistyczne normy jakościowe.
4. Możliwość zasilania systemów łączności i radiolokacji (napięcie AC) z zapewnieniem wysokiego poziomu jakości energii elektrycznej.



Rys. 2. Schemat blokowy fotowoltaicznego systemu energetycznego do zasilania statków powietrznych (DC) oraz urządzeń łączności (AC) konstrukcji ITWL

Analogicznie jak w cywilnych układach fotowoltaicznych, w projektowanym wojskowym systemie elektroenergetycznym musi być układ zarządzania energią elektryczną sterujący rozdziałem energii elektrycznej i diagnozującym poprawność działania systemu [4]. Zazwyczaj system taki jest oparty na zasadzie podwójnego przetworzenia – odbiór energii elektrycznej prądu stałego, przetworzenie na prąd przemienny, poddanie ww. prądu AC procesowi stabilizacji i regulacji napięcia, następnie

ewentualnym prostowaniu (zwykle części) energii systemu – rys. 2. Kontrolą i optymalizacją przepływu energii elektrycznej zajmuje się układ zarządzania energią elektryczną. Dodatkowym jego zadaniem jest przekazywanie Użytkownikowi danych diagnostycznych i parametrów jakości energii elektrycznej na panelu wyświetlaczy – rys. 3.



Rys. 3. Panel sterowania zastosowanego w konstrukcji ITWL

Podstawowe informacje o istniejących lub projektowanych systemach fotowoltaicznych do celów militarnych

W ramach programu NATO Smart Energy w państwach takich jak Grecja, Niemcy, Wielka Brytania, Stany Zjednoczone, Holandia prowadzi się intensywne badania i rozwija się projekty polowych systemów energetycznych [1]. Od kilku lat niemiecka Bundeswehra wyposażona jest w mobilne systemy elektroenergetyczne typu MC66 – rys. 4.



Rys. 4. Zestaw paneli fotowoltaicznych typu MC66, będący na wyposażeniu Bundeswehry [5]
a) rozwinięty b) podczas transportu

W skład systemu MC66 wchodzi 66 paneli PV, każdy o mocy 300 W, pozwala to uzyskać maksymalną moc o wartości 19,8 kW. Energia elektryczna magazynowana jest w baterii akumulatorów LiFePo4 o mocy 30 kW. System MC66 może pracować samodzielnie oraz współpracować ze stacjonarną siecią elektroenergetyczną (ZSE). Całość mieści się w standardowym 20 stopowym kontenerze. Zestaw przeznaczony do zasilania stanowisk dowodzenia, obozów wojskowych itp. [5].

Obok zestawów wykorzystujących jedynie ogniwa fotowoltaiczne do pozyskiwania energii rozwijane są również zestawy hybrydowe, wykorzystujące kilka rodzajów źródeł energii elektrycznej. Mobilny System Zarządzania Energią – MEMS niemieckiej firmy PFISTERER integruje konwencjonalne źródło energii elektrycznej (krajowa sieć elektroenergetyczna lub agregat prądotwórczy) z różnymi odnawialnymi źródłami energii (OZE). System MEMS składa się z dwóch ZSE każdy o mocy 10 kW, turbiny

wiatrowej o maksymalnej mocy 5 kW, paneli fotowoltaicznych (PV) o maksymalnej mocy 5 kW oraz magazynu energii elektrycznej (zestawu baterii akumulatorowych) – $W = 60$ kWh.

Powiązanie systemu wielkopowierzchniowych ciężkich paneli fotowoltaicznych (rys. 4) z elektrownią wiatrową nie budzi zaufania środowiska wojskowego – w strefie flanki wschodniej NATO, w jakiej znajduje się Polska, takie zestawy byłyby zbyt łatwo wykrywalne przez drony rozpoznawcze przeciwnika. Jednakże sama idea wykorzystania fotowoltaiki dla celów militarnych wydaje się dobrym kierunkiem prowadzonych badań. Przykładem rozwiązań w obszarze nowych technologii obronnych jest zastosowanie paneli elastycznych opisane w [6]. Panele takie łatwiej jest transportować i maskować, dodatkowo nie wymagają one sprzętu inżynierskiego do ich montażu i demontażu, co w warunkach wysokiej dynamiki pola walki jest wyjątkowo istotne.

Rozpatrywane w [7] bierne zabezpieczenie paneli fotowoltaicznych przed ostrzałem m.in. poprzez zastosowanie pokrycia paneli szkłem pancernym, ma istotne wady. Stosowane w nich szkło pancerne jest wyjątkowo ciężkie i utrudniłoby sprawne przemieszczanie zestawów fotowoltaicznych. Uwaga konstruktorów powinna się skupić na lekkich i elastycznych konstrukcjach łatwych do przebazowania w warunkach polowych. Ponadto wszelkie płaskie powierzchnie dają intensywne odbłaski demaskujące ich położenie – powierzchnie mikro-ogniwi paneli powinny mieć powierzchnię fotoogniwi matową i sfalowaną. Fotoogniwa powinny być geometrycznie odseparowane od siebie, co znacznie zmniejszy efekt całkowitego odbicia i ułatwi ich maskowanie w terenie.



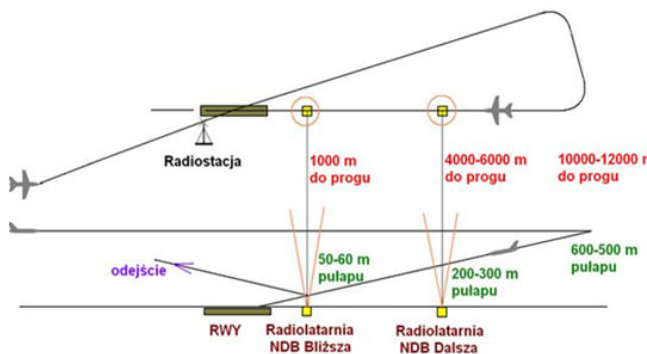
Rys. 5. Ruchomy węzeł łączności cyfrowej RWŁC-10/T [materiały reklamowe WZŁ-1 Zegrze]



Rys. 6. Stacja radiolokacyjna Bystra to w ogromnym uproszczeniu nieduży przeciwlotniczy radar umieszczony na podwoziu samochodu terenowego Żubr (z firmy AMZ Kutno) – na zdjęciu widoczny holowany agregat prądowłóczy [materiały reklamowe WZŁ-1 Zegrze]



Rys. 7. Rozstawianie systemu TACAN na lotnisku polowym



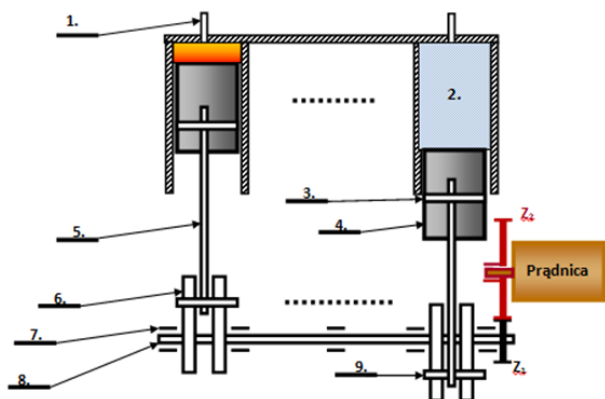
Rys. 8. Ogólny schemat podejścia do lądowania z wykorzystaniem NDB

Wojskowe systemy łączności, radiolokacji, naziemnych systemów nawigacyjnych oraz ich wymagania w aspekcie jakości energii elektrycznej

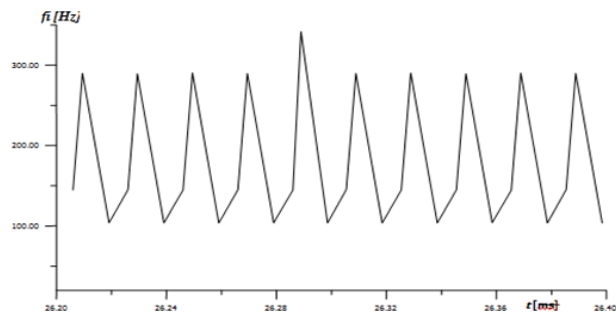
Aktualnie szeroko rozumiane wojska łączności i radiolokacji są w stanie intensywnego przeobrażania. Szybkie przesyłanie informacji w systemie obrony przeciwlotniczej oznacza mniej strat wśród ludności cywilnej i oddziałów wojskowych – przykładowe układy mobilne tego systemu przedstawiono na rys. 5+8. Ogólnie biorąc nowe systemy potrzebują znacznie mniej mocy (prawie o 50% mniej) niż starsze. Jednocześnie systemy radiolokacyjne (rys. 6) mają zapotrzebowanie energetyczne ponad dwukrotnie większe niż systemy łączności (rys. 5).

Tak więc o ile starszym technologicznie systemom łączności wystarczała moc dysponowana do 20 kVA, to dla systemów radiolokacyjnych zapotrzebowanie to dochodziło do 50 kVA. Dla nowszych technologicznie systemów łączności moc dysponowana dochodzi do 10 kVA, a dla systemów radiolokacyjnych zapotrzebowanie to dochodzi do 25 kVA. Należy jednak zauważyć, że nowsze systemy wymagają także wyższej klasy jakości energii elektrycznej. Najważniejsze zjawiska, stwierdzone przez obsługę to migotanie światła powodujące zmęczenie wzroku, dynamiczne zmiany napięcia oraz obniżenia napięcia (zapady) [4] powodujące przegrzewanie się odbiorników. Niezwykle istotna dla nowoczesnej aparatury łączności, dla naziemnych środków nawigacji statków powietrznych oraz systemów radiolokacyjnych jest minimalizacja: zawartości harmonicznych, energii impulsów szpilkowych i dewiacji częstotliwości, które poprzez zasilanie mogą zakłócać proces przepływu sygnałów cyfrowych [8-11]. Niestety, o ile krajowe wytwórnie urządzeń podążają za nowoczesnymi rozwiązaniami wojskowych systemów łączności oraz unowocześniają systemy radiolokacyjne, to w ich zasilaniu w warunkach polowych niewiele się zmieniło – bazują nadal na agregatach prądowłóczy napędzanych silnikami Diesla o dużej emisyjności spalin oraz wysokim poziomie

hałasu i emisją termiczną. Układy regulacji napięcia są także nieco archaiczne – regulator oparty o zwieranie i rozwieranie układu rezystorów włączonych w szereg z obwodem wzbudzenia powodujące znaczne zmodulowania amplitudy napięcia wyjściowego. Sam silnik Diesla (rys. 9) ma dość sztywną charakterystykę średniej prędkości obrotowej w funkcji zmian obciążenia, co przekłada się na stabilną charakterystykę wartości średniej częstotliwości napięcia wyjściowego $f_{sr} = 50 \pm 2$ Hz – rys. 9. Jednakże zależność częstotliwości chwilowej w funkcji czasu wychodzi znacznie poza te granice, co wynika z nieliniowości posuwisto-zwrotnego ruchu korbowodu podczas poszczególnych suwów tłoków (sprężanie – zapłon – suw pracy – suw wydechu – suw ssania). Sprężona mechanicznie z wałem prądnicy synchroniczna prądu przemiennego odtwarza te zmiany prędkości obrotowej w postaci zmian częstotliwości przebiegu napięcia wyjściowego. Tak więc częstotliwość chwilowa napięcia wyjściowego agregatu prądotwórczego zależy wprost proporcjonalnie od nierównomierności pracy korbowodów z uwzględnieniem luzów [12] – rys. 9÷10. Przekłada się to na szybkozmienną z wałem częstotliwości chwilowej oraz na zniekształcenia kształtu krzywej sinusoidy – pojawiają się nieparzyste składowe w rozkładzie Fouriera – ich całkowita zawartość („zniekształcenia nieliniowe napięcia”) niekiedy przekracza nakazany przez normy [8-11, 13] poziom 7%. Mogą one powodować zakłócenia w przenoszeniu informacji, jeżeli wyższe harmoniczne tych prązków pokrywają się z częstotliwością fali nośnej lub częstotliwością heterodyny układu nadawczego lub odbiorczego. Ponadto zwiększona zawartość harmonicznych powoduje nadmierne nagrzewanie się rdzeni transformatorów, dławików, silników elektrycznych i innych podzespołów elektrycznych, co skraca żywotność izolacji uzwojeń i może doprowadzić do zwarcia. Niekiedy pomaga montaż dodatkowych filtrów dolnoprzepustowych, lecz należy pamiętać, że wówczas część energii elektrycznej jest częściowo „zwierana na źródle” i nie dochodzi do odbiornika energii elektrycznej. Zwiększona zawartość harmonicznych to trudniejsze warunki pracy dla każdego regulatora napięcia, gdyż regulatory te mają swoje ściśle określone pasmo przenoszenia. Zwykle w praktyce pomiarowej (nieparzyste harmoniczne) oraz zgodnie z literaturą [13-14] zwiększona zawartość harmonicznych to także zwiększona wartość współczynnika amplitudy, wyznaczanego jako iloraz wartości amplitudy do wartości średniej przebiegu napięcia przemiennego – rys. 10 – zwany z ang. Crest Faktorem.



Rys. 9. Uproszczony rysunek poglądowy silnika z zapłonem samoistnym: 1 – końcówka wtryskiwacza, 2 – medium robocze (sprężone powietrze), 3 – Sworzeń tłokowy, 4 – tłok, 5 – korbowód, 6 – przeciwcieżar, 7 – panewka łożyska ślizgowego wału głównego, 8 – wał główny, 9 – sworzeń stopy korbowodu, z1, z2 – koła zębate przekładni, G – prądnica-przetwornik [własne]



Rys. 10. Przebieg zmian częstotliwości chwilowej prądnicy napędzanej przez głównego silnik Diesla na promie „Pomerania” – pomiar jednofazowy z wykorzystaniem metody FAM-C. Widoczne są zmodulowania częstotliwości od $F_{min} = 105$ Hz do $F_{max} = 290$ Hz co przy $f_{sr} = 190$ Hz daje $\pm 46\%$ głębokości modulacji częstotliwości

Wojskowe układy naziemnego zasilania statków powietrznych i ich wymagania w aspekcie parametrów jakości energii elektrycznej

Wśród lotniskowych źródeł zasilania elektrycznego (oznaczanych w literaturze fachowej skrótowo LZE) można zaobserwować znacznie większe niż dla wojskowych statków powietrznych zróżnicowanie typów oraz źródeł energii ze względu na sposób pozyskiwania energii elektrycznej dostosowanej do potrzeb pokładowej instalacji elektroenergetycznej wojskowego statku powietrznego [15]:

1. agregaty LZE samojezdne z własnym napędem:
 - a. mobilny lotniczy agregat prądotwórczy na podwoziu samochodowym produkcji rosyjskiej typ APA-5 – rys. 10: napięcie wyjściowe 28,5 V_{DC}; 3x36 V_{AC}, 400 Hz; 3x115/200 V_{AC}, 400 Hz,
 - b. mobilny lotniczy agregat prądotwórczy na podwoziu samochodowym produkcji polskiej LUZES-V/D – podwozie samojezdne, olej napędowy, wartości napięć j.w.,
2. agregaty LZE elektromechaniczne (przetwarzające energię elektryczną sieci przemysłowych na energię mechaniczną a następnie na elektryczną) do zasilania napięciem przemiennym 115 V, 400 Hz – wszystkie skonstruowane i wyprodukowane w Polsce:
 - a. urządzenia LUZES-II oraz LUZES-IIIM – napędzane silnikami asynchronicznym (230/380 V_{AC}, 50 Hz),
 - b. urządzenia LUZES-III – napędzane sil prądu stałego o zmiennym napięciu 0-400 V_{DC},
 - c. urządzenia LUZES-VII, 3x115/200 V_{AC}, 400 Hz,
 - d. zasilacz prostownikowy ZR-1000,
3. agregaty LZE prostownikowe pobierające energię z krajowej sieci elektroenergetycznej 3x230/400 V, 50 Hz.:
 - a. polskie urządzenia LZE-6 (28,5 V_{DC}) oraz LZE-6M – bloki tyrystorowo-prostownicze – wymagają zasilania energią elektryczną ze stacjonarnej sieci przemysłowej (230/380V, 50 Hz) – rys. 11,
 - b. polskie urządzenia LUZES-III – wymagają zasilania energią elektryczną ze stacjonarnej sieci przemysłowej (230/380V, 50 Hz),
 - c. polskie urządzenia LUZES-IIIM – wymagają zasilania energią elektryczną ze stacjonarnej sieci przemysłowej (230/380V, 50 Hz),
 - d. duńskie urządzenia AXA2200-28V (napięcie wyjściowe 28,5 V_{DC}; napięcie wyjściowe 28,5 V_{DC}; 3x36 V_{AC}, 400 Hz) – wymagają zasilania energią elektryczną ze stacjonarnej sieci przemysłowej (230/380V, 50 Hz),

Przedstawione powyżej urządzenia prostownikowe, falowniki, przetwornice elektromaszynowe wykorzystują energię:

- a) mechaniczną pozyskaną z procesu spalania paliw płynnych,
- b) elektryczną pozyskaną z sieci przemysłowej.

Pierwsze z nich są przydatne w warunkach wojennych i podczas przebazowań, ale jednocześnie są drogie w eksploatacji i emitują znaczny poziom hałasu, mają intensywną poświatę w paśmie podczerwieni. Drugie z nich pozyskując energię z sieci przemysłowej emitują znacznie niższy poziom hałasu (zwłaszcza układy prostownikowe i falownikowe). Jednakże w czasie przebazowań doprowadzenie takiego zasilania jest wielce problematyczne. Zasilanie ich z agregatów prądotwórczych zazwyczaj zmniejsza ich wydajność energetyczną i obniża parametry jakości energii elektrycznej dostarczanej do wojskowego statku powietrznego.



Rys. 10. Agregat kołowy APA-5. Źródło: <http://forum.krzesiny.org.pl>

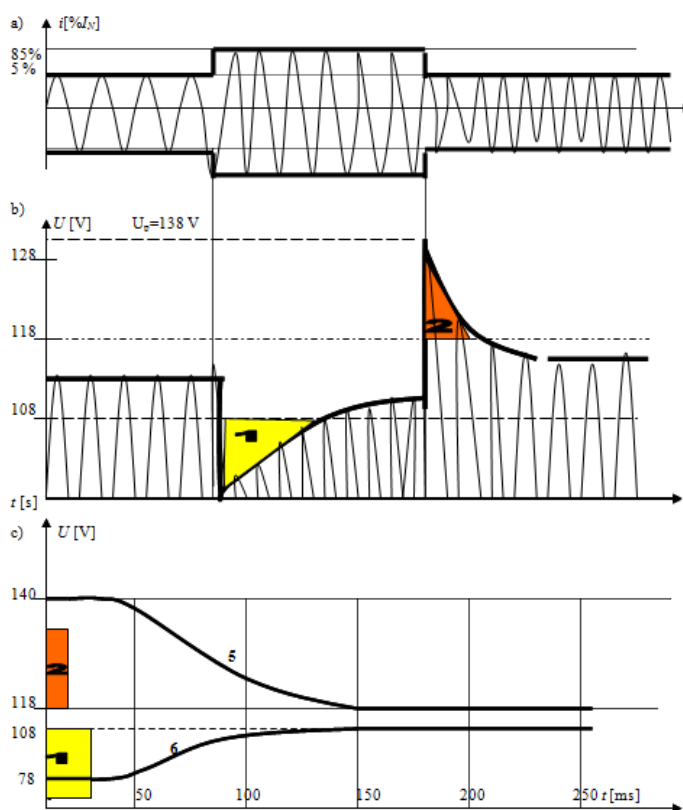


Rys. 11. Agregat LZE-6 – zasilacz tyrystorowy skonstruowany przez ITWL i produkowany przez WCBKT

Znacznym wyzwaniem dla lotniskowych zasilaczy elektroenergetycznych są stany przejściowe występujące podczas rozruchów statku powietrznego lub w czasie włączania urządzeń łączności lub innych odbiorników energii elektrycznej [16, 17-18]. W stanie przejściowym przy skokowych zmianach obciążenia prądnicy pokładowej z poziomu 5% \rightarrow 85%, 85% \rightarrow 5%, 10% \rightarrow 170% oraz 170% \rightarrow 10% mocy znamionowej prądnicy pokładowej. W czasie badań kwalifikacyjnych samolotów i śmigłowców do wymuszenia powyższych zmian obciążenia prądowego są stosowane specjalne impedancje sterowane stycznikami. W czasie badań związanych z innymi badaniami np. związanymi z przedłużeniem zasobów są do tego celu stosowane często obciążenia pokładowe statków powietrznych – najczęściej urządzenia radiowe dużych

mocy lub instalacja ogrzewania. Przy zwiększeniu natężenia prądu (teoretyczny przebieg podano na rys. 12a) następuje obniżenie napięcia (rys. 12.b, szczegół „1”) tj. tzw. impuls zanikowy. Przy gwałtownym zmniejszeniu („zrzucie”) obciążenia następuje zwiększenie napięcia (rys. 12.b, szczegół „2”) tj. impuls przepięciowy. Parametry wyznaczone w stanie przejściowym – wartość pola powierzchni obwiedni przebiegu napięcia. Wartość obliczonego w ten sposób pola powierzchni jest zamieniana na impuls prostokątny - tzw. impuls zastępczy. Wartość impulsu zastępczego przyrównuje się krzywej normatywnej – rys. 12.c. Jeżeli chociaż jeden z impulsów zastępczych przecnie krzywą normatywną, to wynik badania jest negatywny. Najczęściej przyczynia się do tego niesprawny układ regulacji napięcia.

Panele fotowoltaiczne mają znaczną wartość rezystancji wewnętrznej przez co przy skokowym zwiększeniu natężenia prądu obciążenia na ich zaciskach występują znaczne zmniejszenia wartości napięcia. Dlatego też systemy fotowoltaiczne nie potrafią w czasie rozruchów w sposób bezpośredni (tzn. pobierając moc tylko z paneli fotowoltaicznych) zapewnić wystarczającej energii [17] do zapewnienia rozruchu statku powietrznego, w szczególności do zapewnienia szczytowego poziomu energii w stanach przejściowych – do tego celu potrzebne są magazyny energii elektrycznej o znacznej pojemności (baterie akumulatorowe) oraz superkondensatory.



Rys. 12. Przebieg zmian zapotrzebowania prądowego w postaci skoku jednostkowego i przebieg zmian napięcia na zaciskach wyjściowych źródła prądu przemiennego:

a) impuls prądowy, b) przebieg napięcia wyjściowego, c) przyrównanie impulsów zastępczych (1) zanikowych i (2) przepięciowych do krzywych normatywnych (5,6)

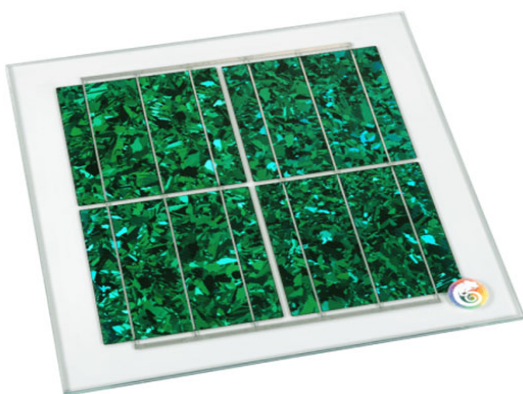
Podstawowe informacje o dostępnych panelach fotowoltaicznych pod kątem przydatności do celów wojskowych

W mobilnym zasilaniu lotniskowym liczy się masa całej konstrukcji i osiągi, jednak te dwa parametry trzeba

podgodzić też z ceną modułów fotowoltaicznych. Najlepiej aby moduł fotowoltaiczny był elastyczny i lekki o barwie zielonej. Elastyczny dlatego, że byłby bardziej wytrzymały na ewentualne uszkodzenia mechaniczne, a lekki dlatego aby był łatwiejszy w transporcie. Barwa zielona modułu fotowoltaicznego pomogłaby w sezonie letnim ukryć pracującą instalację.

Zielone panele aktualnie nie są dostępne na rynku, a jeśli już są dostępne do kupienia to trzeba zamówić od razu całą paletę (31 sztuk) za cenę 15159 €. Daje to cenę za sztukę 489 € - w porównaniu do konkurencji czyli paneli monokrystalicznych (czarne) normalnych czy monokrystalicznych giętkich mają znacznie niższe parametry użytkowe. Moc pojedynczego modułu to zaledwie 270 W. Zielone panele są trudnodostępne na rynku i trzeba je specjalnie sprowadzać prawdopodobnie z Chin, a więc w strefie poza sojusznikami NATO.

Interesującą ofertę na dostawę paneli ogniw fotowoltaicznych przedstawiała do niedawna firma Royal Glam w kolorze ochronnym zieleni (rys. 13) z Korei Południowej. Miały one konstrukcję sztywną ale ich powierzchnie miały walory maskujące. Cena pojedynczej paneli o wymiarach 1 x 1 m wynosiła 85 Euro. Niestety oferty te zniknęły w ostatnim czasie.

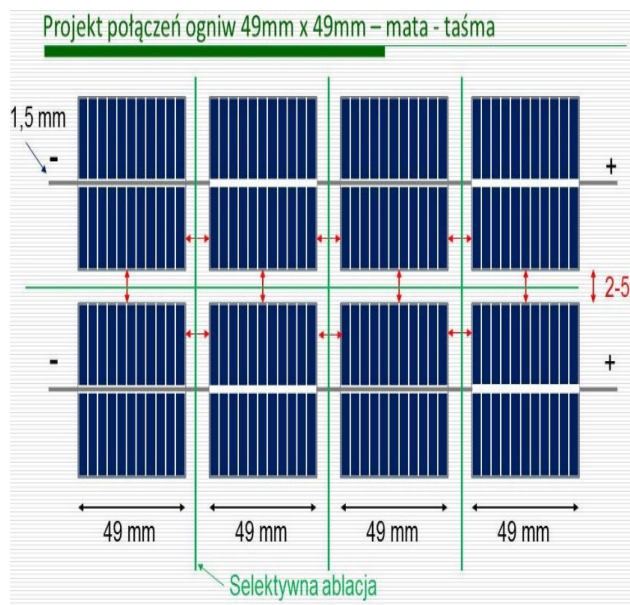


Rys. 13. Wygląd zielonych sztywnych modułów fotowoltaicznych

Te kuszące naturalnymi elementami maskowania panele fotowoltaiczne, oparte na przestarzałej już technologii, są mało wydajne i trudnodostępne.

Ogniwa i panele PV najczęściej produkowane są na sztywnym podłożu, istnieją również technologie, które umożliwiają wyprodukowanie ogniw PV na podłożu elastycznym. Prowadzone badania nad technologią elastycznych ogniw PV idą w kierunku ogniw cienkowarstwowych o zwiększonej sprawności, coraz większej elastyczności struktury. Elastyczne pokrycie fotowoltaiczne przeznaczone jest do budowy awaryjnego źródła zasilania, bądź wytworzenia generatora prądu elektrycznego w miejscu nie posiadającym żadnej infrastruktury energetycznej. Podstawowym odbiorcą elastycznych pokryć fotowoltaicznych (EPV) mogą być Siły Zbrojne RP, a także instytucje, takie jak: Policja, Straż Graniczna, Służby Ratownicze [2]. W rozwiązaniu modelowym ogniwa słoneczne zostały połączone w sposób szeregowo-równoległy – rys. 14. Montaż poszczególnych ogniw i modułów słonecznych odbywa się za pomocą taśmy z miedzi ocynowanej z wykorzystaniem techniki lutowania miękkiego. Funkcję elastycznego podłoża pełnią tkaniny poliamidowe gumowane. Panele elastyczne wykazują najwięcej korzystnych zalet dla układu polowego przy założeniu częstego przemieszczania się. Umożliwiają stosunkowo łatwy transport dowolnymi, nawet niewielkimi środkami transportu np. śmigłowcami łącznikowymi typu Mi-2 lub SW-4 lub niewielkimi pojazdami terenowymi np. klasy Jeep. Ponadto panele EPV zwiększają potencjalnie

skuteczność maskowania, gdyż po ich ułożeniu w terenie częściowo zanikają linie proste stanowiące jedną z oznak sztucznego tworu zbudowanego przez człowieka w czasie analizy obrazu terenu z powietrznego statku rozpoznawczego.



Rys. 14. Przykładowe rozmiary sztywnych modułów fotowoltaicznych



Rys. 15. Panele elastyczne – prezentacja możliwości gięcia



Rys. 16. Panele fotowoltaiczne elastyczne podczas badań na zaśnieżonej płycie lądowiska na terenie ITWL

Jednocześnie „kostki” ogniw fotowoltaicznych mają pofałdowaną i lekko matową powierzchnię, przez co zmniejsza się prawdopodobieństwo powstawiania intensywnych odbić od ich powierzchni czyli tzw. refleksów słonecznych – zmniejsza się prawdopodobieństwo ich optycznego zdemaskowania. Ciężar takiej elastycznej paneli fotowoltaicznej wynosi zaledwie 7 kg – rys. 15 – przy znacznej powierzchni około 2 x 1 m dając znaczącą moc 430 W, oczywiście w dzień przy bezchmurnym niebie. Biały elastyczny podkład w okresie zimowym stwarza korzystne warunki maskujące – rys. 16.

Budowa i zasada działania najbardziej znanych typów ogniw paliwowych

Fotowoltaika, nawet najlepszej klasy, ma jedną istotną wadę – nie generuje energii elektrycznej przy zaniku promieniowania słonecznego. W celu uzupełnienia nocnych ubytków energetycznych, należy rozważyć zastosowanie źródła paliwowego wodorowego. Coraz powszechniej w prasie technicznej pojawiają się informacje o ogniwach wodorowych tj. ogniwach paliwowych typu PEM. Łączenie tlenu z atmosfery z wodorem ze zbiornika przechodzących przez dwie oddzielne porowate elektrody odbywa się w swego rodzaju elektrolicie zazwyczaj o konsystencji żelu w obecności katalizatora tu: płytek platynowych. Łączenie odbywa się w sposób bez ogniowy i towarzyszy temu procesowi emisja pary wodnej i strumienia elektronów pobieranych przez (porowate) elektrody. Istnieją liczne dotyczące wodorowych ogniw paliwowych i pojazdów lądowych o napędzie elektrycznym zasilane tymi ogniwami. Ogniwa wodorowe PEM mają jednak wady w odniesieniu do zastosowań wojskowych a w szczególności do proponowanego przez ITWL układ zasilania elektrycznego statków powietrznych i polowych węzłów łączności:

a) wodór musi być podawany do ogniwa pod dużym ciśnieniem około 300 atm – w chwili uderzenia odłamka (w czasie działań wojennych) może zamienić się w materiał wybuchowy niszczący konstrukcję układ oraz jego obsługę;

b) wodór musi mieć b. wysoką czystość co w warunkach „W” jest trudne;

c) ewentualne sprzężenie wodoru przed doprowadzeniem do ogniwa paliwowego (PEW) przez sprężarkę łączy się z wysokim poziomem hałasu sprężarki.

Dlatego też specjaliści ITWL zwrócili się (podobnie jak i wiele innych firm) w kierunku ogniw metanolowych, gdzie dostarczony jest metanol łatwo dostępny w przemyśle chemicznym (np. Zakłady Kędzierzyn-Koźle). Metanol jest dostarczany w postaci płynu (rodzaj alkoholu), który odparowując wewnątrz ogniwa paliwowego metanolowego (DMFP) przechodzi w postać gazową i dalej odbywa się reakcja przekazywania energii chemicznej podczas łączenia bezogniowego wodoru zawartego w paliwie z tlenem zawartym w powietrzu, analogicznie jak w ogniwach wodorowych tj. w ogniwach paliwowych typu PEM. Jednakże w ogniwach paliwowych typu DMFP dodatkowo wydziela się dwutlenek węgla i metan. Z tego powodu rozwój tego typu ogniw był blokowany przez partie proekologiczne jako „nieczyste”, co mocno zahamowało ich rozwój. Jedynie potężna firma Krupp pozwoliła sobie na wyprodukowanie łodzi podwodnych zasilanych z DMFP – są to jednak potężne konstrukcje nieprzydatne w polowych mobilnych stacjach zasilania elektrycznego. Rozwój tych ogniw mniejszych mocy rozpoczął się stosunkowo niedawno, gdyż stwierdzono że w zjawiskach przyrodniczych także wydzielany jest dwutlenek węgla i metan. Walory wojskowe tych źródeł powodują, że wiele rozwiązań konstrukcyjnych małych i średnich mocy utajniono.

Systemy zarządzania energią, magazyny energii elektrycznej

Rozwój rozproszonych, najczęściej odnawialnych źródeł energii i systemów magazynowania energii zmienia tradycyjny przepływ energii w systemach [19]. W wielu przypadkach magazyn energii jest kluczowym elementem umożliwiający powstanie klastra energii, mikro-sieci czy lokalnego obszaru bilansowania. Te terminy są często stosowane zamiennie dla wydzielonych logicznie sekcji systemu, zapewniających maksymalną samowystarczalność energetyczną. Ich efektywna praca jest uzależniona nie tylko od samego istnienia źródeł i magazynów, lecz także od zastosowania odpowiednich metod ich sterowania. We wszelkich mikrosystemach energetycznych kluczową warstwą są systemy zarządzania energią EMS (ang. Energy Management System). System EMS obejmuje swoim zakresem przede wszystkim monitoring i możliwość sterowania zasobami energetycznymi. Poza oczywistą funkcją zarządzania ładowaniem i rozładowaniem magazynu energii mogą zapewniać także możliwość regulacji steralnych obciążeń, ograniczania mocy źródeł OZE w przypadku jej nadwyżki, utrzymania optymalnych warunków pracy źródeł spalinywych czy przy zastosowaniu tych technik zapewnienie pracy wyspowej (autonomicznej, bez podłączenia do systemu elektroenergetycznego).

Magazyny energii w układach fotowoltaicznych to są baterie ogniwa akumulatorowych, zdolne do gromadzenia energii elektrycznej w chwili szczytowej ekspozycji świetlnej Słońca i zdolne do zasilania odbiorników w okresie niedoboru światła słonecznego. Ze względu na rodzaj elektrolitu dzieli się one na:

1. kwasowe.
2. zasadowe:
 - a) kadmowo-niklowe;
 - b) srebro-cynkowe.
 3. litowo-jonowe.

Mają one różnicowane cechy:

a) baterie kwasowe są stabilne napięciowo, ale wymagają długiego ładowania i nie tolerują pobierania dużych prądów, jednocześnie nie słabną przy długim postoju. Jednakże przechowywanie kwasowych baterii akumulatorowych powyżej dwóch miesięcy bez doładowywania może spowodować nieodwracalne w skutkach tzw. zasiarczenie baterii. Oznaką takiego zasiarczenia jest szybkie ładowanie i szybkie rozładowywanie pod obciążeniem;

b) baterie zasadowe są lżejsze i nadają się do szybkiego ładowania i wyładowania dużymi prądami, ale szybko „słabną” przy długim postoju z powodu samowyładowania, jakkolwiek ten długi postój prawie nie szkodzi ich resursowi;

c) baterie litowo-jonowe są najlżejsze i mają najwyższą sprawność energetyczną (80–94%), niskie samowyładowanie, dużą tolerancję na głębokie wyładowania, ale wymagają zaawansowanej elektroniki do zapewnienia bezpiecznej eksploatacji. Drogi recykling – jednym z pierwiastków jest kobalt, powodujący skażenie środowiska.

Od pewnego czasu rośnie także zainteresowanie użytkowaniem dużych pakietów akumulatorów litowo-jonowych (zazwyczaj od 20 do nawet 100 kWh) w pojazdach elektrycznych [20]. Odznaczają się wysoką trwałością, sięgającą nawet 10 lat (firma japońska SAKO utrzymuje ze ich baterie litowo-jonowe wytrzymują nawet 25 lat). Ponadto pakiety wyposażone są w specjalne układy chłodzenia i ogrzewania, zapewniające optymalną temperaturę pracy. Należą do najlżejszych w przeliczeniu oddawanej mocy na jednostkę masy (są dwukrotnie lżejsze niż tej samej mocy baterie kadmowo-niklowe) [21-22]. Ogniwa litowo-jonowe, używane w pojazdach, mogą być także szybko ładowane,

zazwyczaj od 0 do 80% w 15–30 min bez znaczącego wpływu na ich żywotność. Akumulatory litowo-jonowe, w przeciwieństwie do akumulatorów niklowo-kadmowych, powinny być ładowane często i jak najszybciej po rozładowaniu. Jeśli jednak nie będą używane przez dłuższy czas, powinny zostać rozładowane do ok. 40%. W takim stanie akumulator ma znacznie wyższą żywotność. Jeżeli taki akumulator będzie przechowywany w stanie całkowitego rozładowania, może ulec uszkodzeniu. Akumulatorów tego typu nie trzeba formować [22], w przeciwieństwie do akumulatorów starszego typu.



Rys. 17. Akumulator litowo-jonowy firmy Varta [22]

Akumulatory litowo-jonowe najlepiej znoszą temperaturę od +10°C do +25°C. Ładowanie baterii w temperaturach ekstremalnych, tj. poniżej +5°C lub powyżej +30°C, grozi uszkodzeniem ogniw, a nawet pożarem. Akumulatory te muszą być wyposażone w zaawansowaną elektronikę zapewniającą m.in. chłodzenie/ogrzewanie ogniw – jej awaria może spowodować pożar lub nawet rozerwanie obudowy baterii. Z uwagi na wysoki iloraz pojemności do masy baterie te najlepiej nadają się do połowych mobilnych wojskowych systemów fotowoltaicznych.



Rys. 18. Magazyn energii Li-Eco SAKO 51,2 V 200 Ah LIFEPO4 10 kWh firmy SAKO

Wszelkie skokowe zwiększenia natężenia prądu, występujące głównie w czasie rozruchu statku powietrznego (turbostarter $I_{max} \geq 600+800$ A; przy rozruchu bezpośrednim np. śmigłowca Mi-8 $I_{max} \geq 1200+1500$ A), powodują znaczne spadki napięć na zaciskach wyjściowych źródła energii elektrycznej. Powstające krótkotrwały (do 80 ms) niedobór energii elektrycznej najlepiej uzupełniają superkondensatory [20]. Superkondensator to rodzaj kondensatora elektrolitycznego o bardzo dużej pojemności elektrycznej. Jego dużą zaletą jest krótki czas ładowania w porównaniu z innymi urządzeniami do przechowywania energii. Zasada działania superkondensatora, opartego na podwójnej warstwie elektrolitu, jest znana od ponad stu lat. Pomimo że superkondensator jest urządzeniem

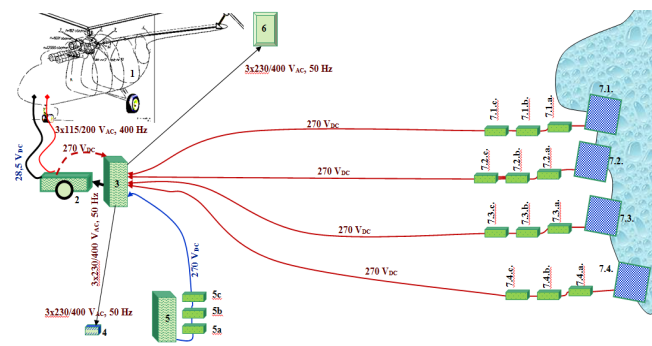
elektrochemicznym, w jego mechanizmie magazynowania energii elektrycznej nie biorą udziału żadne reakcje chemiczne. Mechanizm ten jest w wysokim stopniu odwracalny i pozwala ładować i rozładowywać superkondensator setki tysięcy razy. Najnowsze superkondensatory nominalnie wytrzymują milion cykli ładowania [19-20]. Superkondensator składa się z dwóch niereaktywnych porowatych elektrod z elektrolitem, pomiędzy które jest przyłożone napięcie. Do dodatniej płyty przyciąga ono jony ujemne, a do ujemnej jony dodatnie. Powstają w ten sposób dwie warstwy oddzielonych od siebie ładunków, jedna w płycie dodatniej, a druga w ujemnej. Pojemność jest proporcjonalna do powierzchni elektrod, a odwrotnie proporcjonalna do odległości pomiędzy nimi. Porowate płyty superkondensatora są wykonane z węgla, a ich powierzchnia czynna jest silnie rozwinięta i dochodzi do 3000 m²/g, znacznie przewyższając powierzchnię kondensatora konwencjonalnego. Odległość oddzielającą ładunki wyznacza rozmiar znajdujących się w elektrolicie jonów, przyciągniętych przez elektrodę. Nie przekracza ona kilku nanometrów i jest znacznie mniejsza od osiągalnej przy użyciu konwencjonalnych materiałów dielektrycznych (rys. 19). Z łączenia ogromnej powierzchni z niezwykle małą odległością otrzymuje się olbrzymią pojemność nawet tysięcy faradów w objętości szklanki. Superkondensatory mają niewielkie rozmiary, mogą magazynować znacznie więcej energii niż kondensatory konwencjonalne i uwalniać ją ze znacznie większą mocą niż baterie akumulatorowe [19-20].



Rys. 19. Superkondensator firmy Maxwell [20]

Naziemny system zasilania statków powietrznych i systemów łączności konstrukcji ITWL

W ITWL skonstruowano system oparty na elastycznych, lekkich (7 kg) panelach fotowoltaicznych, przeznaczony do rozruchu silników głównych statku powietrznego i zasilania systemów łączności – rys. 20.



Rys. 20. Schemat poglądowy zintegrowanego systemu zasilania elektrycznego statków powietrznych i wojskowych systemów łączności – wariant scentralizowany – panele fotowoltaiczne połączone szeregowo z jedną linią przesyłową
1 – śmigłowiec zasilany napięciem 28,5 V_{DC}; 2 – układ bezpośredniego zasilania statku powietrznego – wózek akumulatorowy uniwersalny (np. ST-3 tzw. „teleżka”: wymiary skrzyni max: 0,4 x 1,2 x 0,8 m; prześwit 0,3 m); 3 – centralny układ przetwarzania i rozdziału energii do użytkowników; 4 – jedno-

akumulatorowa polowa stacja ładowania akumulatorów (1+3 sztuk) np. SOLICH1277;

5 – system metanolowy (ogniwa paliwowe DMFP z urządzeniami pomocniczymi): $P = 3$ kW, zużycie metanolu 1 l/h; zapas paliwa co najmniej na 24 h tj. zbiornik nie mniejszy niż 24 litry; 5.a. magazyn energii elektrycznej o parametrach: $Q = 280$ Ah, napięcie wyjściowe 40-50 V; 5.b – falownik 3x115/200 V, 400 Hz z regulatorem napięcia, 5.c – blok transformatorowo-prostowniczy o (stabilizowanym) napięciu wyjściowym $U_{DC} = 270$ V; 6 – węzeł łączności $S = 3+6$ kVA; 7.1. panel fotowoltaiczna nr 1 o parametrach: $U_{wy} = 40+50$ V_{DC}, $P = 0,43$ kW; 7.2. panel fotowoltaiczna nr 2 o parametrach: $U_{wy} = 40+50$ V_{DC}, $P = 0,43$ kW;

7.3. panel fotowoltaiczna nr 3 o parametrach: $U_{wy} = 40+50$ V_{DC}, $P = 0,43$ kW; 7.4. panel fotowoltaiczna nr 1 o parametrach: $U_{wy} = 40+50$ V_{DC}, $P = 0,43$ kW;

7.4.a – magazyn energii elektrycznej o parametrach: $Q = 280$ Ah, napięcie wyjściowe 40-50 V do paneli fotowoltaicznej nr 1; 7.4.b – falownik 3x115/200 V, 400 Hz z regulatorem napięcia do paneli fotowoltaicznej nr 1, 7.4.c – blok transformatorowo-prostowniczy o (stabilizowanym) napięciu wyjściowym $U_{DC} = 270$ V do paneli fotowoltaicznej nr 4; 7.5. panel fotowoltaiczna nr 1 o parametrach: $U_{wy} = 40+50$ V_{DC}, $P = 0,43$ kW; 7.6. panel fotowoltaiczna nr 1 o parametrach: $U_{wy} = 40+50$ V_{DC}, $P = 0,43$ kW.

Oczywiście panele fotowoltaiczne niezależnie od typu wykorzystują energię słoneczną i w nocy są nieprzydatne. Rezerwując ją baterie elektryczne mają ograniczoną moc. Znaczne zwiększenie ich pojemności spowodowałoby znaczne zwiększenie ich ciężaru, co utrudniłoby podatność transportową i zmniejszyłoby ich mobilność. Dlatego w opracowanej konstrukcji zaproponowano uzupełnienie nocnych niedoborów energetycznych przez zastosowanie ogni metanolowych o średniej mocy rzędu 1-10 kW. Zbudowany w ITWL system składa się z:

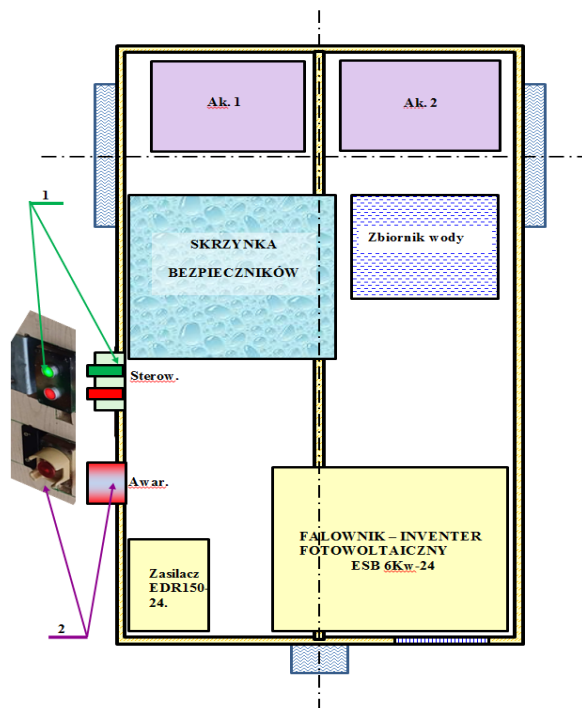
1. Zestawu paneli fotowoltaicznych odpowiednio maskowanych przed promieniowaniem termicznym systemem spryskiwaczy (w celu zmniejszenia temperatury powierzchni paneli w okresie letnim i ich odśnieżania i odladzania w okresie zimowym).
2. Systemu ogni paliwowych z łatwo dostępnym w warunkach wojennych (stan „W”) paliwem bezpiecznym w eksploatacji.
3. Magazynu energii elektrycznej (prądu stałego).
4. Stacji ładowania i diagnozowania pokładowych baterii akumulatorowych.
5. Układu przesyłowo-rozdzielczy i okablowanie. Zakłada się że w warunkach wojennych (stan „W”) należy wszystkie elementy układu zasilania rozśrodkować – rys. 20.



Rys. 21. Prototyp mobilnego systemu zasilania statków powietrznych i systemów łączności zbudowany w Zakładzie Produkcji Prototypowej ITWL

Układ bezpośredniego zasilania statku powietrzego. Układ ten może być przetaczany przez jednego człowieka po powierzchni utwardzonej, natomiast przez dwóch ludzi po podłożu gruntowym i umożliwia dojazd do każdego

statku powietrzego nie stanowiąc zagrożenia lub kolizji. W oryginalnej konstrukcji ma ramę stalową spawaną, do której jest przykręcone poszycie. Zastąpienie profili stalowych aluminium zaś poszycia brezentem odpornym na czynniki chemiczne (ocieplonym wykładziną odporną na czynniki chemiczne) umożliwią znaczne zmniejszenie ciężaru i ułatwi transport powietrzny. Dodatkowo należy rozważyć zainstalowanie przegubów konstrukcyjnych umożliwiających (po demontażu baterii elektrycznych) łatwość składania konstrukcji w celu przewożenia drogą powietrzną np. przez śmigłowiec łącznikowy typu SW-4 albo Mi-2.



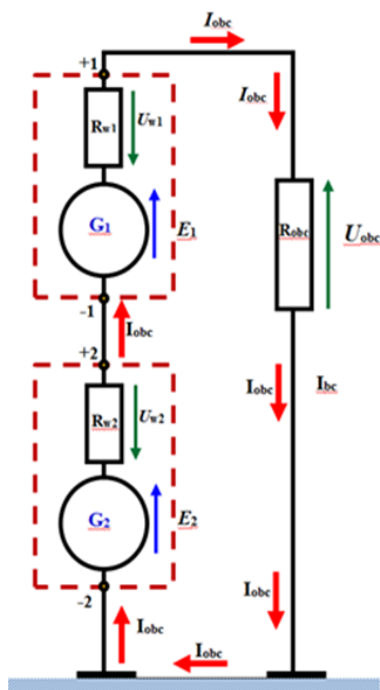
Rys. 22. Schemat blokowy układu bezpośredniego zasilania statku powietrzego konstrukcji ITWL – wózek uniwersalny z zamontowanymi podzespołami m.in. centralnym układem przetwarzania i rozdziału energii do użytkowników, zestaw akumulatorów, zbiornikiem cieczy chłodzącej do paneli fotowoltaicznych 1 – przyciski sterowania systemem schładzania ciecowej powierzchni paneli fotowoltaicznych, 2 – przycisk awaryjnego wyłączenia zasilania („przycisk paniki”)

Niekiedy w technice lotniczej zachodzi potrzeba łączenia kilku źródeł napięcia w połączenie szeregowe – rys. 23 (zwiększenie napięcia) lub równoległe (zwiększenie prądu). W lotniczych zasilaczach elektroenergetycznych (LUE) [15, 22] stosuje się często szeregowe i równoległe łączenie źródeł napięcia:

- a) w starszej technologicznie metodzie rozruchu [18], w czasie rozruchu bezpośredniego silnika głównego statku powietrzego, następuje najpierw szeregowe, a potem równoległe łączenie dwóch źródeł prądu stałego, gdzie po przestawieniu w połączenie szeregowe wzrasta wydatnie prędkość obrotowa wału sprężarki silnika niezbędna do odpowiedniego sprężenia mieszanki w komorze spalania;
- b) we wszystkich stosowanych bateriach lotniczych stosuje się szeregowe łączenie ogniw akumulatorowych, przy czym pojedyncze ogniwa mają zbyt niską wartość napięcia, aby mogły współpracować z pokładową siecią prądu stałego 28,5 V_{DC} – łączy się je w baterie po 15 i więcej ogniw.

Cechą charakterystyczną układu szeregowego jest to, że wypadkowa siła elektromotoryczna jest równa sumie sił elektromotorycznych oraz to, że przez wszystkie jego

elementy płynie ten sam prąd, wobec czego największa wartość natężenia prądu, jaki można uzyskać, nie przekracza wartości prądu znamionowego źródła o najmniejszej mocy znamionowej [22].



Rys. 23. Schemat ideowy szeregowego połączenia źródeł napięciowych

Przed połączeniem szeregowym napięcia należy zwrócić uwagę na ich rezystancje wewnętrzne. Połączenie w szereg źródła napięcia o małej rezystancji wewnętrznej ze źródłem o bardzo dużej rezystancji wewnętrznej może wywołać pod obciążeniem zmniejszenie wypadkowego napięcia na zaciskach takiego tandemu źródeł, które może być niższe niż siła elektromotoryczna pojedynczego źródła. Tendencja ta jest tym większa, im:

- większe jest różnicowanie rezystancji wewnętrznej pomiędzy dwoma źródłami,
- większe jest natężenie prądu pobierane przez odbiornik, czyli im mniejsza jest wartość rezystancji obciążenia (rys. 23, element R_{objc}), czyli innymi słowy im większa jest moc znamionowa $P_{N_{odb}}$ odbiornika.

W przypadku ogniw fotowoltaicznych, według pomiarów i analiz ITWL, trzeba starannie dobierać charakterystyki paneli w zestawie. Charakterystyki rezystancji wewnętrznej poszczególnych paneli w funkcji mocy promieniowania słonecznego są silnie nieliniowe i jednocześnie mogą różnić się znacznie pomiędzy poszczególnymi panelami. Sprawę doboru charakterystyk paneli komplikuje jeszcze znaczny wpływ temperatury (zarówno wynikającej z nagrzewania przez promieniowanie słoneczne, jak i wynikające z przepływu prądu przez strukturę wewnętrzną paneli) różniący się pomiędzy panelami [23]. Jednocześnie wszystkie panele powinny mieć jednakowy kąt położenia względem Słońca – w przeciwnym przypadku różnicowanie rezystancji poszczególnych paneli fotowoltaicznych jeszcze bardziej ulegnie pogłębieniu.

Podsumowanie

Przeprowadzony w niniejszej pracy przegląd ekologicznych, militarnych i cywilnych, systemów zasilania wykazał różnorodność ich konstrukcji. Bez przeszkód przez ostatnie 40 lat rozwijana jest fotowoltaika zazwyczaj jako

systemy domowe uzupełniające krajowe sieci elektroenergetyczne i oddające nadwyżki mocy do krajowej sieci energetycznej. Ale zanotowano także próby jej zastosowania do celów militarnych – w ramach programu NATO Smart Energy w państwach takich jak Grecja, Niemcy, Wielka Brytania, Stany Zjednoczone, Holandia prowadzi się intensywne badania i rozwija się projekty polowych systemów energetycznych OZE [5]. Od kilku lat niemiecka Bundeswera wyposażona jest w mobilne systemy fotowoltaiczne MC 66 wspierane elektrownią wiatrową – rys. 9. Zastosowano tam ciężkie panele fotowoltaiczne o znacznym współczynniku odbicia – stąd nie nadają się one do szybkich przemieszczeń jakie niezbędne są w polskich realiach na wschodniej flance NATO. Wsparcie w postaci elektrowni wiatrowej szybko demaskuje miejsce rozłożenia węzła elektroenergetycznego zasilania zarówno wysokim, charakterystycznym kształtem jak i wydzielaniem infradźwięków. Dla spełnienia wymagań pola walki w zakresie dynamicznych przemieszczeń rozśrodkowywanych śmigłowców, wraz z małymi zespołami obsługi, lub rozwijanych w terenie systemów łączności ważne są takie cechy jak możliwość szybkiego i prostego (nie wymagającego sprzętu ciężkiego) demontażu i przemieszczania lekkimi środkami transportu. Jednocześnie systemy te muszą zapewniać maskowanie termiczne, elektromagnetyczne i wzrokowe. Wymagania te spełniają elastyczne, układające się według ukształtowania terenu elastyczne i lekkie (7 kg), łatwo demontowalne i nie dające refleksów świetlnych panele fotowoltaiczne.

Oczywiście panele fotowoltaiczne niezależnie od typu wykorzystują energię słoneczną i w nocy są nieprzydatne. Rezerwując ją baterie elektryczne mają ograniczoną moc. Znaczne zwiększenie ich pojemności spowodowałoby znaczne zwiększenie ich ciężaru, co utrudniłoby podatność transportową i zmniejszyłoby ich mobilność.

Jeśli już o bateriach akumulatorowych mowa to dla celów wojskowych powinny być preferowane baterie litowo-jonowe i „pokrewne” z uwagi na czterokrotnie mniejszy ciężar na jednostkę odzyskiwanych z nich energii elektrycznej.

W rozwiązaniu technologicznym opracowanym w ITWL, dla uzupełnienia nocnych ubytków energetycznych, zastosowano ogniwa paliwowe metanolowe (DMFC) o średniej mocy rzędu 1-10 kW. Zaletą takiego rozwiązania, w stosunku do powszechnie stosowanych agregatów prądotwórczych napędzanych silnikiem Diesla, jest minimalizacja śladu termicznego, gdyż w ogniwach DMFC następuje „bezogniowe” łączenie atomów wodoru (pozyskiwanych z metanolu) z tlenem zawartym w powietrzu, co daje minimalną poświatę cieplną zbliżoną do temperatury ciała ludzkiego.

Autorzy: dr hab. inż. Andrzej Gębura, prof. ITWL, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, ul. Księcia Bolesława 6, 01-49 Warszawa, E-mail: andrzej.gebura@itwl.pl;
dr hab. inż. Andrzej Szelmanowski, prof. ITWL, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, ul. Księcia Bolesława 6, 01-49 Warszawa, E-mail: andrzej.szelmanowski@itwl.pl;
dr inż. Marek Brzozowski, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, ul. Księcia Bolesława 6, 01-49 Warszawa, E-mail: marek.brzozowski@itwl.pl;

LITERATURA

- Sawicka-Chudy P., Cholewa M., Sibiński M., Pawełek R.: Analiza parametrów fotowoltaicznych stacjonarnych i adających w warunkach rzeczywistych, *Przegląd Elektrotechniczny*, Nr 9/2016, 58-61
- Małeczek S., Szczepaniak M., Malicki W.: Zastosowanie polikrystalicznych ogniw krzemowych jako elastycznych pokryć fotowoltaicznych, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* Nr 2/2018 (118)

3. Korosiak P.: Sprawność konwersji promieniowania słonecznego na energię elektryczną współczesnych ogniw i modułów fotowoltaicznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 93 (2017), nr 7, 122-127
4. Rafał K., Bielecki S., Skoczkowski T.: *Dynamiczna regulacja napięcia w sieci rozdzielczej z wykorzystaniem falowników generacji rozproszonej*, *Przegląd Elektrotechniczny*, 78 (2002), nr 5, 49-53
5. Górski K., Łukomski M.: Odnawialne Źródła Energii w zasilaniu wojskowych urządzeń elektronicznych małej mocy, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, r. 98 Nr 9/2022. doi:10.15199/48.2022.09.22
6. Loveday Eric: Hitachi develops new manganese cathode, could double life of li-ion batteries. 2010-04-23. [dostęp 2010-06-11].
7. Spaliński K., Górski K.: Przegląd materiałów do zabezpieczenia balistycznego fotoogniw, *Przegląd Elektrotechniczny*, Nr 9/2023, 242-245
8. Polska Norma PN-EN- 50160:2022: Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych.
9. Polska Norma PN-EN- 12312-20:2005: Urządzenia i sprzęt do obsługi naziemnej statków powietrznych. Wymagania szczegółowe. Część 20: Sprzęt do naziemnego zasilania energią elektryczną.
10. Polska Norma PN-ISO 8528-3 Zespoły prądotwórcze prądu przemiennego napędzane silnikiem spalinowym tłokowym. Prądnice prądu przemiennego do zespołów prądotwórczych
11. Polska Norma PN-ISO 8528-5 Zespoły prądotwórcze prądu przemiennego napędzane silnikiem spalinowym tłokowym. Zespoły prądotwórcze
12. Gębura A.: Metoda modulacji częstotliwości napięcia prądnic pokładowych w diagnozowaniu zespołów napędowych, Monografia, Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, ISBN 978-83-61021-20-9, 2010 r.
13. PN-EN 50438:2014-02, Wymagania dla instalacji mikrogeneracyjnych przeznaczonych do równoległego przyłączenia do publicznych sieci dystrybucyjnych niskiego napięcia
14. Baraniecki A.: Poprawa jakości energii i niezawodności zasilania, *Elektroenergetyka*, 2011, nr 1(7), 48-56
15. Kalisiak M., Zaczekowski K.: Naziemne elektroenergetyczne układy zasilania samolotów i ich diagnostyka, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej*, Transport, zeszyt 102, Warszawa 2014
16. Norma Obronna NO-15-A200:2016 Wojskowe statki powietrzne. Pokładowe układy zasilania elektrycznego. Podstawowe parametry, wymagania i badania
17. Norma Obronna NO-17-A202: Wojskowe statki powietrzne. Elektryczne układy rozruchu i zapłonu silników turbinowych. Podstawowe wymagania i badania.
18. Norma Obronna NO-17-A206:2019: Wojskowe statki powietrzne - Naziemne układy zasilania elektroenergetycznego. Podstawowe parametry, wymagania i badania.
19. Grabowski P., Rafał K.: Magazynowanie energii, *Magazyn Polskiej Akademii Nauk* 1/65/2021
20. Frań J., Matulewski M.: Magazynowanie energii w pojazdach proekologicznych, *Problemy Nauk Stosowanych*, 2015, Tom 3, s. 117 – 126
21. Urbanek K.: Ogniwa litowo-jonowe wysokiej mocy: przegląd materiałów katodowych. *Wiadomości Chemiczne*. 2018, 72, 5-6
22. Gębura A., Setlak L., Tokarski T., Borowski J.: Lotnicze urządzenia elektryczne, *Monografia*, Wyd. Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, 2023, ISBN 978-83-61021-59-9
23. Matuszczyk P., Popławski T., Flaszka J.: Wpływ natężenia promieniowania słonecznego i temperatury modułu na wybrane parametry i moc znamionową paneli fotowoltaicznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 12/2015, 159-162
24. Michalak, S., Kowalczyk, H., Gębura A., et al. (2024). Przegląd ekologicznych militarnych i cywilnych systemów zasilania. *Journal of KONBIN*, 54(1), 33-46. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.4461>