

Jakub PARTYKA  
Andrzej WÓJTOWICZ  
Piotr ZAPRAWA  
Leszek WOLSKI

## SYSTEM ROZRUCHU SILNIKÓW SPALINOWYCH Z WYKORZYSTANIEM SUPERKONDENSATORÓW

**STRESZCZENIE** *Artykuł przedstawia system rozruchu silników spalinowych, pozwalający na zmniejszenie kosztów eksploatacji pojazdów ciężarowych oraz znacznie ułatwiający ich rozruch. Rozwiązanie to może być szczególnie przydatne w warunkach zimowych, w których temperatura silnika pojazdu podczas postoju może spaść do poziomu  $-30^{\circ}\text{C}$ . W artykule zaprezentowano ogólną zasadę działania systemu, jego strukturę, elementy wchodzące w jego skład, a także wyniki przeprowadzonych testów.*

**Słowa kluczowe:** *rozruch, superkondensator, silnik spalinowy, akumulator*

### 1. WSTĘP

---

System rozruchu silników spalinowych opracowany został w celu ułatwienia rozruchu silników benzynowych oraz wysokoprężnych poprzez impulsowe podłączenie dodatkowego źródła mocy do instalacji elektrycznej pojazdu. Ułatwia to rozruch oraz umożliwia znaczne zwiększenie żywotności akumulatora. Ogólny schemat systemu przedstawiono na rysunku 1. Głównymi elementami wchodzącymi w skład systemu są: bateria akumulatorów, moduł energoelektroniczny, superkondensator, sterownik mikroprocesorowy oraz klucz tyrystorowy.

W chwili rozpoczęcia pracy sterownika sprawdza on stan instalacji elektrycznej pojazdu, po czym rozpoczyna proces ładowania superkondensatorów. W trakcie łado-

---

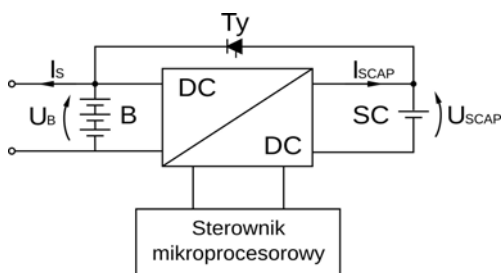
**mgr inż. Jakub PARTYKA, mgr inż. Andrzej WÓJTOWICZ**  
e-mail: jakub.partyka@iel.gda.pl; andrzej.wojtowicz@iel.gda.pl  
**mgr inż. Piotr ZAPRAWA, mgr inż. Leszek WOLSKI**  
e-mail: piotr.zaprawa@iel.gda.pl; leszek.wolski@iel.gda.pl

Pracowania Energoelektroniki i Sterowania  
Instytut Elektrotechniki

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 262, 2013

wania niezbędne jest wykonywanie pomiarów wartości wielkości wyjściowych (prąd ładowania „ $I_{SCAP}$ ” oraz poziom naładowania superkondensatorów „ $U_{SCAP}$ ”) oraz wejściowych „ $U_B$ ” i „ $I_S$ ”.

Pomiar prądu ładowania pozwala na utrzymywanie jego wartości na zadanym poziomie, natomiast pomiar poziomu naładowania superkondensatorów pozwala na

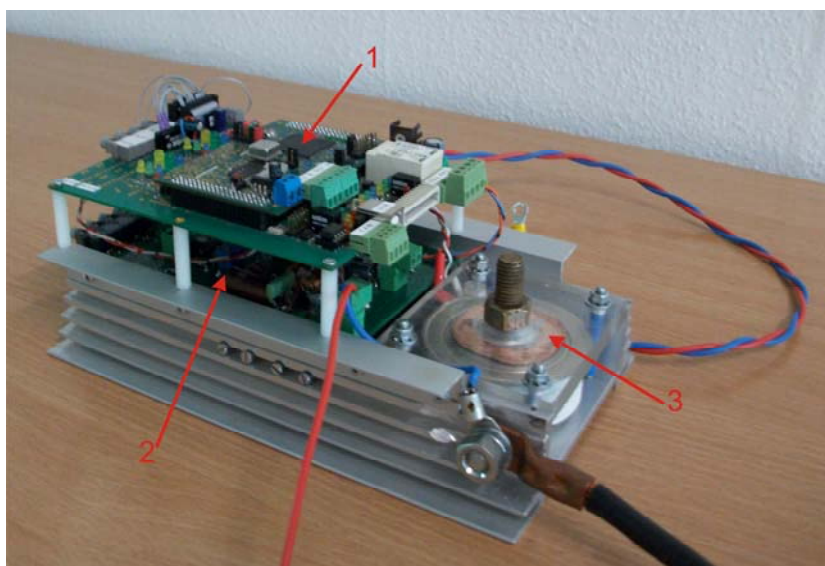


**Rys. 1. Schemat ogólny systemu rozruchu silników spalinowych**

określenie, czy możliwe jest przeprowadzenie rozruchu silnika. Jeżeli poziom ten nie jest wystarczający, konieczne jest doładowanie superkondensatorów. W procesie ładowania wykorzystywany jest również pomiar wartości napięcia na baterii akumulatorów „ $U_B$ ”. Od poziomu tego napięcia uzależniona jest wartość maksymalnego prądu ładowania superkondensatora. Przykładowo, gdy napięcie „ $U_B$ ” jest mniejsze niż 13,5 V, maksymalny prąd ładowania wynosi

6 A (wartość szczytowa), a w wypadku, gdy napięcie „ $U_B$ ” jest większe niż 13,5 V, maksymalny prąd ładowania superkondensatora wynosi 12 A.

W systemie mierzony jest jeszcze prąd „ $I_S$ ” pobierany przez urządzenia znajdujące się w pojeździe. Jego wartość pozwala na określenie momentu rozpoczęcia rozruchu silnika przez załączenie tyristora i oddanie energii nagromadzonej w superkondensatorze do rozrusznika. Na rysunku 2 przedstawiono prototyp urządzenia służącego do ograniczania prądu rozruchowego pobieranego z akumulatora podczas rozruchu silnika spalinowego.



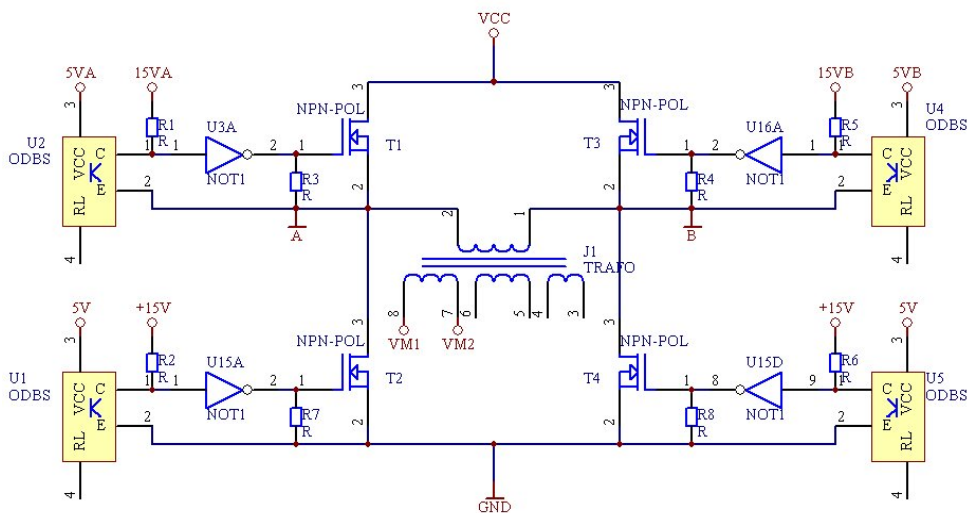
**Rys. 2. System rozruchu silników spalinowych: 1 – sterownik mikroprocesorowy; 2 – moduł energoelektroniczny; 3 – klucz tyristorowy**

## 2. MODUŁ ENERGEOELEKTRONICZNY

Moduł energoelektroniczny składa się z tyrystora oraz przetwornicy pełnomostkowej (rys. 3). Podczas kalibracji układu do pracy z akumulatorem 12 V przetwornica pracuje przy napięciu wejściowym w zakresie od 8 do 14,5 V. Maksymalne napięcie wyjściowe modułu dla instalacji 12 V wynosi 17 V. Wynika to z odpowiednio dobranej przekładni transformatora oraz względów bezpieczeństwa, aby nie przeładować baterii superkondensatorów powyżej znamionowej wartości napięcia.

Moduł energoelektroniczny realizuje dwa główne zadania. Pierwszym z nich jest ładowanie superkondensatora, a drugim jest umożliwienie przekazania zgromadzonej w nim energii do instalacji pojazdu za pomocą łącznika półprzewodnikowego (tyrystora).

Moduł zaprojektowano tak, aby możliwe było jego wykorzystanie w pojazdach wyposażonych w instalację 12 lub 24 V. Ze względów bezpieczeństwa układu, zakres napięcia zasilania ustalono w przedziale od 8 do 67 V. Aby zapewnić pełną kompatybilność z pojazdami samochodowymi, w module zastosowano rozwiązania, pozwalające na montaż modułu bezpośrednio w pojeździe, bez potrzeby zmian w instalacji pojazdu.



Rys. 3. Schemat przetwornicy napięcia

Sterowanie przetwornicą odbywa się poprzez łącza światłowodowe, które dodatkowo pełnią rolę izolacji galwanicznej sterownika mikroprocesorowego od przetwornicy. Pozwala to na zabezpieczenie sterownika mikroprocesorowego w przypadku uszkodzenia modułu energoelektronicznego.

### 3. STEROWNIK MIKROPROCESOROWY

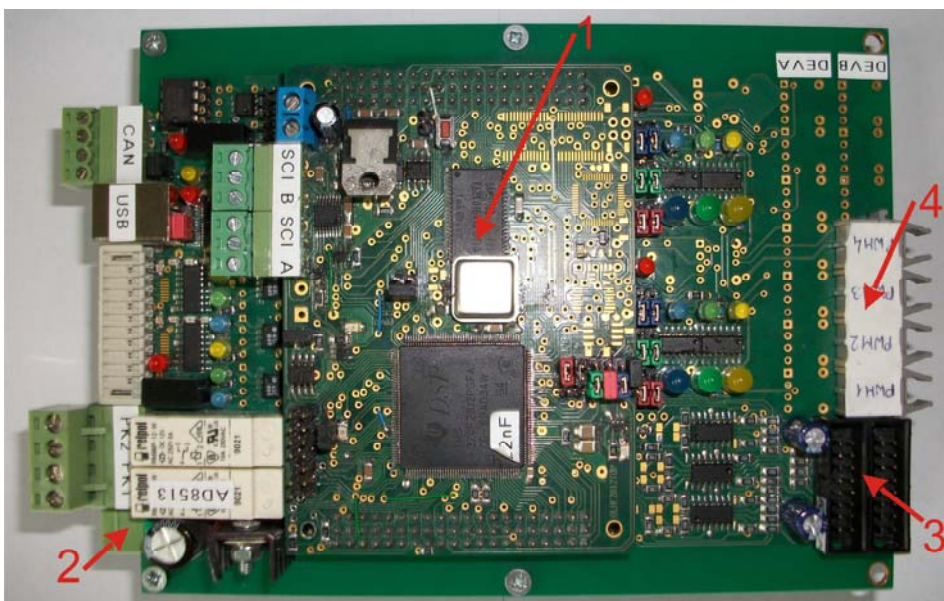
Sterownik przetwornicy przedstawiono na rysunku 4. Wyposażono go w dwa podstawowe układy: analogowy i cyfrowy. Analogowy układ pomiarowy pełni rolę wejść sterownika. Układ cyfrowy natomiast jest układem wyjściowym sterownika. Sterownik wyposażono w oprogramowanie, które na podstawie pomiarów z wejść w odpowiedni sposób steruje kluczami opracowanej na potrzeby systemu przetwornicy energoelektronicznej.

Sterownik zasilany jest napięciem 12 VDC lub 9 VAC 2 A (część cyfrowa) oraz  $\pm 15$  V DC  $\pm 1$  A (część analogowa). Zastosowano w nim procesor sygnałowy TMS320F2812. Komunikacja z użytkownikiem odbywa się za pomocą dwóch bloków diod sygnalizacyjnych, po sześć diod.

Diody te informują m.in. o:

- zakończeniu procesu ładowania i możliwości przeprowadzenia rozruchu;
- zatrzymaniu sterownika na skutek programowego zabezpieczenia;
- stanie działania sterownika (włączony/wyłączony);
- wystaniu impulsu załączającego tyrystor.

Poza tymi podstawowymi informacjami dla użytkownika diody te reprezentują również stopień wypełnienia PWM, pozwalając określić stan pracy przetwornicy.

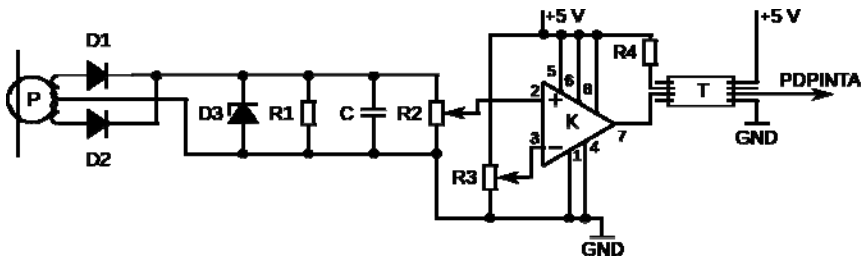


**Rys. 4. Sterownik mikroprocesorowy:**

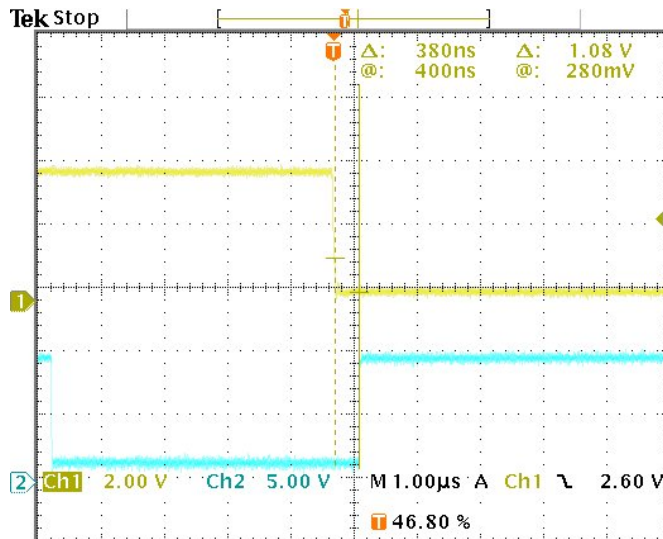
1 – moduł z mikroprocesorem; 2 – zasilanie; 3 – wejścia; 4 – wyjścia

## 4. ZABEZPIECZENIE IMPULSOWO-NADPRĄDOWE

Aby zapewnić możliwie wysoki stopień bezpieczeństwa systemu, wyposażono go w zabezpieczenie impulsowo-nadprądowe, którego schemat przedstawiono na rysunku 5. Głównymi elementami zabezpieczenia są: przekładnik prądowy – P, komparator – K, transoptor – T. Rolą zabezpieczenia jest dbanie o to, by nie dopuścić do uszkodzenia energo-elektronicznego układu ładowania poprzez zbyt wysokie wartości prądu płynącego przez tranzystory.



Rys. 5. Schemat zabezpieczenia impulsowo-nadprądowego



Rys. 6. Czas zadziałania zabezpieczenia:

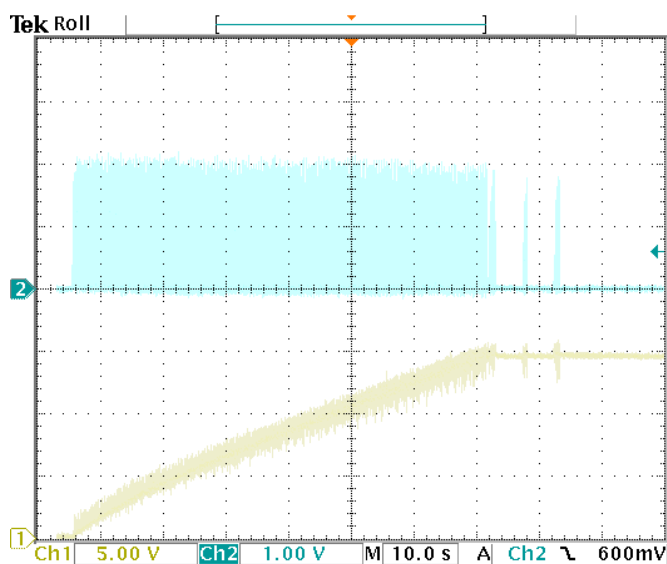
Ch1 – sygnał wyjściowy z zabezpieczenia; Ch2 – sygnał PWM

Zadaniem komparatora jest kontrola różnicy napięć między wejściem odniesienia a pomiarowym. Napięcia te uzyskiwane są z przekładnika prądowego oraz zewnętrznego zasilacza, a ich poziomy reguluje się rezystorem R1 oraz potencjometrami R2 i R3. W momencie, gdy napięcie pomiarowe jest większe niż napięcie odniesienia, następuje zmiana stanu komparatora, a w konsekwencji wysłanie sygnału przerwania o wy-

sokim priorytecie do sterownika. Obsługa tego sygnału została zrealizowana tak, aby czas zadziałania zabezpieczenia był możliwie krótki. Czas między wygenerowaniem impulsu a wyłączeniem urządzenia zawiera się w przedziale od 360 do 400 ns (rys. 6).

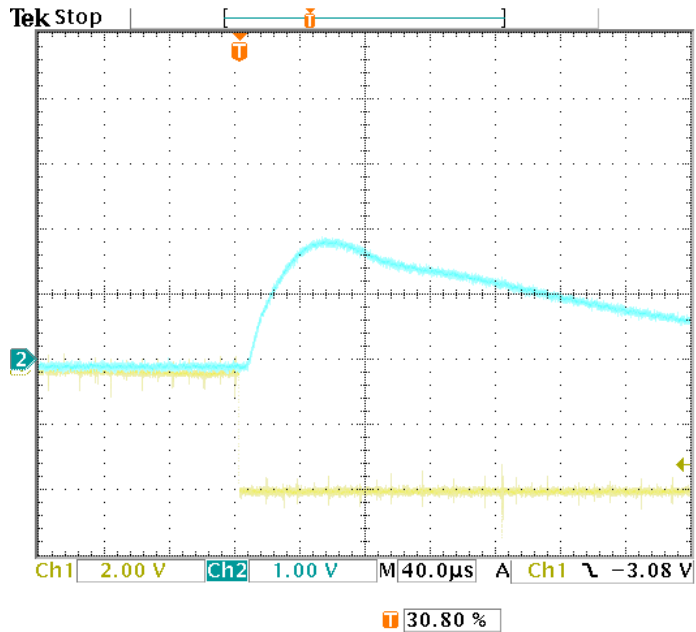
## 5. FUNKCJONOWANIE SYSTEMU

Po włączeniu zasilania sterownika oraz po sprawdzeniu parametrów układu zasilania, system rozpocznie procedurę ładowania superkondensatorów. Istotnym warunkiem w procesie ładowania jest utrzymywanie prądu ładowania na zadanym poziomie. Poziom ograniczenia prądowego jest zależny od mierzonego na akumulatorze napięcia progowego. Do procedury sterującej wprowadzono zabezpieczenia na wypadek uszkodzenia części analogowej sterownika lub samych przetworników pomiarowych. Po zakończeniu procedury ładowania (rys. 7) sterownik przejdzie do procedury zatrzymania przetwornicy.

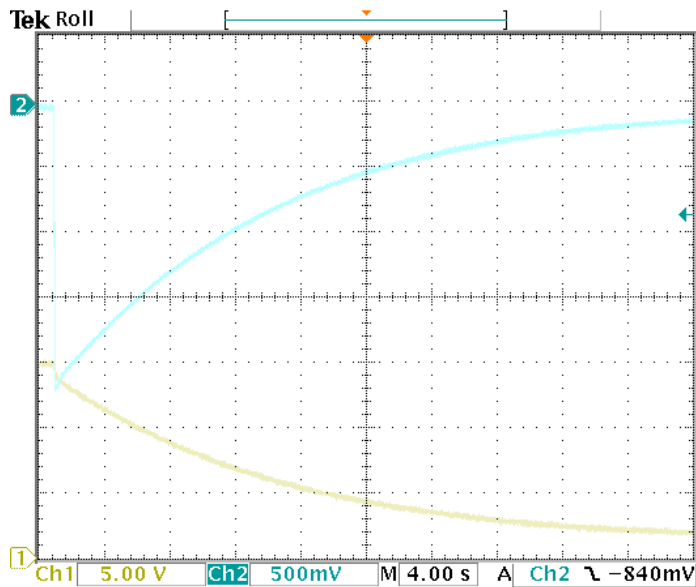


**Rys. 7. Ładowanie superkondensatora od 0 V do wartości zadanej (15 V): Ch1 – napięcie na superkondensatorze; Ch2 – prąd ładowania (20 A w pik)**

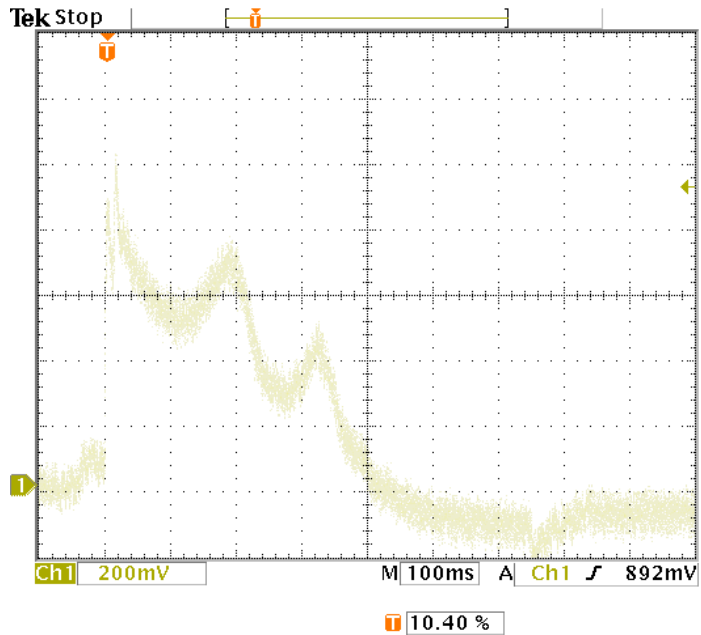
Zatrzymanie przetwornicy polega na tym, że wartość wypełnienia impulsów PWM jest stopniowo zmniejszana, aż do osiągnięcia zera. Po naładowaniu baterii superkondensatorów zmienia się tryb pracy na oczekiwanie na zwiększony pobór prądu w pojeździe (identyfikujący rozruch) lub też spadek napięcia na superkondensatorach do poziomu uniemożliwiającego załączenie tyrystora. Po załączeniu tyrystora następuje przekazanie energii nagromadzonej w superkondensatorach do instalacji elektrycznej pojazdu. Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono przebieg załączenia tyrystora oraz przykład rozładowania superkondensatora.



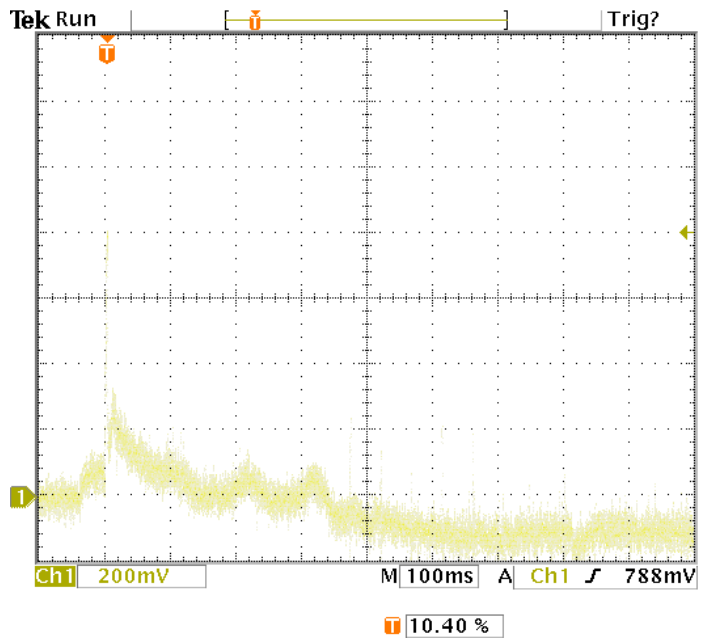
**Rys. 8. Załączenie tyrystora:** Ch1 – sygnał załączający tyrystor; Ch2 – prąd płynący przez tyrystor. Czas pomiędzy podaniem sygnału załączającego a załączeniem tyrystora wynosi około 10  $\mu$ s



**Rys. 9. Proces rozładowania superkondensatora po załączeniu tyrystora:** Ch1 – napięcie na superkondensatorze; Ch2 – prąd pobierany z superkondensatora



Rys. 10. Prąd akumulatora przy rozruchu bez superkondensatora przy 15°C (silnik benzynowy)



Rys. 11. Prąd akumulatora przy rozruchu z zastosowaniem superkondensatora przy 15°C (silnik benzynowy)



Aby zobrazować zasadę działania systemu, na rysunkach 10 i 11 przedstawiono przebiegi prądów rozruchowych. Rysunek 10 przedstawia prąd płynący podczas normalnego rozruchu silnika spalinowego. Wartość tego prądu dochodzi do 500 A. Pomiaru dokonano z wykorzystaniem przetwornika typu LEM włączonego na przewód dodatni przy akumulatorze. W podobny sposób wykonano pomiar zaprezentowany na rysunku 11. Można tu zaobserwować znaczne obniżenie wartości prądu rozruchowego pobieranego z akumulatora. Spowodowane jest to działaniem systemu, który umożliwia pobór pozostałego prądu koniecznego do przeprowadzenia rozruchu z naładowanej baterii superkondensatorów. Wartość prądu pobieranego z akumulatora spada do 150 A, co oznacza, że system ograniczył wartość prądu pobieranego z akumulatora do 30% jego wartości początkowej. Uzyskane wyniki eksperymentalne potwierdzają słuszność założeń i zasadność stosowania systemu rozruchowego.

## 6. PODSUMOWANIE

---

Podczas rozruchu silnika spalinowego powstaje bardzo duży spadek napięcia w instalacji pojazdu. Spadek ten związany jest bezpośrednio z gwałtownym wzrostem poboru prądu z akumulatora poprzez załączenie dużego obciążenia, jakim jest rozrusznik. Jak wiadomo, akumulatory są urządzeniami o specyficznych wymaganiach energetycznych. Poddawanie ich dużym chwilowym obciążeniom prowadzi do zmniejszenia ich trwałości, jak również ma zły wpływ na inne urządzenia pracujące w pojeździe. Akumulatory w pojazdach dobiera się zawsze do najmniej korzystnych warunków, mogących wystąpić podczas eksploatacji pojazdu, przez co ich wymiary, masa i cena są stosunkowo wysokie.

Opracowany system pozwolił na znaczne obniżenie wartości prądu rozruchowego pobieranego z akumulatora, co przekłada się na zwiększenie żywotności akumulatora i umożliwia zastosowanie w pojeździe akumulatora o niższych parametrach pracy, a co za tym idzie, niższej masie, wymiarach i cenie.

Użycie superkondensatorów w celu ułatwienia rozruchu jest uzasadnione, biorąc pod uwagę ich cechy charakterystyczne. Do najważniejszych z nich należą:

- bardzo duża pojemność elektryczna – kilka rzędów większa niż „klasycznych” kondensatorów, dzięki czemu można je stosować w energetyce do magazynowania energii;
- krótki czas ładowania i rozładowywania – wielokrotnie krótszy niż ogniwo i akumulatorów;
- wysoka żywotność urządzenia – duża liczba cykli ładowania i rozładowywania; wielokrotnie wyższa niż akumulatorów.

Opracowane rozwiązanie można zastosować w bardzo wielu rodzajach pojazdów, np. lokomotywy, ciężki sprzęt wojskowy. System idealnie nadaje się do pracy w ciężkich warunkach zimowych, w których przeprowadzenie rozruchu zimnego silnika spalinowego jest trudne do realizacji. Nie wyklucza to jednak użytkowania systemu w okresie letnim; wręcz przeciwnie, używanie systemu zalecane jest przez cały rok.

## LITERATURA

1. Wójtowicz A., Wolski L., Partyka J., Zaprawa P.: System sterowania układem rozruchu silników samochodów ciężarowych z wykorzystaniem superkondensatorów. Opracowanie nr OG/873/DN-183/2010, 2010.
2. Dokumentacja mikroprocesora – spru174o „Digital Signal Processors – Data Manual” www.ti.com.
3. Dokumentacja mikroprocesora – spru060d „Analog to Digital Converter Reference guide” www.ti.com.
4. Dokumentacja mikroprocesora – spru078e „System Control and Interrupts Reference guide” www.ti.com.
5. Ziętkiewicz Z.: Akumulatory samochodowe i motocyklowe, WKŁ, Warszawa, 1983.
6. Czerwiński A.: Akumulatory, baterie, ogniwa, WKŁ, Warszawa, 2005.
7. Conway B.E.: Electrochemical supercapacitors. Scientific Fundamentals and Technological Applications, Plenum Publishers, New York, 1999.
8. Juda Z.: Współpraca baterii elektrochemicznych i superkondensatorów w pojazdach hybrydowych, Konmot-Autoprogres, Zakopane, 2004.
9. Niewiarowski K.: Tłokowe silniki spalinowe, WKŁ, Warszawa, 1996.
10. Żółtowski B., Jankowski M., Tyszczyk K.: Badania silników spalinowych, Wydawnictwo Uczelniane AT-R, Bydgoszcz, 1996.
11. Ocioszyński J.: Elektrotechnika i elektronika pojazdów samochodowych, WSiP, Warszawa, 2009.

*Rękopis dostarczono dnia 12.03.2013 r.*

### START-UP SUPPORT SYSTEM FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINES BASED ON SUPERCAPACITORS

Jakub PARTYKA, Andrzej WÓJTOWICZ  
Piotr ZAPRAWA, Leszek WOLSKI

**ABSTRACT** *The paper presents a system for internal combustion engines start, allowing for reduction of the battery operating costs in trucks and significantly facilitating the start of engines. The presented solution is especially usable in winter weather conditions when the temperature of the engine in the vehicle can drop to the level of -30°C. The article presents a general principle of the system, its structure, components and the results of testing.*

**Keywords:** *start-up, supercapacitor, combustion engine, accumulator*



**Mgr inż. Jakub PARTYKA** studia ukończył na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. W 2008 roku został zatrudniony w Gdańskim Oddziale Instytutu Elektrotechniki w pracowni Energoelektroniki i Sterowania. W 2012 roku rozpoczął pracę na stanowisku asystenta. Swoje zainteresowania kieruje w stronę informatyki, programowania mikroprocesorów oraz tworzenia aplikacji dla komputerów stacjonarnych.

**Mgr inż. Andrzej WÓJTOWICZ** studia ukończył na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. W Gdańskim Oddziale Instytutu zatrudniony jest od 1994 roku w zespole Energoelektroniki i Sterowania. Swoje zainteresowania skupia na problematyce budowy przemienników częstotliwości. Jest autorem i współautorem wielu wdrożeń zrealizowanych w IEL.



**Mgr inż. Piotr ZAPRAWA** – urodzony w 1975 roku, ukończył Wydział Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej o specjalności Napęd Elektryczny i Energoelektronika. Od 1999 roku pracuje w Oddziale Instytutu Elektrotechniki w Gdańsku na stanowisku asystenta w Pracowni Napędów i Sterowania. Tomografią zajmuje się od 2005 roku. Jego prace zostały nagrodzone m.in. brązowym medalem na wystawie w Genewie.

**Mgr inż. Leszek WOLSKI** studia wyższe ukończył w 1996 roku na kierunku Przetwarzanie i Użytkowanie Energii Elektrycznej Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Od 1995 roku pracuje w gdańskim Oddziale Instytutu Elektrotechniki. Obecnie zajmuje się projektowaniem i oprogramowaniem układów mikroprocesorowych oraz procesorów sygnałowych, bezprzewodowymi i przewodowymi technikami komunikacyjnymi, technologiami wykorzystującymi alternatywne źródła energii oraz sterowaniem wielopoziomowych przekształtników energii.



