

Integracja i zarządzanie działaniem źródeł i odbiorników prądu w pojazdach z układami rekuperacji energii cieplnej

Streszczenie

W publikacji zaprezentowano prototyp układu sterowania zasilaniem elektrycznym pojazdu z silnikiem spalinowym, integrującego pracę trzech źródeł zasilania – akumulatora, prądnicy oraz innowacyjnego generatora termoelektrycznego. Omówiono metodę kondycjonowania energii elektrycznej, pozyskanej z generatora termoelektrycznego, do wymagań istniejącego zasilania pojazdu. Zaprezentowano budowę stanowiska badawczego, metodę oraz wyniki badań stanowiskowych prototypu systemu sterowania.

Summary

A prototype of the system for control of electric supply of a vehicle with a diesel engine has been presented. The control system integrates three supply sources – a battery, a electrical generator and an innovative thermoelectric generator. A method for conditioning of electric power from thermoelectric generator to the parameters of the vehicle supply system has been discussed. The design of a test stand, the testing method and results of stand tests of the control system prototype are presented.

1. Wstęp

Rosnąca liczba urządzeń elektrycznych i elektronicznych w pojazdach poprawia bezpieczeństwo, komfort i wygodę użytkowników, ale jednocześnie stawia wyższe wymagania układom zasilania. Ponadto globalny niedobór paliw prowadzi do konieczności rozwoju pojazdów hybrydowych i elektrycznych. Zastosowanie technologii odzyskiwania odpadowej energii cieplnej do generowania energii elektrycznej to ekonomiczne i przyjazne środowisku metody zapewnienia źródeł zasilania pojazdów.

Rekuperacja energii cieplnej z zastosowaniem generatorów termoelektrycznych jest stosunkowo nowym zagadnieniem w sektorze przemysłowym. Generator termoelektryczny działa na podstawie jednego z trzech głównych zjawisk termoelektrycznych - zjawiska Seebecka. Polega ono na powstawaniu siły elektromotorycznej (zwanej też siłą termoelektryczną) w obwodzie złożonym z dwóch różnych materiałów, których styki mają różne temperatury [5, 7] i jest wynikiem zależności kontaktowej różnicy potencjałów między materiałami od temperatury. Współcześnie generatory termoelektryczne znajdują zastosowanie wszędzie tam, gdzie występują źródła strat cieplnych, poczynając od gadżetów w życiu codziennym, przez zasilanie bezprzewodowych układów pomiarowych, do zasilania aparatury na statkach kosmicznych. Ze względu na ograniczoną sprawność, generatory termoelektryczne są stosowane z powodzeniem w aplikacjach nie wymagających do działania dużej mocy elektrycznej. Zastosowania generatorów termo-

elektrycznych do odzyskiwania ciepła w pojazdach samochodowych, na statkach oraz w przemyśle są jednak ciągle w fazie badań.

Zastosowanie systemów rekuperacji odpadowej energii cieplnej w maszynach górniczych z napędem spalinowym ma na celu ograniczenie kosztów bezpośrednio transportu, pośrednio wydobycia, zmniejszenie emisji substancji szkodliwych do otoczenia, a także zmniejszenie luki technologicznej między rozwiązaniami stosowanymi w nowoczesnych pojazdach, a górniczymi maszynami transportowymi. Obszarem wdrożenia tego typu rozwiązań może być górnictwo rud miedzi, z uwagi na liczbę eksploatowanych maszyn (w zakładach KGHM eksploatowanych jest około 1600 maszyn z silnikami spalinowymi [4]).

2. Prototyp rekuperatora

Na podstawie opracowanej koncepcji [9] utworzono prototyp generatora termoelektrycznego, który jest najważniejszym elementem systemu zasilania. Koncepcja zakładała wykorzystanie płaskiego rdzenia w postaci komory, którą ogrzewają przechodzące przez nią spaliny, wychodzące z silnika.

Na powierzchniach rdzenia zabudowano termooogniwa, które są chłodzone za pomocą miedzianych chłodziw. Całość skrócono za pomocą docisków, połączonych gwintowanymi prętami. Docisk jest realizowany przez wykorzystanie podkładek talerzowych, umieszczonych na metalowych stemplach. W celu zwiększenia skuteczności odprowadzania energii cieplnej z powierzchni termooogniwa, chłodziwice

zostały wykonane z miedzi. Pozostałe elementy wykonano ze stali węglowej. Widok zmontowanego rekuperatora przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Prototyp rekuperatora [10]

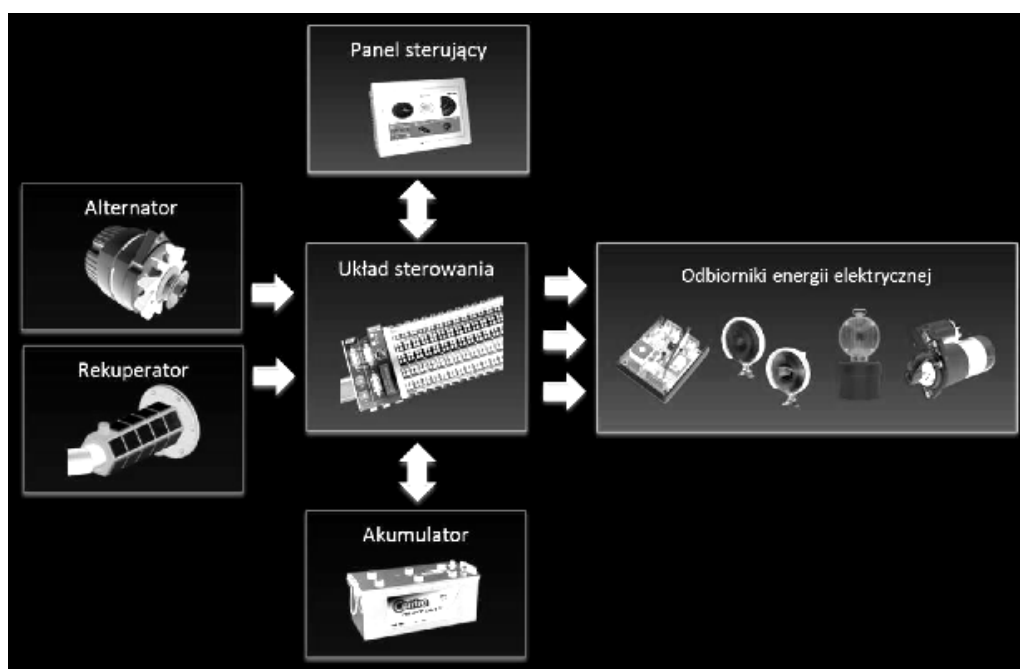
Do budowy pierwszej wersji prototypu wykorzystano dwa typy termoogniwa o różnej budowie, w celu przetestowania żywotności i wydajności poszczególnych rozwiązań. Z jednej strony zainstalowano 54 termoogniwa o wymiarach 40 mm x 40 mm (TEC1-1), natomiast z drugiej strony 24 termoogniwa o wymiarach 60 mm x 60 mm (TEC1-3). Termoogniwa zostały połączone szeregowo w baterie, a następnie poszczególne baterie połączono równolegle, w celu uzyskania większej wartości natężenia prądu. W docelowej wersji prototypu zastosowano po obu stronach rdzenia łącznie 56 termoogniwa TEC1-3, rozsuniętych względem siebie o 20 mm.

3. Doświadczalny system sterowania energią elektryczną

System sterowania energią elektryczną w pojazdach z napędem spalinowym zaprojektowano i zbudowano w celu uzyskania możliwości demonstracji sposobu wykorzystania odzyskanej za pomocą rekuperatora (generatora termoelektrycznego) energii elektrycznej. Zadaniem systemu sterowania jest zintegrowanie i zarządzanie działaniem trzech źródeł energii w pojazdach, napędzanych silnikami spalinowymi – prądnicy, akumulatora oraz innowacyjnego systemu rekuperacji energii cieplnej, a także zarządzanie odbiornikami energii elektrycznej. Blokową strukturę systemu sterującego zasilaniem elektrycznym przedstawiono na rysunku 2. System umożliwia integrację i zarządzanie podzespołami układów zasilania już istniejących w pojazdach, oraz alternatywnego źródła energii, tj. panelu operatora (HMI), rekuperatora (termogeneratora), podukładami sterowania oraz oczujnikowania i układów wykonawczych.

Prototyp systemu sterowania energią elektryczną z zastosowaniem rekuperacji energii cieplnej zbudowano z zastosowaniem sterownika PLC. W układzie sterowania zaimplementowano ponadto przetworniki prądu (monitorujące odbiorniki elektryczne), zaawansowane kontrolery ładowania akumulatora, z funkcją śledzenia maksymalnego punktu mocy modułów termoelektrycznych, oraz panel sterowania z ekranem LCD.

Do systemu podłączono trzy źródła energii elektrycznej – akumulator, prądnicę i termogenerator. Jako odbiorniki energii elektrycznej w stanowisku



Rys.2. Schemat systemu sterowania zasilaniem elektrycznym pojazdu [10]

laboratoryjnym podłączono do systemu żarniki halogenowe. Odbiornikiem jest również sam system, który jest zasilany z wybranego źródła (domyślnie z akumulatora). Na rysunku 3 zaprezentowano widok wnętrza skrzynki sterowniczej, z zaznaczonymi elementami składowymi.

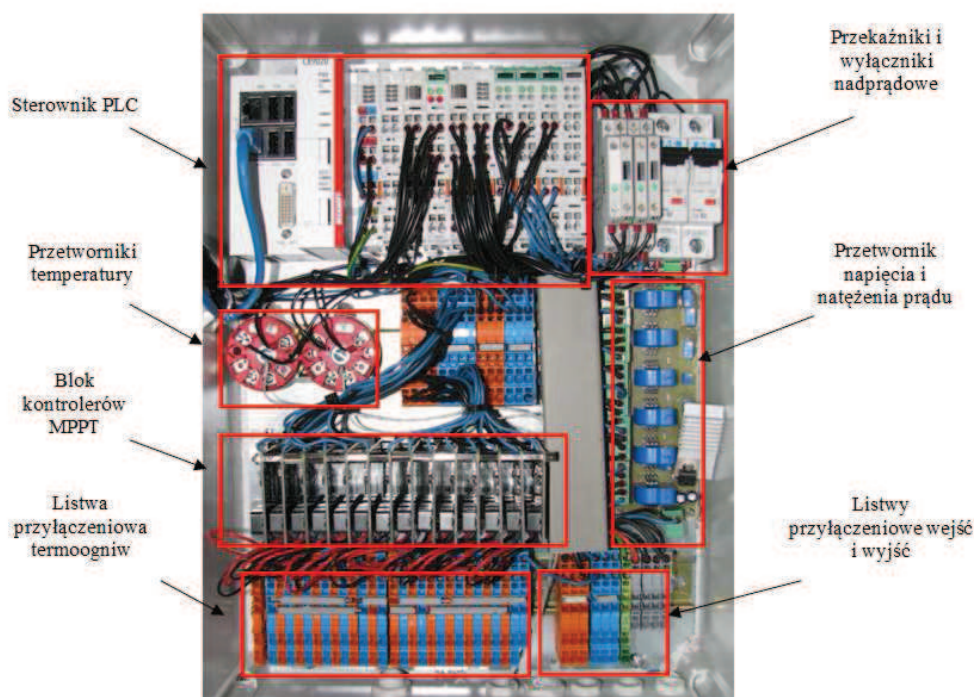
Kontrolery ładowania stanowią łącznik generatora termoelektrycznego z systemem sterowania zasilaniem elektrycznym pojazdu. Do każdego z 14 kontrolerów MPPT (ang. Maximum Power Point Tracking) został podłączony wiersz, składający się z czterech połączonych szeregowo modułów termoelektrycznych. Napięcia z kontrolerów trafiają na wspólną listwę

przyłączeniową, a następnie – przez przekaźnik są wprowadzane do systemu.

Temperatura jest monitorowana z wykorzystaniem termoelementów typu K, których sygnał jest przekazywany do dwóch przetworników pomiarowych, a następnie do kart analogowych sterownika PLC.

Za pomocą specjalnie zaprojektowanego i wykonanego przetwornika pomiarowego napięcia i natężenia prądu system na bieżąco monitoruje takie parametry, jak:

- napięcie w systemie,
- natężenie przepływu prądu systemu sterowania,



Rys.3. Widok prototypowego układu sterowania zasilaniem elektrycznym pojazdu [10]



Rys.4. Widok panelu HMI podczas działania systemu [10]

- natężenie przepływu prądu odbiorników,
- natężenie przepływu prądu akumulatora (dwukierunkowo),
- natężenie przepływu prądu prądnicy,
- natężenie przepływu prądu termogeneratora,
- napięcie poszczególnych wierszy termooogniw w termogeneratorze,
- temperaturę powierzchni termogeneratora.

Informacje z przetwornika przekazywane są do analogowej karty wejściowej sterownika PLC za pomocą sygnału 0÷10 V, a następnie ponownie przetwarzane - do wartości rzeczywistych, i wprowadzane do algorytmu sterującego. Pozostałe elementy systemu to blok przełączników, wyłączników nadprądowych oraz bloki listw przyłączeniowych.

W utworzonym stanowisku badawczym siedmioosobowy panel dotykowy pełni funkcję interfejsu HMI oraz monitora stanu systemu, a opracowana aplikacja programowa umożliwia:

- wizualizację poziomu przepływającej energii,
- manualne sterowanie załączeniem odbiorników energii elektrycznej,
- wyświetlanie parametrów systemu oraz jego poszczególnych podzespołów,
- wyświetlanie alarmów i ostrzeżeń.

Główny ekran panelu HMI (rys. 4) składa się z trzech części. Źródła energii elektrycznej znajdują się po lewej stronie, natomiast odbiorniki energii elektrycznej – po prawej. Centralnie znajduje się blok symbolizujący system sterowania energią elektryczną, w którym są wyświetlane wartości najważniejszych parametrów procesu.

Przepływ energii elektrycznej jest sygnalizowany za pomocą ruchomych strzałek. Dodatkowo wprowadzono rozróżnienie rodzaju energii elektrycznej – kolorem pomarańczowym jest oznaczona energia generowana z prądnicy, natomiast energia z akumulatora oraz ze źródła alternatywnego (rekuperatora) - kolorem zielonym. Załączenie poszczególnych źródeł odbywa się samoczynnie, zgodnie z zaimplementowanym algorytmem działania systemu sterowania. Odbiorniki załączane są manualnie, za pomocą przełączników dźwigniowych.

Poza ekranem głównym w panelu znajdują się jeszcze ekrany pomocnicze, na których znajdują się informacje w postaci tekstowej, jak również w postaci graficznej (wykresy zmian temperatury oraz napięcia i natężenia prądu), oraz lista alarmowa. Na osobnym ekranie są wyświetlane parametry generatora termoelektrycznego (napięcia poszczególnych wierszy modułów termoelektrycznych), z sygnalizacją stanów ostrzegawczych i alarmowych, generowanych przez blok diagnostyczny układu sterowania.

Układ działa w sposób, minimalizujący wykorzystanie prądnicy, co bezpośrednio przekłada się na odciążenie silnika spalinowego i jednocześnie zmniejszenie ilości spalanej paliwa. Po rozgrzaniu generatora termoelektrycznego, cała wytwarzana przez niego energia elektryczna jest wykorzystywana do zasilania urządzeń, bądź do ładowania akumulatora. W przypadku większego zapotrzebowania na energię elektryczną niż jest w stanie wygenerować rekuperator, załączana jest prądnica. Z prądnicy jest pobierana jedynie uzupełniająca energia elektryczna, ponieważ priorytet wykorzystania ma energia elektryczna z generatora termoelektrycznego. Na rysunku 4 przedstawiono widok panelu operatora podczas działania systemu, z załączonym silnikiem spalinowym, pracującym na wolnych obrotach, bez obciążenia. Mimo, że termogenerator nie jest jeszcze rozgrzany ($\Delta T = 55 \text{ }^\circ\text{C}$, przy możliwym $\Delta T_{max} \approx 150 \text{ }^\circ\text{C}$), generowany jest prąd o natężeniu 0,5 A. Przy załączonych dwóch dodatkowych odbiornikach o mocy sumarycznej około 45 W, ze względu na niewystarczającą ilość energii elektrycznej pobieranej z generatora termoelektrycznego, układ sterowania załączył prądnicę. Z uwagi na stan naładowania akumulatora (19 Ah, 24 V) na poziomie 94%, kontroler ładowania kieruje do akumulatora niewielki ładunek elektryczny.

Na panelu na bieżąco są wyświetlane informacje ostrzegawcze i stany alarmowe. Na ekranie przedstawionym na rysunku 4 zasymulowano ponadto awarię 7. wiersza termooogniw, przez jego odłączenie od układu sterowania.

4. Technika MPPT

Wykorzystanie energii elektrycznej, uzyskanej z termogeneratora, wymaga odpowiedniego jej kondycjonowania do wymagań układu sterowania oraz do ładowania akumulatora. W tym celu są stosowane przetwornice i kontrolery ładowania. Z uwagi na nierównomierne ogrzewanie powierzchni generatora termoelektrycznego (zjawiska związane z ochładzaniem spalin na długości rdzenia) poszczególne wiersze modułów termoelektrycznych osiągają różną wydajność. W przypadku równoległego połączenia poszczególnych wierszy termooogniw uzyskiwana z nich moc jest uśredniana. W związku z tym stało się konieczne zastosowanie urządzeń, zapewniających jak największy stopień odzyskania energii.

Technika MPPT jest nowym rozwiązaniem, stopniowo wprowadzanym na rynek w regulatorach ogniw fotowoltaicznych [1, 3]. Z uwagi na charakter działania, regulatory MPPT można również stosować do regulacji wartości rezystancji obciążenia modułów termoelektrycznych. Położenie punktu maksymalnej mocy generatora na charakterystyce prądowo-napięciowej termooogniwa zależy od różnicy temperatur i obciążenia. Ze względu na zmienność tych wielkości

podczas pracy pojazdu (maszyny) niezbędne jest stałe śledzenie punktu maksymalnej mocy. Technika MPPT polega na wprowadzeniu do regulatora ładowania akumulatora sterowalnej przetwornicy DC/DC, która - w połączeniu z odpowiednim algorytmem wyszukiwania punktu mocy maksymalnej - zapewnia odpowiednie dopasowanie energetyczne modułów termoelektrycznych do obciążenia, jakim w tym przypadku jest akumulator.

Przy określonej wartości różnicy temperatury na powierzchniach generatora termoelektrycznego, istnieje jeden punkt, odpowiadający mocy maksymalnej modułu termoelektrycznego. W celu wykorzystania maksymalnej mocy, możliwej do uzyskania z generatora, należy dążyć do takiego dopasowania rezystancji obciążenia, które zapewni pracę układu w tym punkcie. Ta zasada jest nazywana elektrycznym śledzeniem maksymalnego punktu mocy (MPPT). W przypadku jakichkolwiek zmian warunków temperatury, do śledzenia niezbędna jest odpowiednia regulacja rezystancji obciążenia. Istnieje kilka algorytmów śledzenia punktu maksymalnej mocy, jednak najczęściej jest stosowana metoda oparta na zasadzie P&O (Perturb and Observe), w której ekstremum lokalne osiąga się stosując technikę wspinaczkową, gdzie kolejne kroki określa się na podstawie oceny zachowania się funkcji celu w każdym kolejnym wykonanym kroku. Do sygnału kontrolnego konwertera są wprowadzane okresowe perturbacje, przy jednoczesnym obserwowaniu ich wpływu na moc generatora. Jeśli chwilowa wartość mocy jest większa niż poprzednia, wprowadzone zakłócenie jest określane jako krok we właściwym kierunku (tabela 1). W przeciwnym przypadku kierunek zakłócenia jest odwracany [2].

Tablica stanów kontrolera MPPT [2]

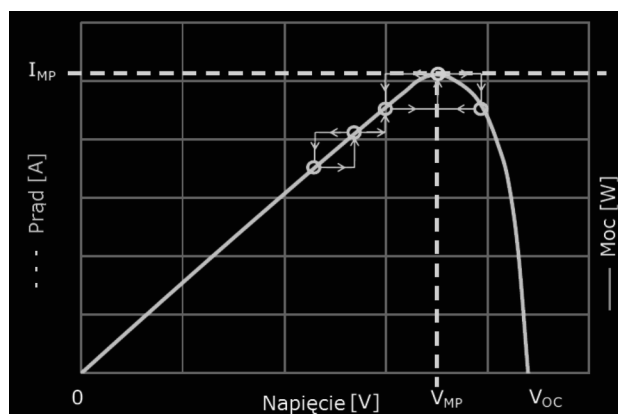
Tabela 1

Zaburzenie	Zmiana mocy	Następne zaburzenie
dodatnie	dodatnia	dodatnie
dodatnie	ujemna	ujemne
ujemne	dodatnia	ujemne
ujemne	ujemna	dodatnie

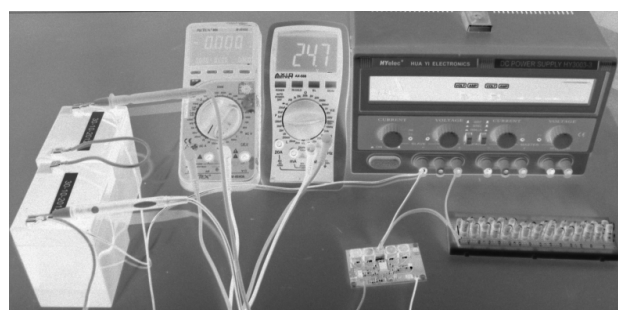
Punkt pracy osiąga wierzchołek krzywej P-U i następnie oscyluje wokół niego (rys. 5).

W ramach prowadzonych prac zbudowano kontroler ładowania akumulatora z funkcją poszukiwania maksymalnego punktu mocy. W celu zweryfikowania działania i przydatności kontrolera do zastosowania w systemie sterowania, przeprowadzono jego badania laboratoryjne. Jako źródła napięcia użyto zasilacza laboratoryjnego z regulowanym napięciem wyjściowym w zakresie 0÷30 V DC, 3 A. Zasilacz został podłączony do kontrolera MPPT szeregowo, przez płytkę testową, umożliwiającą nastawianie zmiennej rezystancji źródła. Do wyjścia kontrolera podłączono szeregowo dwa

bezobsługowe akumulatory 12 V o pojemności 5 Ah każdy. Widok układu pomiarowego zaprezentowano na rysunku 6.

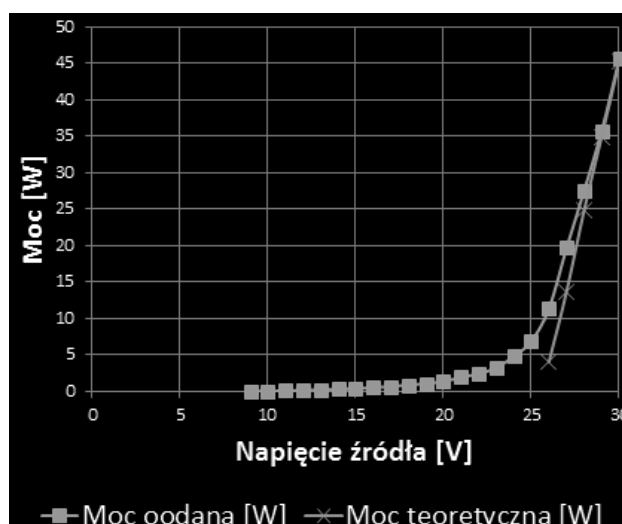


Rys.5. Wykres obrazujący śledzenie punktu maksymalnej mocy źródła [6]



Rys.6. Widok laboratoryjnego układu pomiarowego [10]

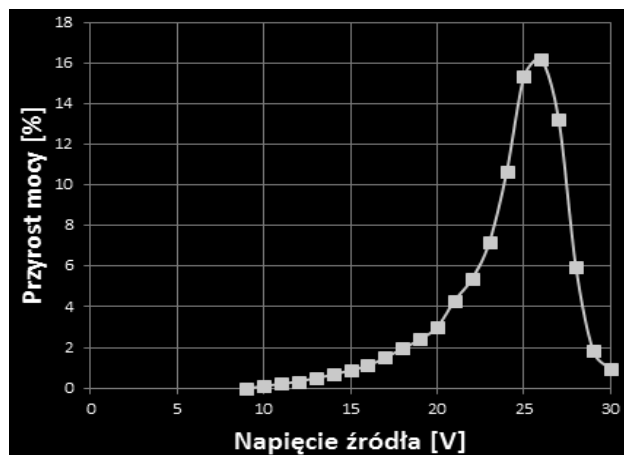
Wyznaczono rzeczywiste wartości mocy źródła, mocy oddanej do akumulatora, sprawności kontrolera oraz analitycznie - teoretyczne wartości natężenia prądu, mocy i sprawności ładowania, bez zastosowania kontrolera MPPT.



Rys.7. Zestawienie rzeczywistej mocy oddanej do akumulatora oraz mocy teoretycznej w zależności od napięcia źródła, przy rezystancji źródła 1,9 Ω [10]

Z wykresu przedstawionego na rysunku 7 wynika, że kontroler MPPT oddaje moc do akumulatora przy znacznie niższych napięciach źródła, niż byłoby to

w przypadku bezpośredniego podłączenia źródła do akumulatora. Związane jest to z faktem ładowania akumulatora przy wyższym napięciu źródła od napięcia samego akumulatora. Dlatego na wykresie moc teoretyczna generowana jest dopiero powyżej napięcia o wartości 25 V. Kontroler MPPT rozpoczyna ładowanie znacznie wcześniej, dzięki wbudowanej przetwornicy DC-DC, podwyższającej napięcie na wyjściu. Moc oddawana do akumulatora generowana jest już od napięcia źródła na poziomie 10 V. Wartość mocy teoretycznej zbliża się do wartości mocy oddanej dopiero przy najwyższych napięciach (od 28 V).

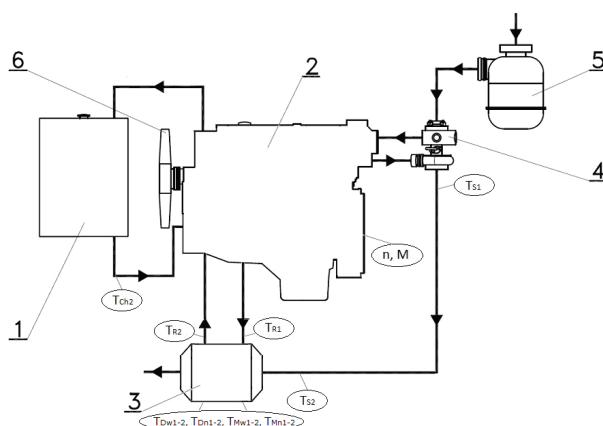


Rys.8. Wykres przyrostu mocy oddanej do akumulatora [10]

Sprawność kontrolera MPPT, przy napięciach źródła wyższych od napięcia akumulatora, jest wyższa niż 90%, natomiast przy napięciu źródła powyżej 29 V sprawność przekracza już 95%. W przypadku napięcia źródła niższego od napięcia akumulatora, sprawność przetwornicy waha się od 25% (przy napięciu źródła równym 10 V) do 90% (przy napięciu źródła równym 25 V). Osiągnięte wyniki potwierdziły, że kontroler z zaimplementowanym algorytmem MPPT działa prawidłowo, wykorzystując jak najwięcej mocy ze źródła energii, jakim w tym przypadku był zasilacz laboratoryjny. Przyrost mocy, obliczony jako różnica rzeczywistej mocy oddanej do akumulatora i mocy teoretycznej, w stosunku do mocy maksymalnej, zaprezentowano na rysunku 8. Zastosowanie kontrolera MPPT zwiększa uzyskiwaną moc maksymalnie o 16,2%, przy rezystancji źródła na poziomie 1,9 Ω .

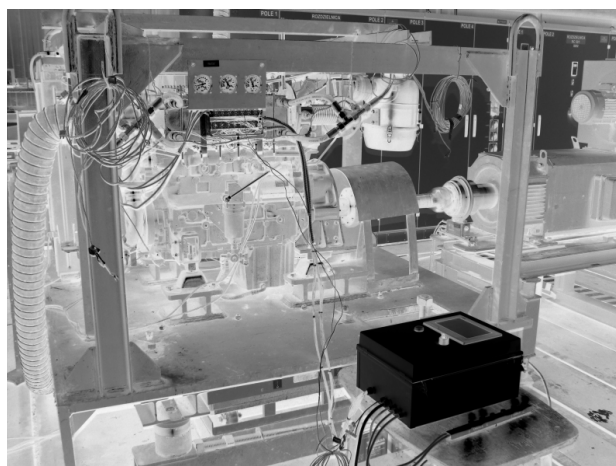
5. Stanowisko badawcze

Zaproponowana konstrukcja rekuperatora została opracowana w sposób umożliwiający jego montaż w typowym układzie wylotowym napędu spalinowego. W celu przeprowadzenia badań rekuperatora energii cieplnej, poza opracowaniem konstrukcji samego rekuperatora, niezbędne było zaprojektowanie i wykonanie dodatkowych elementów mocujących oraz łączących urządzenie ze stanowiskiem i poszczególnymi jego instalacjami (rys. 9, na podstawie [8]).



Rys.9. Schematy przepływu spalin i cieczy chłodzącej na stanowisku badawczym [10]: 1 – chłodnica wody silnika, 2 – silnik spalinowy, 3 – rekuperator, 4 – turbosprężarka, 5 – filtr powietrza, 6 – wentylator chłodnicy

Zmiana konfiguracji stanowiska polegała na zastąpieniu typowego układu wylotowego spalin rekuperatorem energii, przez którego „gorącą” część przepływają spaliny, natomiast obie chłodnice rekuperatora są podłączone do układu chłodzenia. Stanowisko badawcze z zamontowanym generatorem termoelektrycznym oraz układem sterowania, przedstawiono na rysunku 10.



Rys.10. Stanowisko badawcze [10]

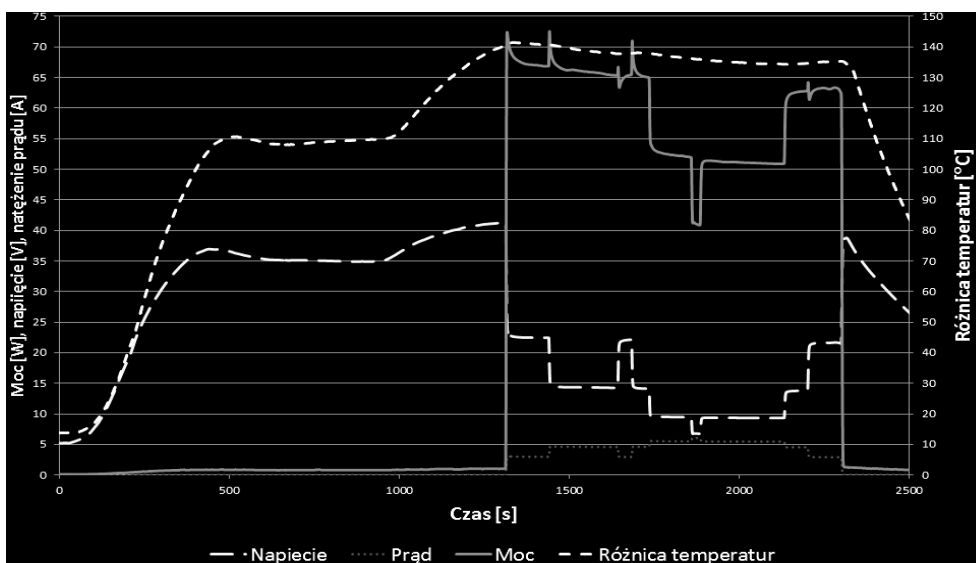
Próby związane z pierwszym uruchomieniem stanowiska przeprowadzono bez użycia przekładni redukcyjnej, opartej o konstrukcję SB-102, podłączając silnik spalinowy bezpośrednio do silnika elektrycznego. Po sprawdzeniu poprawności pracy poszczególnych układów, przystąpiono do montażu przekładni redukcyjnej w celu umożliwienia obciążania silnika spalinowego w pełnym zakresie jego prędkości obrotowej.

6. Wyniki badań

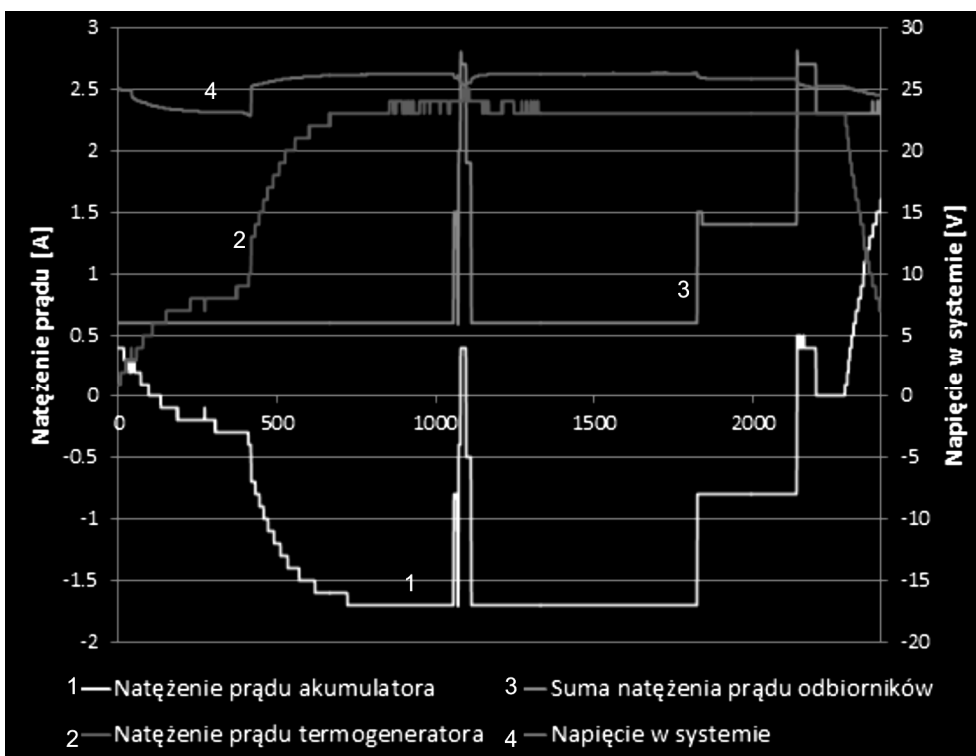
Wyniki prezentowane na rysunku 11 uwzględniają energię elektryczną, wygenerowaną przez ostateczną wersję rekuperatora [10]. Rozmieszczenie termoogniw w odległościach 20 mm od siebie spowodowało

zmniejszenie powierzchni bezpośredniego kontaktu rdzenia z chłodnicami i tym samym umożliwiło osiągnięcie maksymalnej, dopuszczalnej temperatury pracy termooogniw na poziomie 250 °C. Przy temperaturze strony „zimnej” na poziomie około 110 °C zanotowano różnicę wartości temperatury 140 °C. Ze względu na brak możliwości zmniejszenia temperatury w układzie chłodzenia, jest to najwyższa, możliwa do uzyskania w danych warunkach, różnica wartości temperatury. W tych warunkach rekuperator wygenerował około 67 W mocy elektrycznej, przy zastosowaniu 56 termooogniw typu TEC1-1.

Analiza wyników poszczególnych badań umożliwiła wprowadzenie zmian, zwiększających wydajność rekuperatora. Rekuperator w ostatniej wersji wygenerował 67 W mocy elektrycznej, przy maksymalnej, możliwej do uzyskania w danych warunkach, różnicy wartości temperatury, wynoszącej 140 °C. Stosunkowo niewielka wygenerowana moc w porównaniu z założeniami, po przeprowadzeniu badań laboratoryjnych pojedynczych termooogniw, jest związana z ograniczeniami, wynikającymi z wysokiej temperatury w układzie chłodzenia (ponad 100 °C),



Rys.11. Wykres parametrów V wariantu termogeneratora [10]



Rys.12. Wykres działania systemu sterowania zasilaniem [10]

uniemożliwiającej osiągnięcie większej różnicy wartości temperatury. Ponadto utrudnieniem jest nierównomierny rozkład temperatury na powierzchniach kolektora – im dalej od wlotu spalin, tym niższa temperatura powierzchni zewnętrznej.

Ściśle określony zakres napięcia elektrycznego, przy którym mogą pracować urządzenia podłączone do systemu sterowania (w tym m.in. akumulator), powoduje, że wykorzystanie energii elektrycznej uzyskanej z termogeneratora wymaga odpowiedniego „dopasowania”. Ponadto, z uwagi na nierównomierne ogrzanie powierzchni termogeneratora (związane z ochładzaniem spalin na długości rdzenia) poszczególne wiersze termoogniw osiągają różną wydajność. W przypadku równoległego połączenia poszczególnych wierszy termoogniw, uzyskiwana z nich moc jest uśredniana, tzn. wydajniejsze termoogniwa „pracują” na te mniej wydajne. Z tego powodu zastosowano opisane wcześniej kontrolery ładowania z funkcją poszukiwania maksymalnego punktu pracy (MPPT).

Na rysunku 12 zaprezentowano parametry rekuperatora przy połączeniu 2:1, czyli dwa szeregowo połączone wiersze termoogniw do osobnego kontrolera MMPT. Rozgrzewanie generatora skutkuje wzrostem natężenia prądu. Wartość uzyskanej mocy wystarcza na pokrycie zapotrzebowania systemu oraz na doładowanie akumulatora (ładowanie zaznaczono ujemną wartością natężenia prądu akumulatora). Po osiągnięciu maksymalnej wydajności kontroler poszukuje maksymalnego punktu mocy, zmieniając rezystancję, co przy stałym napięciu ma odzwierciedlenie w wartości natężenia prądu termogeneratora (wahania).

W trakcie próby wprowadzono chwilowe zakłócenie, w postaci dodatkowego odbiornika energii elektrycznej. Spowodowało to wzrost sumarycznej wartości natężenia prądu odbiorników do wartości, przekraczającej moc uzyskiwaną z termogeneratora i, jednocześnie, spadek wartości natężenia prądu ładowania akumulatora, a następnie pobór energii z akumulatora. Po odłączeniu dodatkowego odbiornika

(pozostał tylko sam system sterowania), parametry powracały do poprzednich wartości. Pod koniec badania, stopniowo podłączano kolejne odbiorniki. Wyłączenie silnika spalinowego ma odzwierciedlenie w płynnym spadku natężenia prądu termogeneratora oraz skutkuje wzrostem natężenia prądu akumulatora, który pokrywa zapotrzebowanie odbiorników na energię elektryczną.

W trakcie badania zarejestrowano maksymalne parametry systemu sterowania energią elektryczną, które zostały przedstawione w tabeli 2. Uwzględniając wyniki badań generatora termoelektrycznego oraz wyniki badań laboratoryjnych układu MPPT, wyznaczono przyrost energii termogeneratora przy zastosowaniu kontrolera z algorytmem poszukiwania maksymalnego punktu mocy. Wzrost wydajności o ponad 16% związany jest z maksymalnym wykorzystaniem mocy z każdej z 7 grup termoogniw przez kontrolery MPPT i zsumowaniem energii dostosowanej do parametrów układu sterowania.

Badania systemu sterowania zasilaniem elektrycznym z wykorzystaniem układu rekuperacji odpadowej energii cieplnej wykazały jego prawidłowe działanie, zarówno w przypadku normalnej pracy, jak i stanów awaryjnych. System może być zainstalowany na dowolnej maszynie z silnikiem spalinowym, w której istnieje możliwość zastosowania układu chłodzenia, zapewniającego odpowiednią różnicę wartości temperatury, niezbędnej do działania generatora termoelektrycznego.

7. Podsumowanie

W niniejszym artykule przedstawiono zagadnienia związane z projektowaniem, budową i przeprowadzaniem badań innowacyjnego systemu sterowania zasilaniem elektrycznym pojazdu z zaimplementowanym układem rekuperacji energii cieplnej.

W początkowych etapach badań utworzono kilka koncepcji rekuperatora. Na podstawie analizy cech poszczególnych rozwiązań wytypowano najkorzystniejsze z nich, a następnie utworzono model 3D, który był podstawą dalszych prac.

Zestawienie parametrów systemu sterowania energią elektryczną [10]

Tabela 2

Parametr	Wartość
Napięcie systemu	26,2 V
Natężenie prądu generatora termoelektrycznego (MPPT)	2,98 A
Moc generatora termoelektrycznego (MPPT)	78,1 W
Średnie natężenie prądu pojedynczego wiersza (MPPT)	0,213 A
Średnia moc pojedynczego wiersza (MPPT)	5,58 W
Moc generatora termoelektrycznego (bez MPPT)	67 W
Sprawność MPPT (przy rezystancji 8-10 Ω i napięciu ok 26 V)	92%
Wzrost wydajności	16,5%

W wyniku prowadzonych prac rozszerzono możliwości badawcze stanowiska do testowania napędów spalinowych, znajdującego się w hali badawczej Instytutu Techniki Górniczej KOMAG. Przeprowadzenie odpowiednich modyfikacji umożliwiło zabudowanie generatora termoelektrycznego w układzie wylotowym silnika spalinowego.

Badania rekuperatora miały na celu określenie jego maksymalnej wydajności w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Przeprowadzono łącznie siedem serii pomiarowych z zastosowaniem pięciu wariantów rekuperatora. Ostateczna wersja rekuperatora umożliwiła uzyskanie 67 W mocy elektrycznej, przy zastosowaniu jednego typu modułów termoelektrycznych, zabudowanych bezpośrednio na powierzchni kolektora spalin.

Wykorzystanie energii elektrycznej uzyskanej z termogeneratora wymaga odpowiedniego jej kondycjonowania do wymagań układu sterowania oraz do ładowania akumulatora. Zaprojektowano i zbudowano kontroler napięcia, z algorytmem poszukiwania maksymalnego punktu mocy źródła, na bazie układu SPV1020. Przedstawiono stanowisko laboratoryjne oraz przebieg i wyniki badań laboratoryjnych zbudowanego kontrolera MPPT. Badania laboratoryjne umożliwiły wyznaczenie zbioru wielkości, pozwalających określić takie parametry, jak sprawność kontrolera oraz spodziewany wzrost wydajności przy jego zastosowaniu.

Wszystkie działania zmierzały do utworzenia doświadczalnego systemu sterowania energią elektryczną, wykorzystującego energię odzyskaną z termogeneratora. System sterowania utworzono na bazie sterownika PLC, w którym zaimplementowano opracowany algorytm sterowania. Zaprezentowano strukturę systemu sterowania, w którym ważnym elementem, łączącym generator termoelektryczny z układem zasilania 24 V, są kontrolery MPPT. System, wraz z generatorem termoelektrycznym, został poddany badaniom na stanowisku do badania parametrów silnika spalinowego. Podczas badań przetestowano kilka wariantów podłączenia termoogniw do systemu sterowania. Najkorzystniejsze wyniki uzyskano przy połączeniu 2:1 (dwa wiersze termoogniw do osobnego kontrolera MPPT). Uwzględnienie wyników badań laboratoryjnych oraz badań termogeneratora umożliwiło wyznaczenie wpływu zastosowania układu z algorytmem MPPT na wydajność termoogniw. Zastosowanie tego typu układów zwiększyło wydajność o ponad 16%. Testowano również poprawność działania systemu sterowania i sposób reakcji systemu na wymuszenia, takie jak załączenie odbiorników energii elektrycznej, załączanie i rozgrzewanie silnika. System prawidłowo sygnalizował wystąpienia stanów awaryjnych.

Wizualizacja przepływu energii elektrycznej, z uwzględnieniem stopnia naładowania akumulatora, wyznaczanego szacunkowo według ilości pobranej energii elektrycznej, ułatwi operatorowi kontrolę nad systemem.

Przeprowadzono badania ostatecznej wersji systemu sterowania wraz z generatorem termoelektrycznym, w warunkach zbliżonych do rzeczywistych – na stanowisku do badania silników spalinowych. Wdrożenie systemu wymaga dalszych badań oraz prac projektowych, zmierzających do implementacji prototypu w rzeczywistej maszynie.

Badania na podstawie których został opracowany niniejszy artykuł, były finansowane ze środków Narodowego Centrum Nauki, w ramach projektu badawczego promotorskiego nr N N502 714940 pt. Sterowanie zasilaniem elektrycznym maszyny górniczej z zastosowaniem układu rekuperacji energii.

Literatura

1. Dobrzaniecki P. i in.: Doskonalenie napędów spalinowych w aspekcie podnoszenia bezpieczeństwa i niezawodności. Uruchomienie i badania stanowiska do badań napędów spalinowych. ITG KOMAG Gliwice 2011 (materiały nie publikowane).
2. Faranda R., Leva S.: Energy Comparison of MPPT Techniques for PV Systems. WSEAS Transactions on Power Systems, Issue 6, Volume 3, June 2008.
3. Grzesiak W., Radziemska E.: Technika MPPT sposobem maksymalizacji wykorzystania energii elektrycznej generowanej przez moduły fotowoltaiczne. Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania, vol. 51, nr 5 (2010), 42-49.
4. Jiang J.A., Huang T.L., Hsiao Y.T., Chen C.H.: Maximum Power Tracking for Photovoltaic Power Systems. Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 8, No 2, p.147-153, 2005.
5. Koczwarą J., Wieczorek K.: Bezpieczeństwo operatorów samojezdnych maszyn górniczych na tle bezpieczeństwa w kopalniach KGHM Polska Miedź S.A., Materiały I Międzynarodowego Kongresu Górnictwa Rud Miedzi, Lubin 2009.
6. Lozbin V., Wójcik W., Bylicki P., Zyska T.: Zastosowanie efektu Peltiera do diagnostyki termoelementów. Politechnika Lubelska, Lublin 2011.
7. Nota aplikacyjna SPV1020.
8. Poprawski R., Misiewicz J.: Zjawiska termoelektryczne – wstęp. Instytut Fizyki Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001.
9. Woszczyński M.: Badania doświadczalne i weryfikacja parametrów termogeneratorów półprzewodnikowych do budowy układu rekuperacji energii

cieplnej. W: Innowacyjne techniki i technologie dla górnictwa. Bezpieczeństwo - Efektywność – Niezawodność. KOMTECH 2011, ITG KOMAG, Gliwice 2011, s. 127-138.

10. Woszczyński M.: Sterowanie zasilaniem maszyny górniczej z zastosowaniem układu rekuperacji energii. Praca doktorska. Politechnika Śląska, 2013.

Artykuł wpłynął do redakcji w listopadzie 2013 r.