

Kazimierz DRABCZYK¹
Stanisław MALECZEK²
Wojciech MALICKI³
Cezary ŚLIWIŃSKI³
Agnieszka IWAN⁴

ELASTYCZNE POKRYCIE FOTOWOLTAICZNE

Wstęp

Proces przemiany energii światła słonecznego na energię elektryczną zachodzi w ogniwach fotowoltaicznych. Efektywność przemiany zależy od wielu czynników, między innymi od rodzaju zastosowanego ogniwa słonecznego czy intensywności i czasu nasłonecznienia. Jedną z podstawowych zalet stosowania baterii słonecznych jest całkowite uniezależnienie użytkownika od sieci przesyłowej, co generalnie stwarza możliwość zbudowania awaryjnego źródła zasilania bądź stworzenia generatora prądu elektrycznego w miejscu pozbawionym jakiegokolwiek infrastruktury energetycznej.

W zastosowaniach komercyjnych dominują obecnie krzemowe ogniwa słoneczne na podłożach sztywnych [1]-[3]. Natomiast polimerowe ogniwa słoneczne oraz niektóre ogniwa cienkowarstwowe, które są elastyczne i mają mniejszą masę, charakteryzują się wciąż niższą sprawnością i trwałością w stosunku do standardowych ogniw krzemowych [4], [5].

Zaproponowane elastyczne pokrycie fotowoltaiczne [6]-[9] (EPF) jest formą pośrednią pomiędzy sztywnym krzemowym ogniwem fotowoltaicznym a fotowoltaiką organiczną i cienkowarstwową, w aspektach elastyczności, trwałości oraz sprawności ogniwa. EPF cechuje się dobrą elastycznością (odpornością mechaniczną na wielokrotne zginanie), wysoką sprawnością (16,64 % dla ogniwa EPF_02) oraz wieloletnim okresem użytkowania (około 15-20 lat). Podstawową zaletą takiego rozwiązania jest możliwość zwijania (np. na bębnie) i rozwijania na dowolnej powierzchni, łatwa obsługa oraz lekka konstrukcja.

Innowacyjny charakter zaproponowanego źródła zasilania zdeterminowany został poprzez zastosowanie elastycznego materiału z wbudowanymi ogniwami fotowoltaicznymi o małych wymiarach. Elastyczność EPF wynika zarówno

¹ dr. inż. Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej, PAN, Kraków

² dr. inż. Wojskowy Instytut Techniki Inżynierskiej, Wrocław

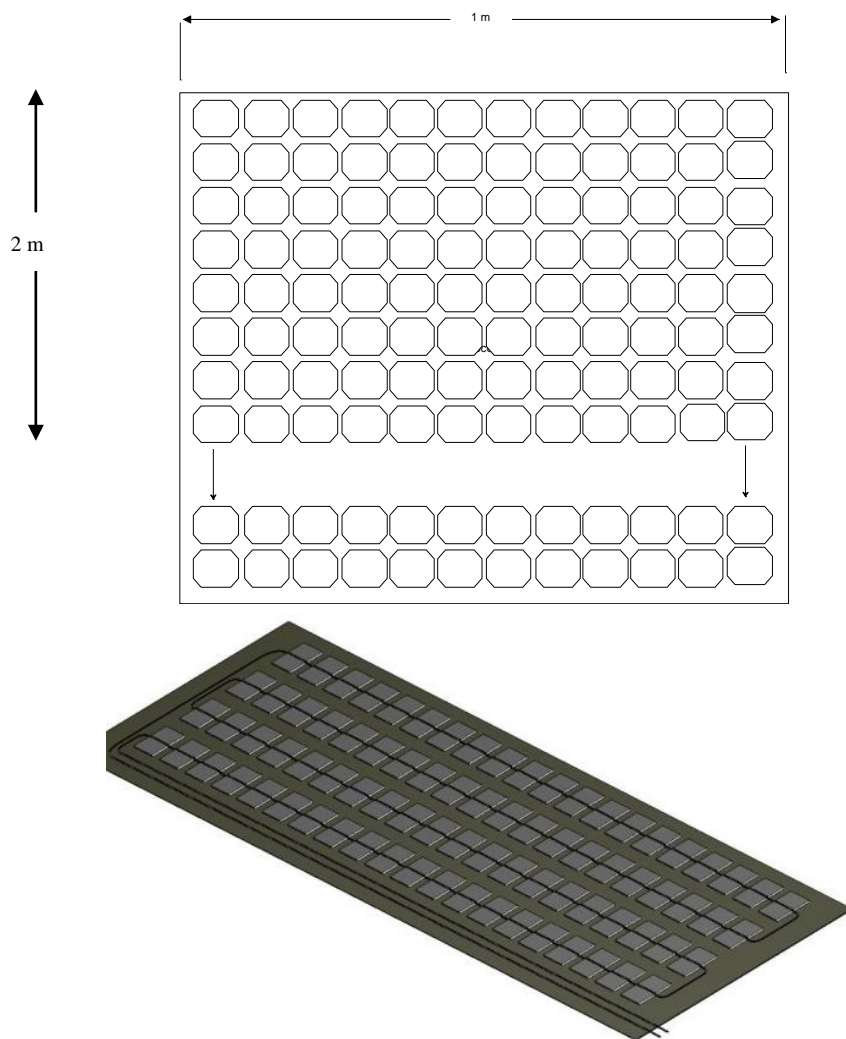
³ inż. Wojskowy Instytut Techniki Inżynierskiej, Wrocław

⁴ dr. hab. prof. WITI Wojskowy Instytut Techniki Inżynierskiej, Wrocław

z właściwości samego materiału podłoża, jak również ze sposobu rozmieszczenia i rodzaju zastosowanych ogniw fotowoltaicznych. Podstawową trudnością w wykonaniu EPF, którą udało się pokonać, było zapewnienie pokryciu odpowiednich właściwości mechanicznych. Problem ten został rozwiązany poprzez zastosowanie odpowiedniej struktury warstwowej pokrycia co jest swoistego rodzaju kamieniem milowym w tym rozwiązaniu. Zaproponowane pokrycie EPF cechuje się nie tylko znaczną elastycznością umożliwiającą jego rolowanie, ale co jest również bardzo istotne z punktu widzenia przyszłych użytkowników, możliwością odcięcia zadanej długości EPF bez utraty własności elektrycznych.

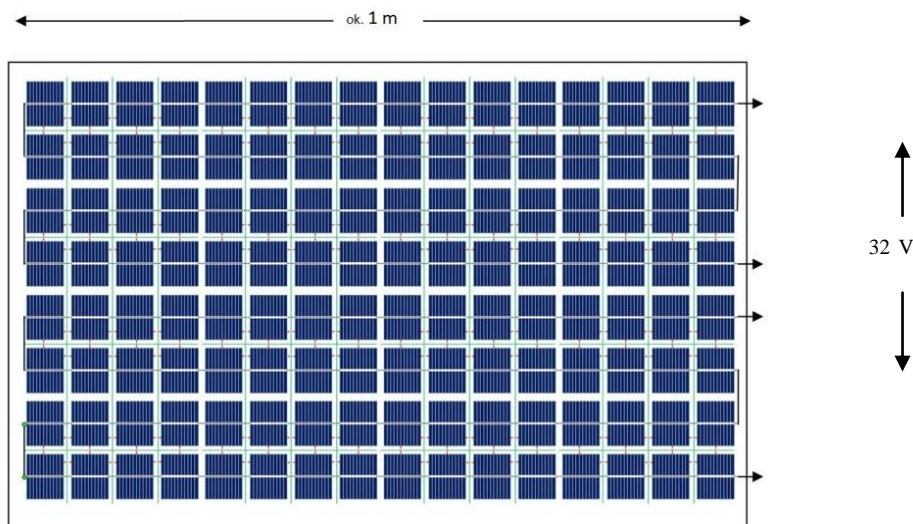
Wstępna koncepcja elastycznego pokrycia fotowoltaicznego

Wstępna [6]-[9] koncepcja konstrukcji EPF zakłada wykonanie modułu z ogniw fotowoltaicznych na podłożu elastycznym. Przewiduje się uzyskanie wyrobu o szerokości około 100 cm i długości około 200 cm, zawierającego do 20 ogniw w szeregu (rys. 1).



Rys. 1. Wstępna koncepcja EPF

W powyższej koncepcji nie przewiduje się rozmieszczenia urządzeń peryferyjnych w obrębie podłoża baterii fotowoltaicznej. Niezbędne urządzenia będą podłączane osobno za pomocą wyprowadzeń dołączonych na powierzchni podłoża baterii fotowoltaicznej. W celu uzyskania wymaganego poziomu energii elektrycznej przewiduje się różne sposoby łączenia poszczególnych ogniw w grupy (tzw. baterie cząstkowe). W założeniu napięcie obwodu otwartego baterii nie powinno przekroczyć 48V DC (Direct Current). Jedną z koncepcji przedstawia połączenie szeregowe czterech zespołów ogniw (po 16 ogniw), tworzących grupę o napięciu obwodu otwartego około 32 V i prądzie zwarciovym około 0,6 A (rys. 2).



Rys. 2. Koncepcja połączenia szeregowego grupy ogniw

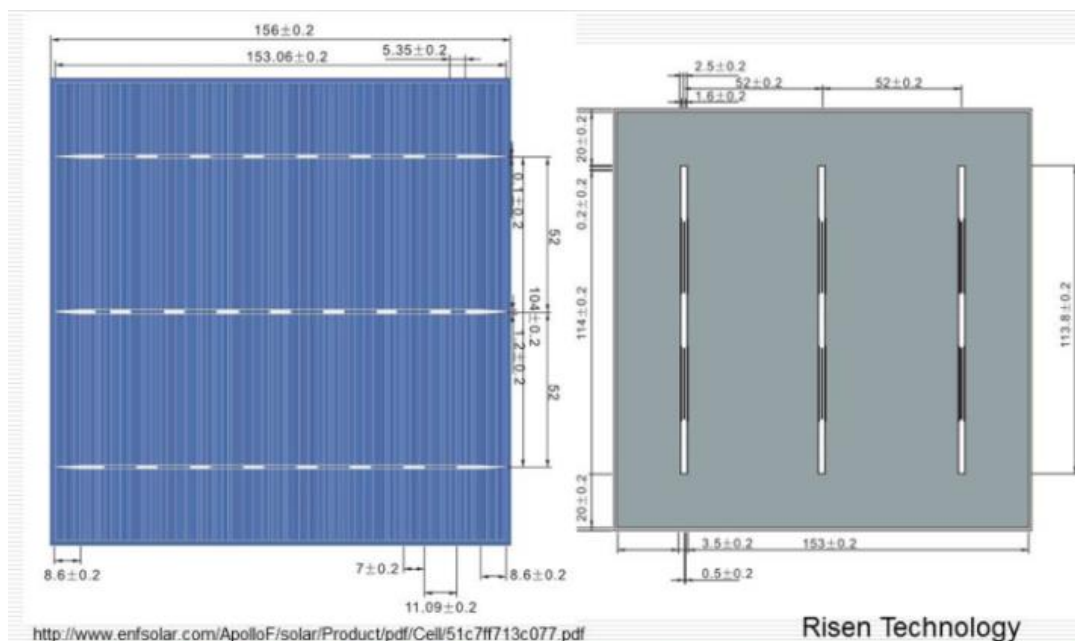
Możliwe jest również wytworzenie grup z połączonych równolegle czterech szeregów po 16 ogniw, co pozwoli zwiększyć prąd jednej grupy do około 2 A przy napięciu obwodu otwartego około 9 V. Poszczególne grupy zostaną połączone szeregowo dając baterię o napięciu około 36 V. Różne warianty połączenia ogniw wymagać będą opracowania sposobu łączenia elektrycznego grup ogniw oraz wyprowadzeń pozwalających łączyć utworzone grupy z urządzeniami peryferyjnymi.

Wykonanie modelu elastycznego pokrycia fotowoltaicznego

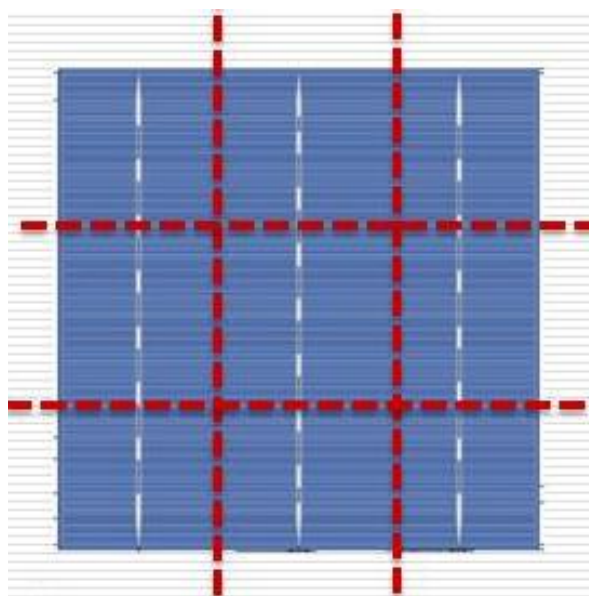
Panele słoneczne najczęściej wykonywane są na podłożu sztywnym, jednak nie we wszystkich aplikacjach możliwe jest użycie takiego rozwiązania. Niektóre zastosowania wymagają paneli na podłożach elastycznych (np. poszycia namiotów, ubrania, elementy dekoracyjne itp.). Dobór właściwego podłoża jest szczególnie istotny, gdyż wpływa bezpośrednio na właściwości mechaniczne i środowiskowe (zastosowanie, tryb, czas i możliwe warunki pracy, charakter obsługi oraz transport). Uwzględniając powyższe wymagania do wykonania modelu EPF zastosowano tkaniny poliamidowe powleczone kauczukiem chloroprenowym.

Konwersja energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną zachodzi w krzemowym ogniwie fotowoltaicznym poprzez wykorzystanie półprzewodnikowego charakteru złącza typu p-n, w którym pod wpływem energii słonecznej następuje

przemieszczanie się ładunków elektrycznych. To z kolei powoduje pojawienie się różnicy potencjałów, czyli napięcia elektrycznego. Typowe ogniwo słoneczne z krystalicznego krzemu o wymiarach ok. 10×10 cm lub $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ wytwarza nominalne napięcie około 0,5 V. Poprzez szeregowe i równoległe połączenie ogniw słonecznych można otrzymać baterie słoneczne o oczekiwanej mocy i napięciu. W wyniku przeprowadzonej analizy ustalono, że optymalne będą ogniwa z trzema elektrodami „zbierającymi” o wymiarach $156 \text{ mm} \times 156 \text{ mm}$ (rys. 3). Ogniwa te zostaną pocięte na dziewięć mniejszych ogniw za pomocą piły laserowej (rys. 4).



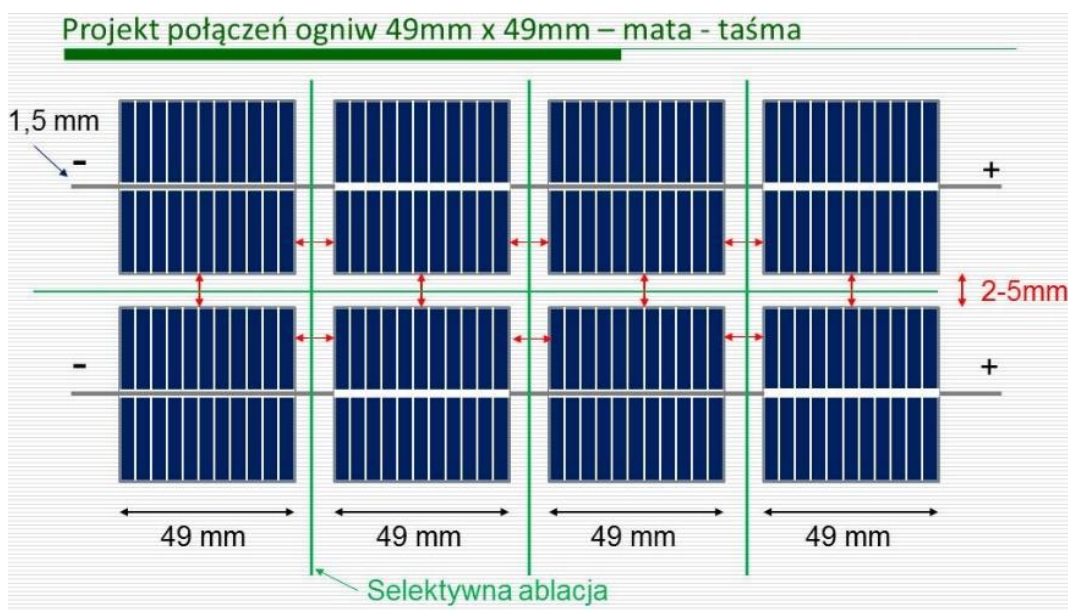
Rys. 3. Krzemowe ogniwo słoneczne z trzema elektrodami zbierającymi



Rys. 4. Przykład cięcia ogniw

W produkcji przemysłowej stosuje się łączenie tzw. maszynowe ogniów w łańcuchy. Lutowanie modułów ręcznie odbywa się na specjalne zamówienie. W standardowych modułach łączy się szeregowo od 36 do 216 ogniów, z których tworzy się dwa lub trzy łańcuchy ogniów, połączone ze sobą równoległe. Dzięki takiemu połączeniu możliwe jest uzyskanie odpowiedniego napięcia i wydajności prądowej modułu.

W rozwiązaniu modelowym ogniwa słoneczne zostaną połączone w sposób szeregowo-równoległy (rys. 5). Montaż poszczególnych ogniów i modułów słonecznych odbywać się będzie za pomocą taśmy z miedzi ocynowanej z wykorzystaniem techniki lutowania miękkiego. Funkcję elastycznego podłoża spełnią tkaniny poliamidowe gumowane.



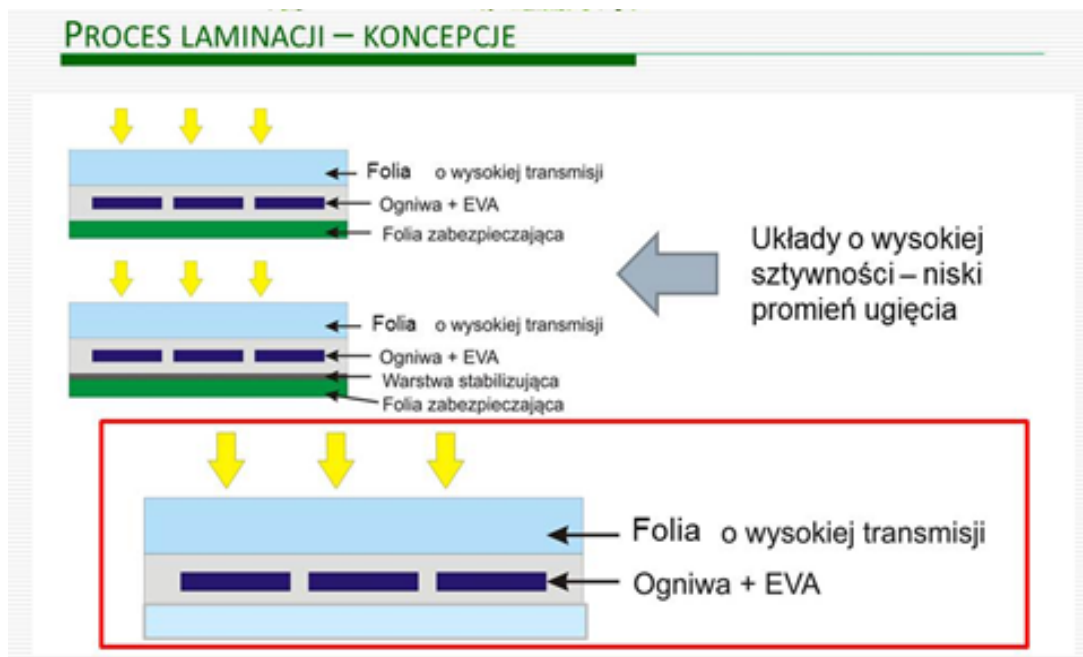
Rys. 5. Przykładowy wariant modelu pokrycia fotowoltaicznego

W kolejnym etapie przeprowadzonych prac polutowane ogniwa słoneczne poddano procesowi laminacji uwzględniającym następujące trzy warianty:

- z podkładką stabilizującą,
- ze szkłem zabezpieczającym przednią stronę ogniwa,
- bez dodatkowych zabezpieczeń.

Przykładowy proces laminacji przedstawiono na rysunku nr 6. Architektura badanych EPF była następująca:

- tkanina/EVA/krzemowe ogniwo słoneczne/EVA/folia do laminacji,
- PET/EVA/krzemowe ogniwo słoneczne/EVA/folia do laminacji,
- tkanina/EVA/krzemowe ogniwo słoneczne/EVA/szkło hartowane.



Rys. 6. Koncepty procesu laminacji (bez zabezpieczeń i z podkładką zabezpieczającą)

Badania modelu elastycznego pokrycia fotowoltaicznego

Badania [8], [10] miały na celu sprawdzenie parametrów elektrycznych wytworzonych próbek elastycznych pokryć fotowoltaicznych. W celu realizacji powyższych założeń przeprowadzono trzy etapy badań obejmujące:

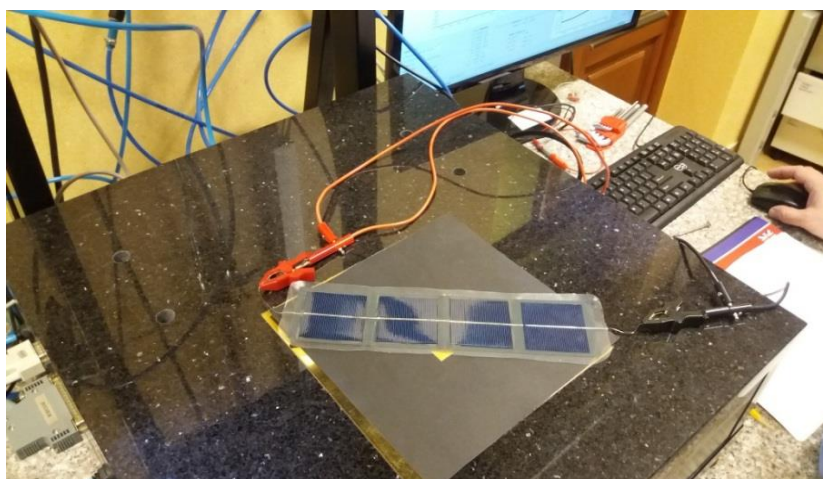
- analizę parametrów elektrycznych EPF przed i po uszkodzeniach mechanicznych,
- analizę jakości wykonania EPF metodą elektroluminescencji,
- analizę jakości wykonania EPF metodą termoemisji.

Po wstępnym zweryfikowaniu parametrów elektrycznych próbek w pierwszym etapie badań poddano je 50-krotnemu zginaniu, po czym ponownie zmierzono ich parametry elektryczne. Badania te pozwoliły na określenie, która z wytworzonych próbek cechuje się najlepszą odpornością na narażenia mechaniczne. Parametrem oceny wpływu zastosowanego materiału bazowego na zwiększenie odporności pokrycia fotowoltaicznego EPF na narażenia mechaniczne był spadek wartości sprawności. W wyniku pomiarów wyznaczono charakterystyki prądowo-napięciowe $I = f(U)$ oraz parametry elektryczne (napięcie obwodu otwartego, prąd zwarciový ogniwa oraz sprawność). Przykładową próbkę elastycznego pokrycia (oznaczoną symbolem EPF_02) wykonano na tkaninie nośnej MP144/I (tkanina poliamidowa, biel surowa), przy zastosowaniu kopolimeru EVA (kopolimer etylenu i octanu winylu), ogniw fotowoltaicznych oraz folii do laminacji. Próbka ta nie miała dodatkowych zabezpieczeń (rys. 7). Podłoża elastyczne (tkaniny) zostały wykonane przez firmę Lubawa S.A.



Rys. 7. Próbkę EPF_02 – przedstawiono obie strony pokrycia

Badania charakterystyk prądowo-napięciowych EPF wykonywano na stanowisku do badań ogniw fotowoltaicznych (rys. 8).

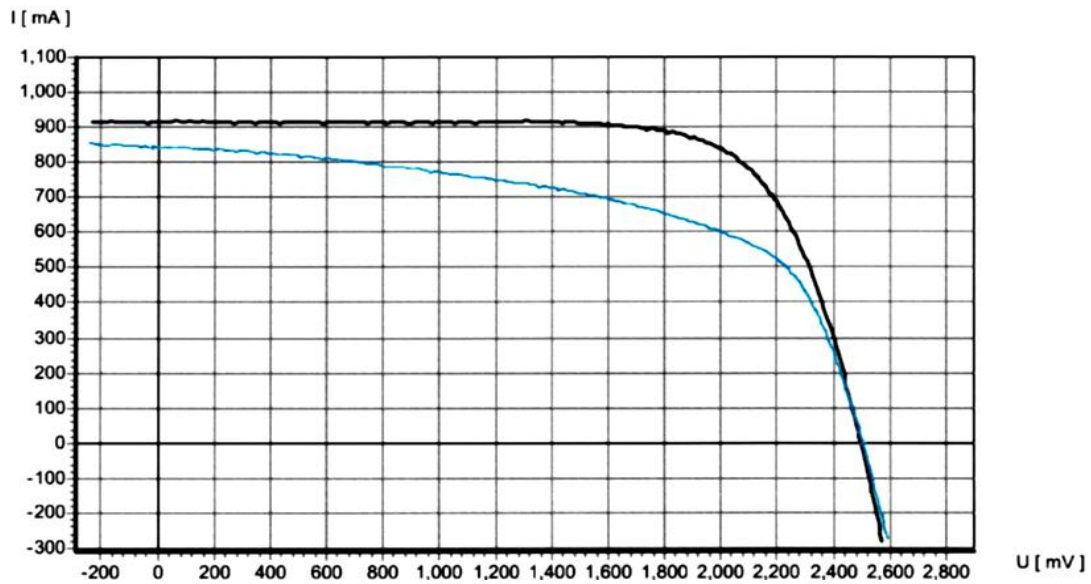


Rys. 8. Badania elektryczne elastycznego pokrycia fotowoltaicznego

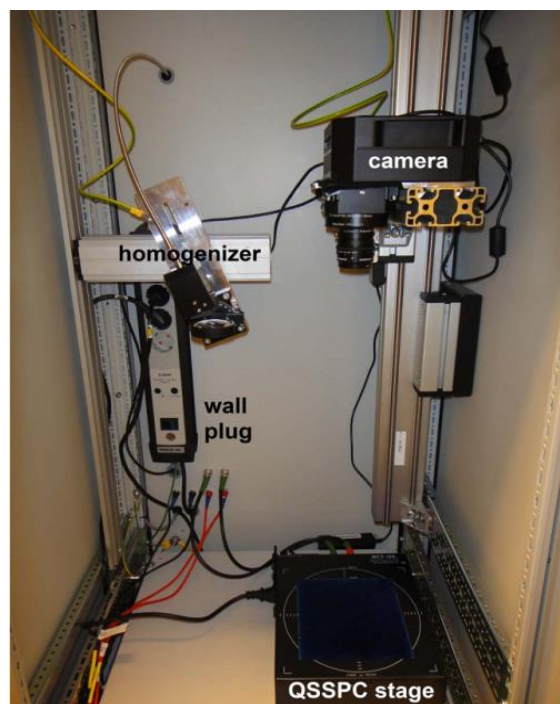
W wyniku badania otrzymano charakterystykę prądowo-napięciową określającą parametry elektryczne próbki. Na rys. 9 przedstawiono wyniki otrzymane dla ogniwa EPF_02.

Podczas procesu produkcyjnego EPF bardzo istotną kwestią jest badanie jakości wykonania elastycznego pokrycia fotowoltaicznego po procesie laminacji. Jest to szczególnie istotne, gdyż na tym etapie powstaje najwięcej defektów. Badanie jakości pokrycia wykorzystujące metodę elektroluminescencji jest bardzo dokładne, komplikuje ono jednak proces produkcyjny ze względu na stosunkowo długi czas ekspozycji próbki i konieczność zapewnienia braku oświetlenia w trakcie badania. W związku z tym wydaje się zasadne wprowadzenie innej, prostszej metody o mniejszej dokładności, ale wystarczającej do wykrycia wadliwych produktów. Taką metodą jest badanie z wykorzystaniem kamery termowizyjnej. Kontrola jakości pokrycia odbywa się w standardowym oświetleniu linii produkcyjnej. Na czas pomiaru segment pokrycia

EPF jest zasilany w kierunku przewodzenia napięciem stałym o parametrach zbliżonych do wydajności fotowoltaicznej. Rozkład temperatury na powierzchni segmentu jest sprawdzany kamerą termalną. Uszkodzone fragmenty pokrycia mają niższą temperaturę niż fragmenty ogniwa nieuszkodzone (sprawne). Metoda ta jest szybka i może się sprawdzić się w warunkach produkcyjnych.



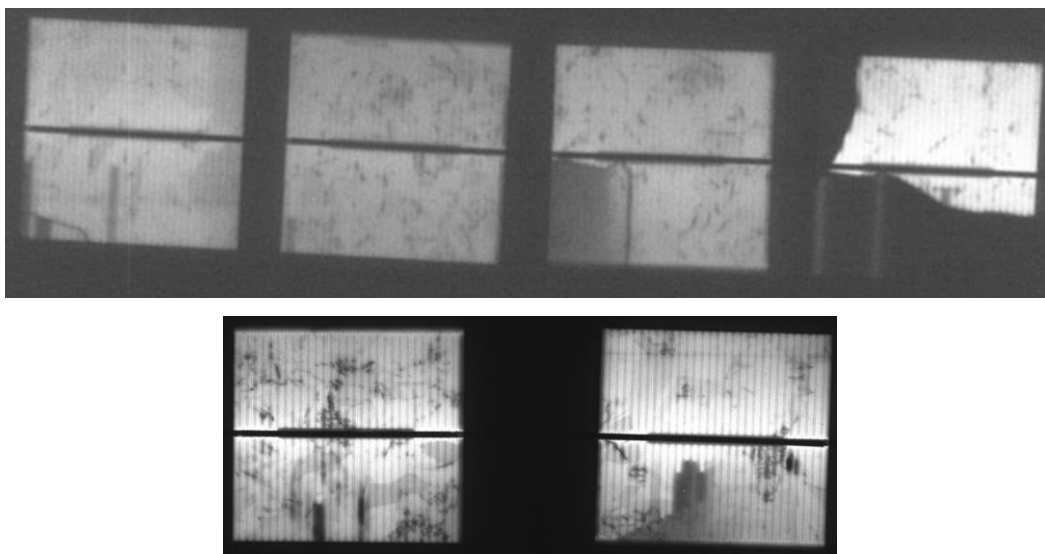
Rys. 9. Charakterystyki prądowo–napięciowe ogniwa EPF_02 przed (linia czarna) oraz po (linia niebieska) poddaniu uszkodzeniom mechanicznym



Rys. 10. Widok systemu wraz z kamerą i homogenizerem wiązki laserowej

Badanie jakości wykonania próbki z wykorzystaniem zjawiska elektroluminescencji [11] wykonano na stanowisku przedstawionym na rys. 10.

Próbka pokrycia fotowoltaicznego była, na czas pomiaru, zasilana w kierunku przewodzenia napięciem stałym o parametrach zbliżonych do wydajności fotowoltaicznej. Rozkład elektroluminescencji na powierzchni próbki sprawdzano kamerą. Uszkodzone fragmenty próbki nie generowały promieniowania, co na zobrazowaniu przedstawiono jako ciemny odcień szarości (rys. 11).



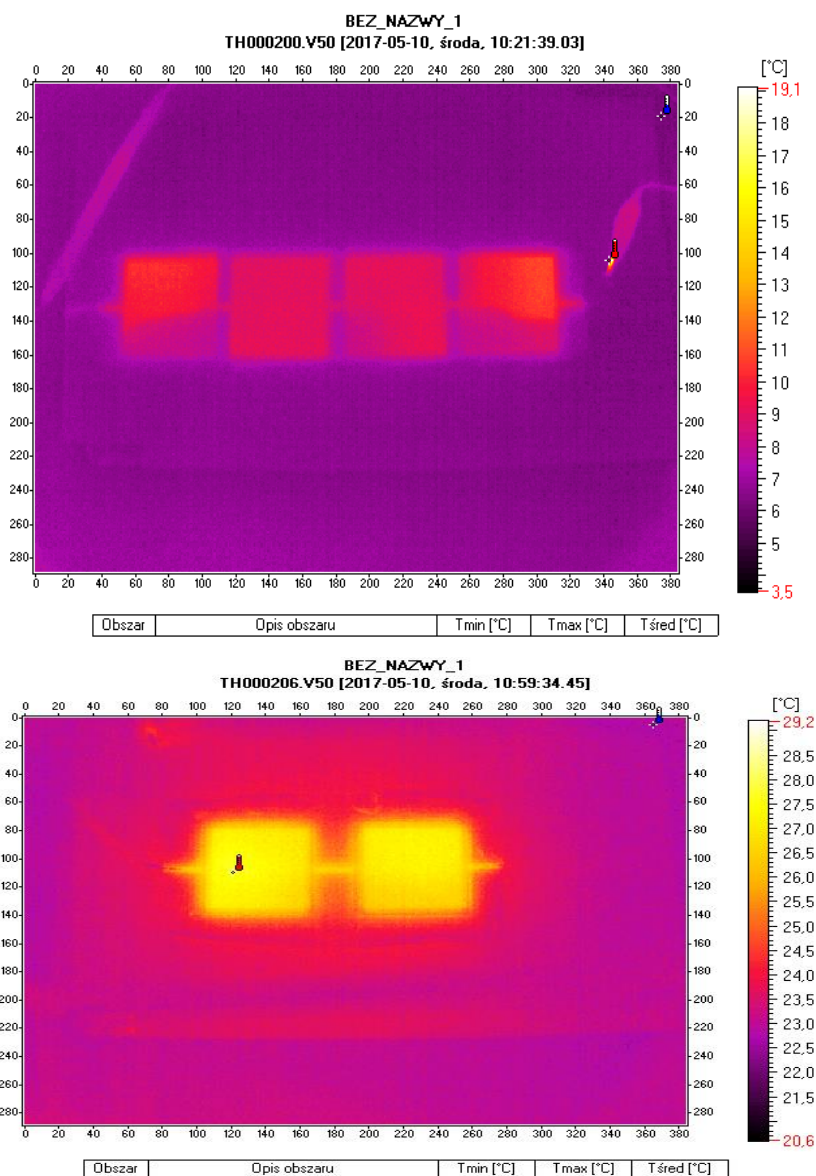
Rys. 11. Obraz elektroluminescencji pokrycia EPF_02 i EPF_05

Badanie jakości wykonania próbki z wykorzystaniem zjawiska termoemisji wykonano na stanowisku przedstawionym na rys. 12.



Rys. 12. Stanowisko do badań ogniw słonecznych z wykorzystaniem kamery termowizyjnej

Podobnie jak w przypadku badania EPF metodą elektroluminescencji próbka fotowoltaicznego pokrycia w czasie pomiaru była zasilana w kierunku przewodzenia napięciem stałym o parametrach zbliżonych do wydajności fotowoltaicznej. Rozkład termoemisji na powierzchni próbki sprawdzano kamerą termalną. Uszkodzone fragmenty próbki nie generowały promieniowania, co na zobrażowaniu przedstawiono jako ciemny odcień fioleto (rys. 13).



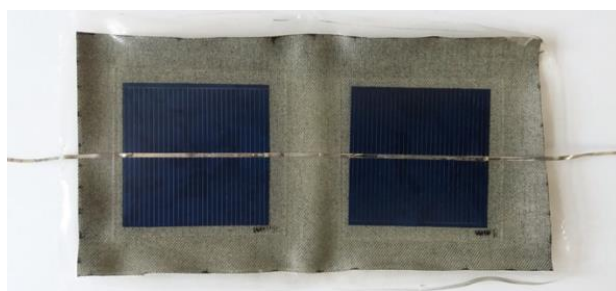
Rys. 13. Obraz termalny pokrycia EPF_02 i EPF_05

Metodami elektroluminescencji jak i termoemisji przebadano kilkanaście pokryć EPF na różnych podłożach. Wyniki badań pozwoliły stwierdzić, iż rodzaj stosowanej tkaniny nośnej w elastycznym pokryciu fotowoltaicznym ma niezwykle istotny wpływ na wartość sprawności EPF po uszkodzeniach mechanicznych. Uszkodzenia mechaniczne występować mogą w całym cyklu życia elastycznego pokrycia fotowoltaicznego to jest:

- w czasie magazynowania,
- transportu,
- instalacji na miejscu pracy,
- obsługi w trakcie użytkowania.

Najbardziej korzystną z perspektywy ochrony ogniw fotowoltaicznych przed uszkodzeniami mechanicznymi okazała się próbka EPF_05 wykonana na tkaninie nośnej MP144/I, przy zastosowaniu kopolimeru EVA, ogniwa fotowoltaicznego, folii do laminacji oraz szkła hartowanego o grubości 1 mm (rys. 14).

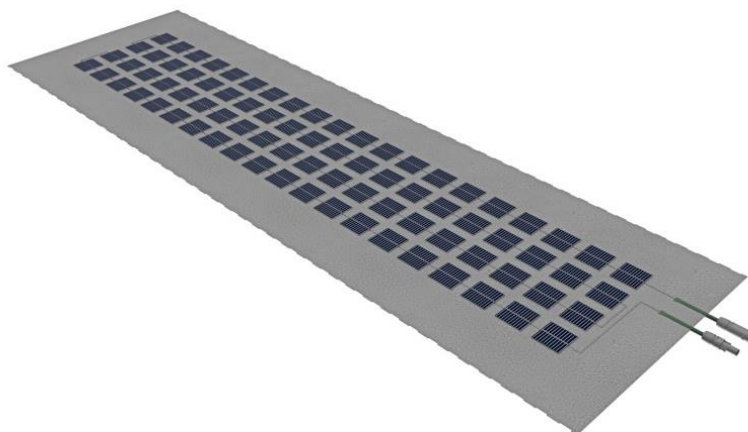
W tym przypadku nie stwierdzono w obrazach elektroluminescencji uszkodzeń po poddaniu czynnikom mechanicznym. Główną przyczyną tak dobrej ochrony ogniw jest zastosowanie cienkiej szyby hartowanej jako przedniej warstwy elastycznego pokrycia fotowoltaicznego. To rozwiązanie zostało wytypowane jako najlepsze do dalszej realizacji projektu.



Rys. 14. Próbką EPF_05 widok od przodu

Wykonanie prototypu elastycznego pokrycia fotowoltaicznego

Jako pierwsze podstawowe rozwiązanie elastycznego pokrycia fotowoltaicznego przyjęto wariant bez układów gromadzenia energii przedstawiony na rys. 15.



Rys. 15. Widok segmentu elastycznego pokrycia fotowoltaicznego z naniesionymi ogniwami

Ogniwa w ilości 72 – 80 szt. w każdym segmencie połączone były szeregowo w celu uzyskania napięcia obwodu otwartego w granicach 40 V. Takie segmenty powtarzać można aż do wypełnienia podłoża elastycznego o długość 2700 mm.

(1600 × 2700 mm – obszar technologicznie możliwy do zalaminowania). Między segmentami zachowany będzie odstęp 20 cm, co umożliwi ewentualny podział całego pokrycia elastycznego na dogodną ilość segmentów.

Zgodnie z przyjętymi założeniami wykonano jeden segment pokrycia przedstawiony na rys. 16.



Rys. 16. Prototyp elastycznego pokrycia fotowoltaicznego: wersja rozwinięta i zrolowana

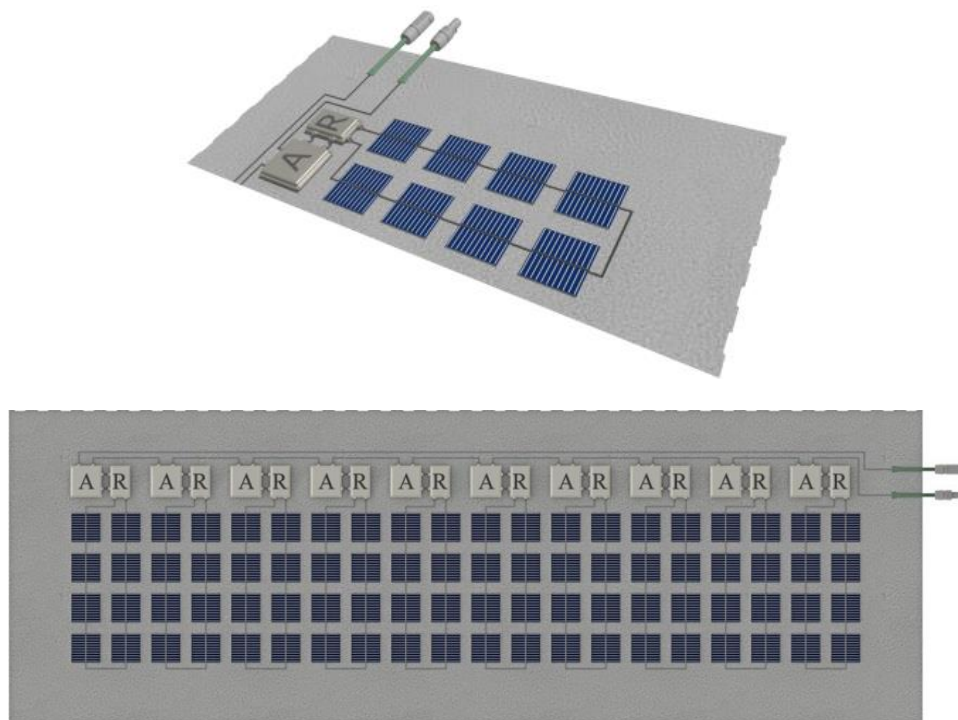
Zaproponowane pokrycie EPF cechuje się nie tylko znaczną elastycznością umożliwiającą jego rolowanie, ale co jest również bardzo istotne z punktu widzenia przyszłych użytkowników, możliwością odcięcia zadanej długości EPF bez utraty własności elektrycznych.

Podstawowy wariant EPF (jeden segment), w wersji produkcyjnej, charakteryzował się następującymi parametrami:

- napięcie wyjściowe 36 V
- maksymalna moc 30 W
- wymiary (dł. × szer. × wysokość) 1,6 m × 0,5 m × 1,5 mm
- masa ok. 1,9 kg
- dobra elastyczność, wysoka sprawność oraz wieloletni okres użytkowania
- może być produkowane o dowolnej długości, co umożliwia łączenie segmentów w celu zwiększenia mocy sumarycznej.

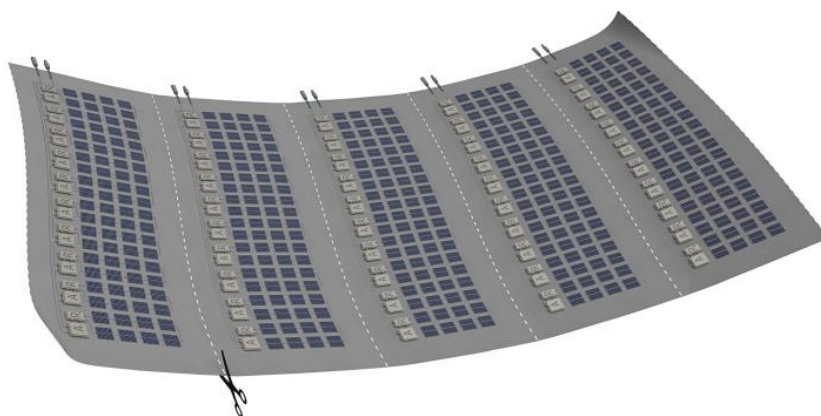
Przy realizacji rozwiązania EPF zawierającego magazyny energii [7] przewidziano zintegrowanie grup akumulatorów z elastycznym podłożem zawierającym ogniwa słoneczne. Do tego celu wybrano akumulatory litowo-jonowe LFP typu „pouch”, których cechą charakterystyczną jest niewielka grubość. Do grupy składającej się z 8 ogniw dedykowany byłby regulator ładowania i akumulator. Każda grupa 8 ogniw stanowiłaby autonomiczny element baterii fotowoltaicznej zaopatrzonej we własny regulator ładowania (R) i akumulator litowo-jonowy (A). Połączenie 10 grup jak przedstawiono na rysunku 17 pozwoli uzyskać segment stanowiący źródło energii

o wartości napięcia wyjściowego rzędu 32 V i umożliwiający pobór prądu ograniczony parametrami akumulatorów.



Rys. 17. Segment elastycznego pokrycia fotowoltaicznego oraz grupa ogniw zawierające układy gromadzenia energii

Finalną wersję EPF przedstawiono na rysunku 18.



Rys. 18. Elastyczne pokrycie fotowoltaiczne zawierające regulatory ładowania (R) i akumulatory litowo-jonowe (A)

Układ magazynowania energii współpracować będzie z EPF naniesionym na tkaninę (rys. 19). Idea tego rozwiązania obejmuje 3 elementy:

- zestaw ogniw fotowoltaicznych,
- tkaninę (materiał) nośną,
- chemiczne ogniwo magazynujące energię elektryczną wraz z układem sterowania.



Rys. 19. Prototyp grupy ośmiu ogniw fotowoltaicznych wraz z układem gromadzenia energii

Podsumowanie

Elastyczne pokrycie fotowoltaiczne przeznaczone jest do budowy awaryjnego źródła zasilania, bądź wytworzenia generatora prądu elektrycznego w miejscu nieposiadającym żadnej infrastruktury energetycznej. Podstawowym odbiorcą elastycznych pokryć fotowoltaicznych (EPF) mogą być Siły Zbrojne RP, a także instytucje takie jak: Policja, Straż Graniczna, Służby Ratownicze, a także odbiorca indywidualny. Zakładanym efektem projektu jest wytworzenie prototypu EPF, jak również opracowanie procesów technologicznych. W ramach realizacji zaproponowano wykonanie trzech prototypów EPF jako wersji przedprodukcyjnej. Pierwszy wariant zawiera tylko ogniwa słoneczne, dwa pozostałe wyposażone będą dodatkowo w układy gromadzenia energii. Dzięki zastosowaniu układów gromadzenia energii możliwe będzie wykorzystanie pokrycia jako źródła prądu elektrycznego przy braku światła słonecznego. Opracowane elastyczne pokrycie fotowoltaiczne (EPF) jest dedykowane do pracy w obszarach dotkniętych skutkami katastrof naturalnych (powódzie, tornada, silne opady śniegu) oraz nienaturalnych (katastrofy budowlane, przemysłowe). Popyt na proponowane rozwiązanie EPF w dużej mierze zdeterminowany będzie przez stosunkowo łatwy montaż i nieskomplikowany sposób użytkowania tego typu urządzeń.

Podziękowania

Podziękowania dla Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej za wsparcie finansowe projektu pt.: „Innowacyjne elastyczne pokrycie fotowoltaiczne” realizowanego w ramach konkursu GEKON – Generator Koncepcji Ekologicznych (nr GEKON2/O4/268473/23/2016).

Literatura

- [1] BLAKERS A., ZIN N., MCINTOSH K. R., FONG K., *High Efficiency Silicon Solar Cells*, Energy Procedia 33 (2013) 1-10.
- [2] BADAWY W. A., *A review on solar cells from Si-single crystals to porous materials and quantum dots*, Journal of Advanced Research 6 (2015) 123-132.
- [3] LIN Q. HUANG H., JING Y., FU H., CHANG P., LI D., YAO Y., FAN Z., *Flexible photovoltaic technologies*. J. Mat. Chem. C 2 (2014) 1233-1247.
- [4] KREBS F. C., BIANCARDO M., WINTHER-JENSEN B., SPANGGARD H., ALSTRUP J., *Strategies for incorporation of polymer photovoltaics into garments and textiles*, Solar Energy Mat.&Solar Cells 90 (2006) 1058-1067.
- [5] SINGH M. K., *Flexible photovoltaics textiles for smart applications*, Solar Cells – New Aspects and Solutions (2011) 43-68.
- [6] DRABCZYK K., MALECZEK S., STOGA D., *Koncepcja quasi-elastycznych mozaikowych baterii słonecznych*, Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania 54 (2013).
- [7] DRABCZYK K., MALECZEK S., STOGA D., *Koncepcja pozyskiwania i magazynowania energii na powierzchni z wykorzystaniem quasi-elastycznych mozaikowych baterii słonecznych*, Elektronika 8 (2015).
- [8] MALECZEK S., MALICKI W., DRABCZYK K., CEBRAT A., *Badanie elastycznych paneli fotowoltaicznych w aspekcie zastosowań militarnych*, Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania 55 (2014).
- [9] DRABCZYK K., MALECZEK S., PANEK P., *Quasi-elastyczne mozaikowe taśmy fotowoltaiczne*, Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania 55 (2014).
- [10] DRABCZYK K., MALECZEK S., *Badanie układów warstw zabezpieczających i kontaktów elektrycznych do zastosowań w quasi elastycznych taśmach fotowoltaicznych*, Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania 56 (2015).
- [11] LIPIŃSKI M., KULESZA G., STAROWICZ Z., *„Obrazowanie luminescencyjne do charakteryzacji ogniw i modułów fotowoltaicznych”*, Elektronika, 8 (2014).

FLEXIBLE SILICON SOLAR CELLS

Summary

The main goal of our work is to incorporate commercial silicon solar cells into various textiles, without any change of the electrical and mechanical parameters of devices. This work is being performed under the GEKON project (No. GEKON2/O4/268473/23/2016) founded by The National Centre for Research and Development and The National Fund for Environmental Protection and Water Management. Various constructions of devices connected to a lithium-ion battery have been proposed. Depending on the lamination process and compatibility of the textile with solar cell, efficiency of the studied flexible silicon-based (Si) solar cells was different. Furthermore, multiple folding and unfolding of the flexible device had no impact on its efficiency. The defects in the constructed flexible silicon photovoltaic modules have been analysed via thermal imaging and electroluminescence method. Flexible silicon solar cells presented can be widely used on a large-scale, e.g. in flexible solar cells integrated with textiles, various types of equipment or buildings for both the military and civil applications (dual use).

