

NEW CONCEPT OF THE AUTOMOTIVE ONBOARD-GENERATOR/STARTER-MOTOR SYSTEM

Józef Tutaj

*Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki
Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych
31-155 Kraków
ul. Warszawska 24
tel./fax: +48 12 6283323
e-mail: pmtutaj@cyf-kr.edu.pl*

Abstract

In the paper is given a review of some selected modern solutions of the automotive onboard-generator/starter motor system as well as a new concept of this system based on an application of the brushless AC-DC/DC-AC electronic-commutator electromagnetically-excited electrical machine with the rotary transformer and transistor rectifier.

NOWE ROZWIĄZANIE SAMOCHODOWEGO PRĄDNIKO – ROZRUSZNIKA

Streszczenie

W artykule przedstawiono przegląd kilku wybranych, współczesnych rozwiązań systemu prądnica - rozrusznik oraz koncepcję nowego rozwiązania tego systemu w oparciu o zastosowanie bezszczotkowej, komutatorowej maszyny elektrycznej prądu stałego ze wzbudzeniem elektromagnetycznym oraz transformatorem wirującym i prostownikiem tranzystorowym.

1. Wstęp

W ostatnich latach zauważyć można podejmowanie licznych prac naukowo-badawczych mających na celu opracowanie zintegrowanego systemu zasilania i rozruchu dla współczesnego pojazdu samochodowego, co umożliwiłoby wyeliminowanie w nim dotychczas stosowanych szczotkowych, komutatorowych maszyn elektrycznych prądu stałego: rozrusznika elektromechanicznego i samochodowej prądnicy prądu stałego. Ma to istotny wpływ nie tylko na trwałość i niezawodność, lecz także na większe możliwości techniczne dotychczasowych rozwiązań samochodowego systemu rozruchu silnika spalinowego i pokładowego systemu zasilania.

Obecnie dominuje tendencja do eliminacji wszelkich układów wykonawczych automatyki hydraulicznej i zastępowaniu ich przez aktulatory elektromechaniczne (elektromechaniczne siłowniki zaworów rozrządu, hamulce elektryczne, silniki elektryczne układu wspomagania kierownicy, elektromechaniczne wyzwalacze poduszek bezpieczeństwa, aktulatory systemu czterech kół kierowanych, elementy wykonawcze zawieszenia aktywnego, elektrycznie podnoszone szyby itp.), co powoduje ciągły wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną pokładowego systemu zasilania.

Koncepcja zastąpienia dwóch maszyn elektrycznych prądu stałego: prądnicy i rozrusznika jedną maszyną jest znana od dawna, jednak jeszcze do niedawna nie udało się praktycznie połączyć funkcji obu maszyn ze względu na inne wymagania stawiane obu maszynom przy pracy jako silnik elektryczny (uzyskanie dużego momentu rozruchowego) oraz jako prądnica

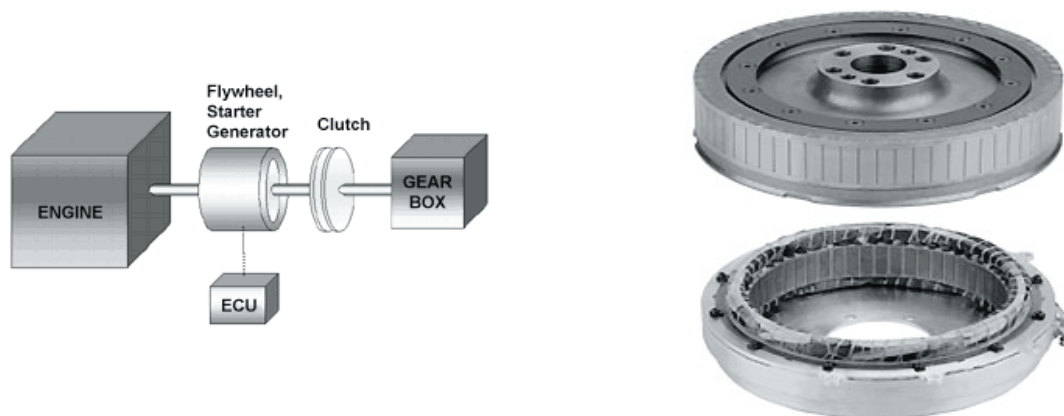
(oddawanie energii elektrycznej do pokładowej sieci prądu stałego, przy możliwie najmniejszej prędkości obrotowej silnika spalinowego). Dopiero w ostatnich latach znaczący postęp techniczny w dziedzinie energoelektroniki (wytwarzanie w wersji scalonej trójfazowych układów mostkowych, złożonych z szybkich diod mocy i zaworów elektrycznych w pełni sterowalnych – tranzystorów MOSFET, TOPFET, IGBT itp.) umożliwił zastąpienie dwóch komutatorowych maszyn elektrycznych prądu stałego jedną bezszczotkową maszyną elektryczną, pełniącą kilka funkcji: nie tylko rozrusznika elektromechanicznego i prądnicy mechanoelektrycznej lecz także koła zamachowego – 'trzy w jednym'. Istotne jest również wyeliminowanie paska napędu prądnicy oraz sprzęgła i zębniaka rozrusznika współpracującego z kołem zamachowym silnika, co znacznie zwiększa trwałość i niezawodność systemu.

2. Współczesne rozwiązania samochodowego prądnico-rozrusznika

Badania naukowe i pojawiające się prototypy samochodowych prądnico-rozruszników większości koncernów samochodowych skupiają się nad rozwiązaniem opartym na bezszczotkowej, komutatorowej maszynie elektrycznej prądu stałego ze wzbudzeniem magneto-elektrycznym (z magnesami trwałymi) i komutatorem elektronicznym.

2.1. Prądnico-rozrusznik koncernu SIEMENS

Siemens Automotive Corporation rozwinął technologię prądnico-rozrusznika, która ma dwa zastosowania. Obydwie propozycje zastąpić mają konwencjonalny rozrusznik i prądnicę prądu stałego z pojedynczym, wieloczynnościowym, sterowanym elektronicznie stojaniem i wirnikiem. Jednym z zastosowań tej konstrukcji prądnico-rozrusznika jest wykorzystanie dużego wirnika z magnesami trwałymi i stojana dla sterowania funkcji rozruchu i wyłączenia silnika spalinowego (rys. 1).



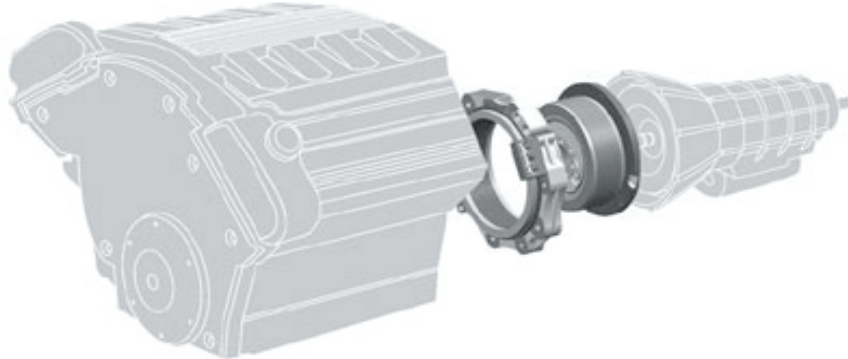
Rys. 1. Konfiguracja pracy oraz widok wirnika i stojana prądnico-rozrusznika koncernu Siemens Automotive Corporation [3]

Fig. 1. Running configuration and the view of the rotor and stator of the starter-generator system Siemens Automotive Corporation [3]

2.2. Prądnico-rozrusznik koncernu VALEO

Francuski koncern *Valeo* rozwija obecnie dwa systemy: StARS (*Starter/Alternator/Damper*) oraz ISA (*Integrated Starter/Alternator*) - przedstawiony na rysunku 2. Pierwszy z wymienionych systemów wykorzystuje konwencjonalną prądnicę prądu stałego

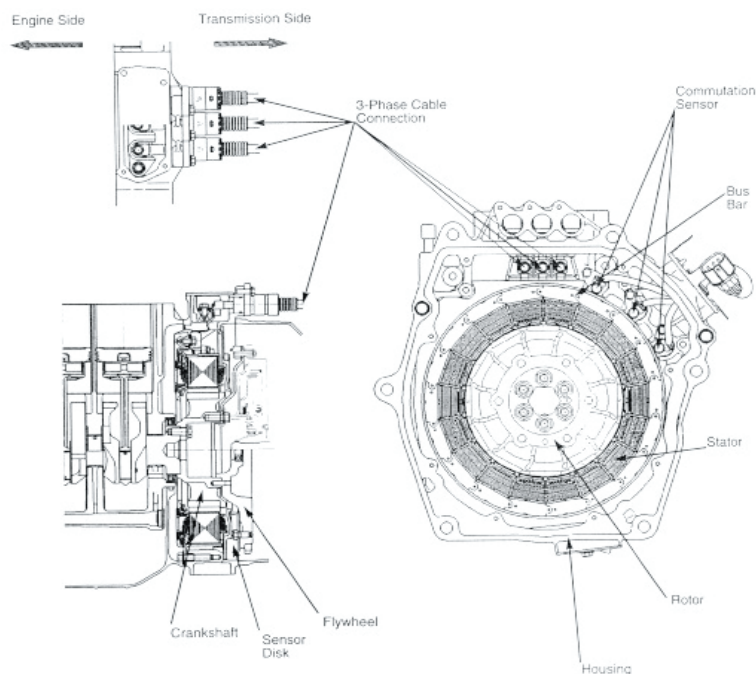
(zwaną potocznie alternatorem z prostownikiem), chłodzoną wodą, co pozwala uzyskać stosunkowo dużą moc: 4 kW/42 V. Drugi z wymienionych stanowi zintegrowany system prądnic-rozrusznika, instalowany pomiędzy silnik spalinowy a skrzynię biegów o mocy 15 kW/42V i jest w stanie odzyskać energię rekuperacji podczas hamowania.



Rys. 2. Prądnic-rozrusznik firmy Valeo [6]
Fig. 2. The Valeo starter-generator [6]

2.3. Prądnic-rozrusznik koncernu HONDA

Opracowany przez firmę *Honda* system prądnic - rozrusznik IMA (*Integrated Motor Assist*) zabudowany jest pomiędzy wałem korbowym 3-cylindrowego silnika spalinowego a skrzynią biegów (rys. 4). Podczas przyspieszania pojazdu, jest możliwa praca równoległa dwóch różnych układów napędowych, co pozwala na zmniejszenie mocy silnika spalinowego.

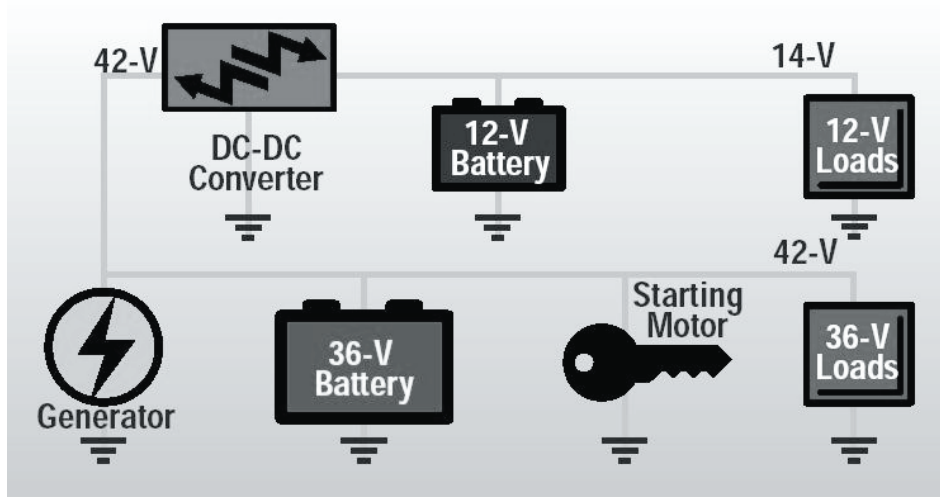


Rys. 4. Rozwiązanie konstrukcyjne prądnic-rozrusznika koncernu Honda [7]
Fig. 4. The constructional solution of Honda starter-generator [7]

W czasie hamowania możliwe jest odzyskiwanie energii i jej zwrot do baterii akumulatorów poprzez odpowiednie sterowanie modułem komutatora elektronicznego. Jest możliwe również tłumienie drgań układu napędowego poprzez odpowiednie sterowanie (zmianę momentu obciążenia silnika spalinowego przez prądnicę).

2.4. Inne rozwiązania prądnico-rozrusznika

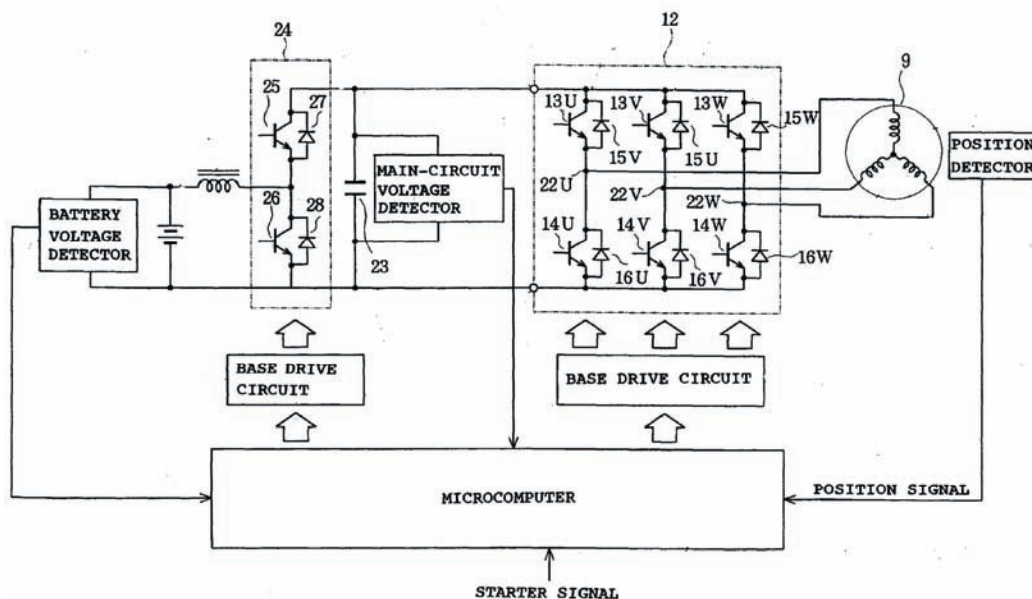
Podobne rozwiązania prądnico-rozrusznika o różniących się nazwach firmowych są w fazie prób i przygotowywania do produkcji seryjnej przez pozostałe koncerny: *Ford* (VISTEON) *Bosch* (ISG i RSG), *Continental* (ISAD). Uzwojenie twornika przystosowane jest do współpracy z pokładową instalacją zasilającą nowego standardu o napięciu 42 V, natomiast odbiorniki energii o napięciu 12 V zasilane są poprzez przekształtnik prądu stałego na prąd stały 42 V/14 V (*DC-DC converter*), jak pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Układ połączeń pokładowej instalacji zasilającej nowego standardu 42 V/14 V [1]
Fig. 5. The connection system of a new standard 42 V/14 V [1] supply installation

3. Układ sterowania prądnico-rozrusznika

Przykładowe rozwiązanie układu sterowania przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Schemat przykładowego rozwiązania układu sterowania maszyną elektryczną z magnesami trwałymi jako samochodowy prądnico-rozrusznik [2]
Fig. 6. Scheme of example solution of control system of electric machine with the durable magnets as a automotive starter-generator [2]

Podczas pracy silnikowej maszyna elektryczna ze wzbudzeniem magneto-elektrycznym zasilana jest z falownika (12), zrealizowanego na tranzystorach bipolarnych (lub MOSFET, IGBT itp.) wraz z diodami zwrotnymi. Prąd od baterii akumulatorów do falownika przepływa przez dławik oraz diodę (27). Regulacja prędkości obrotowej odbywa się poprzez przetwarzanie przez jednoukładowy mikrokomputer (mikrokontroler) sygnału sterującego od czujnika położenia wału wirnika maszyny elektrycznej i odpowiednie sterowanie tranzystorami komutatora elektronicznego. Praca silnikowa tej maszyny nie nastęca problemów technicznych i stanowi typowy przypadek stosowanych obecnie często tzw. napędów regulowanych (falownikowych).

Natomiast główny problem techniczny występuje podczas pracy prądnicowej tej maszyny. Ponieważ strumień magnetyczny wzbudnika jest stały (wzbudzenie maszyny pochodzi od magnesów trwałych wirnika), napięcie indukowane rotacji w uzwojeniu twornika maszyny na stojanie jest wprost proporcjonalne do prędkości obrotowej wału wirnika, co sprawia podstawową trudność współpracy tej prądnicy z baterią akumulatorów (napięcie na zaciskach baterii akumulatorów powinno być utrzymywane podczas pracy silnika spalinowego na określonym, stałym poziomie, niezależnie od zmian prędkości obrotowej i obciążenia prądowego odbiorników energii elektrycznej).

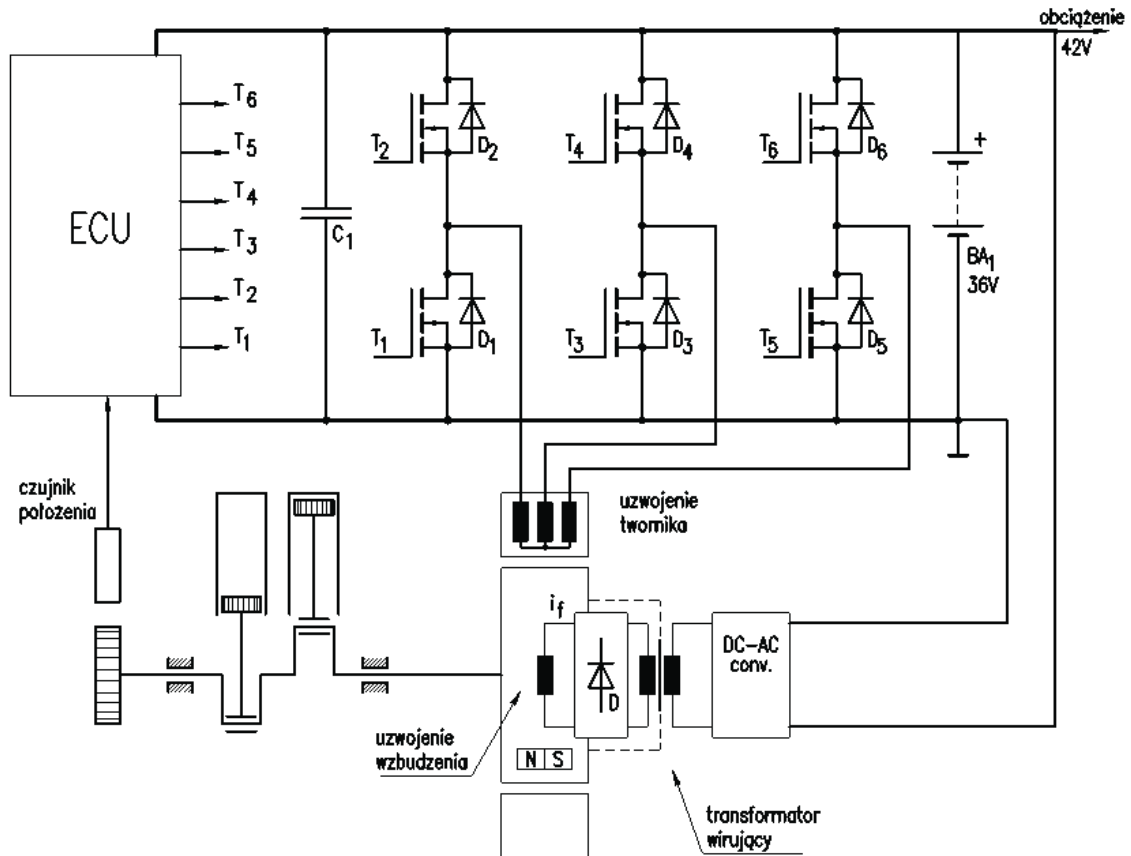
Przy założeniu, że wartość napięcia indukowanego w uzwojeniu twornika przy prędkości biegu jałowego silnika spalinowego wynosi 42 V (aby zapewnić ładowanie baterii akumulatorów), natomiast przy maksymalnej prędkości silnika spalinowego, napięcie to wzrastałoby do wartości ponad 300 V.

Podczas pracy prądnicowej maszyny elektrycznej, napięcie indukowane w uzwojeniach twornika (9) zostaje wyprostowane za pomocą prostownika w układzie trójfazowym mostkowym, złożonego z diod zwrotnych falownika (diody: 15U, 15V, 15W, oraz 16U, 16V, 16W). Aby zapewnić regulację (stabilizację) napięcia wyjściowego prądnicy i prawidłową współpracę z baterią akumulatorów i odbiornikami energii elektrycznej, zastosowano dodatkowy przekształtnik prądu stałego na prąd stały (24), złożony z tranzystorów (25, 26), kondensatora obwodu pośredniego (23) oraz dławika. Ta dodatkowa konwersja energii, obniża sprawność ogólną systemu prądnic - rozrusznik, jak również jego niezawodność (w przypadku uszkodzenia tranzystora (25), podwyższone napięcie przedostaje się do obwodu odbiorników przystosowanych do zasilania napięciem o wartości 42V). Również w tym przypadku uszkodzeniu może ulec przekształtnik 42V/14V i odbiorniki zasilane napięciem 14V (rys. 5). Zapewnienie odpowiedniego poziomu niezawodności systemu prądnic - rozrusznik podczas pracy prądnicowej, stanowi obecnie podstawową przeszkodę do powszechnego zastosowania tego systemu w pojazdach samochodowych.

4. Nowa koncepcja prądnic-rozrusznika

Na rysunku 7 przedstawiono proponowany przez autora prądnic-rozrusznik, oparty na bezszczotkowej maszynie elektrycznej prądu stałego ze wzbudzeniem elektromagnetycznym, który zapewnia większy poziom niezawodności systemu zasilania w porównaniu do koncepcji prezentowanych rozwiązań koncernów samochodowych, opartych na zastosowaniu maszyny elektrycznej z magnesami trwałymi (wówczas nie ma potrzeby stosowania dodatkowych prostowników sterowanych [4, 5] bądź przekształtników prądu stałego na prąd stały). Regulacja napięcia wyjściowego prądnicy utrzymywana jest na stałym poziomie za pomocą zmian wartości średniej prądu uzwojenia wzbudzenia (podobnie jak w konwencjonalnych prądnicach). Do uzwojenia wzbudzenia w wirniku maszyny elektrycznej, prąd doprowadzany jest za pomocą transformatora wirującego (z rdzeniem ferrytowym) i prostownika wirującego. Rozwiązanie to nie wymaga zastosowania dodatkowego przekształtnika prądu stałego na prąd stały (podukład 24 wraz dodatkowym kondensatorem i dławikiem z rysunku 6), a zaciski

wejściowe falownika połączone są bezpośrednio z baterią akumulatorów 36 V. Ta koncepcja bezstykowego doprowadzenia prądu do wirującego uzwojenia wzbudzenia została sprawdzona w warunkach laboratoryjnych dla prądnicy samochodowej o mocy ok. 1 kW.



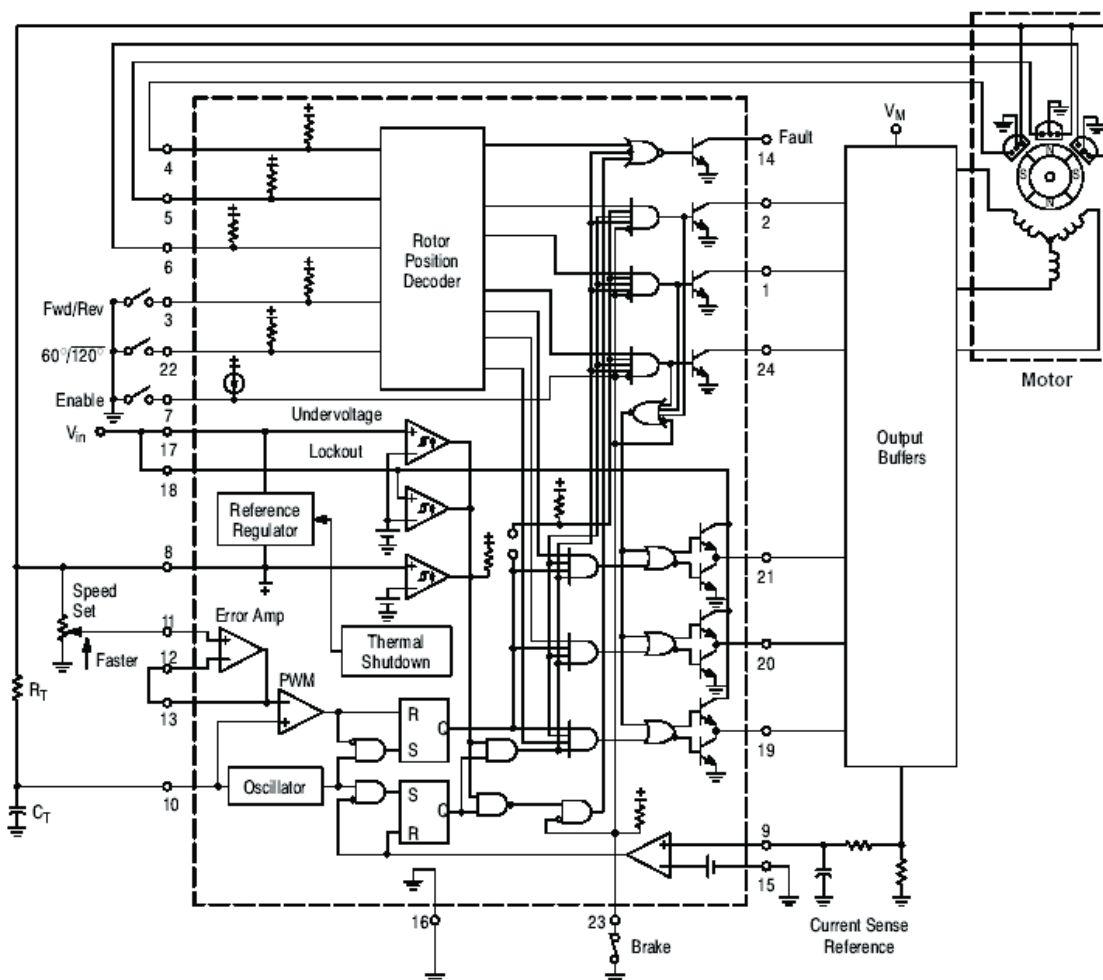
Rys. 7. Koncepcja prądnico-rozrusznika z wykorzystaniem bezszczotkowej maszyny elektrycznej prądu stałego ze wzbudzeniem elektromagnetycznym i transformatorem wirującym

Fig. 7. Concept of the starter-generator with the use of non-brush, electric direct current machine with the electromagnetic excitation as well as with spinning transformer

Podczas pracy prądnicowej, prąd przemienny generowany w uzwojeniu twornika maszyny jest wyprostowany nie za pomocą diod 3-fazowego prostownika w układzie mostkowym: diod D1 – D6 z rys. 6, jak to ma miejsce w rozwiązaniach konwencjonalnych, lecz przez 3-fazowy prostownik tranzystorowy, złożony z tranzystorów T1 – T6 (rys. 7), poprzez ich odpowiednie sterowanie. Zastępując prostownik diodowy prostownikiem tranzystorowym, uzyskać można wielokrotnie mniejszy spadek napięcia na zaworach elektrycznych (o wartości ok. 0,2V na tranzystorze MOSFET przy pełnym obciążeniu, zamiast ok. 1V na diodzie przy pełnym obciążeniu), co oznacza dalszy wzrost sprawności energetycznej oraz wzrost niezawodności systemu poprzez obniżenie mocy strat na ciepło. W przypadku zastosowania prostownika tranzystorowego zamiast diodowego, wartość mocy strat na ciepło w prostowniku zmniejsza się około 5-krotnie. Rozwiązanie to nie wymaga zastosowania dodatkowego przekształtnika prądu stałego na prąd stały, a zaciski wejściowe falownika połączone są bezpośrednio z baterią akumulatorów 36 V. Regulacja napięcia wyjściowego prądnicy utrzymywana jest na stałym poziomie za pomocą zmian wartości średniej prądu uzwojenia wzbudzenia (podobnie jak w konwencjonalnych prądnicach). Do uzwojenia wzbudzenia w wirniku maszyny elektrycznej, prąd doprowadzany jest za pomocą transformatora wirującego (z rdzeniem ferrytowym) i prostownika wirującego.

Elektroniczny układ sterowania zaworami elektrycznymi komutatora, dla uzyskania dużego momentu rozruchowego maszyny podczas pracy silnikowej został zrealizowany z wykorzystaniem specjalizowanych układów scalonych MC33035 oraz MC33039 firmy Motorola (rys. 8). Do sterowania dekodera położenia wirnika maszyny wykorzystano enkoder optoelektroniczny.

Do wykonania modelu fizycznego prądnico-rozrusznika, wykorzystana została zmodyfikowana maszyna synchroniczna ze wzbudzeniem elektromagnetycznym.



Rys. 8. Architektura procesora MC33035 firmy Motorola, jako sterownika prądnico-rozrusznika bezszczotkowego prądu stałego

Fig. 8. The Motorola processor MC33035 architecture as a controller of non-brush direct current starter-generator

5. Podsumowanie

Zintegrowany system zasilania i rozruchu w jednej maszynie elektrycznej łączy funkcje rozruchu oraz zasilania. Głównymi zaletami są: wysoki współczynnik sprawności (powyżej 80 %), wysoka moc prądnicy (ponad 8 kW), współpraca z pokładową siecią zasilającą dwu napięciową (42 V/14 V), redukcja emisji spalin, szybki (około 250 ms) i cichy rozruch silnika bez zużywania się części. Większość opracowywanych obecnie systemów prądnica - rozrusznik bazuje na wykorzystaniu bezszczotkowej maszyny elektrycznej z magnesami trwałymi, co upraszcza sposób wytworzenia strumienia wzbudzenia w wirniku, jednak z drugiej strony, stwarza poważny problem techniczny podczas pracy prądnicowej, w

bezwaryjnym zapewnieniu współpracy z baterią akumulatorów, przy szerokim zakresie zmian prędkości obrotowej silnika spalinowego. Zastosowanie prostownika tranzystorowego zamiast diodowego, powoduje podwyższenie sprawności energetycznej prądnico-rozrusznika podczas pracy generatorowej. Proponowane przez autora rozwiązanie, oparte na bezszczotkowej maszynie elektrycznej prądu stałego ze wzbudzeniem elektromagnetycznym, zapewnia większy poziom niezawodności systemu (nie zachodzi potrzeba stosowania dodatkowych przekształtników prądu stałego na prąd stały).

Literatura

- [1] Delphi Automotive Systems, 42V, The New Energy Standard, Energy & Engine Management Systems.
- [2] Kabushiki K., Control device for permanent magnet motor serving as both engine starter and generator in motor vehicle, Toshiba, Patent EP 1138539.
- [3] Ladd D., Klapproth P., Siemens Starter-Generator, Siemens Automotive Corporation, Document No. 1172.
- [4] Tutaj J., Estymacja jakości energii samochodowych komutatorowych prądnic mechatronicznych prądu stałego z komutatorami elektronicznymi, Rozprawa doktorska, AGH Kraków, 1996.
- [5] Tutaj J., PSPICE the AC-DC Commutator On-Board 42V Generator Simulation, Proceedings of the 2002 IBEC (International Body Engineering Conference) and ATT, 7-19 July, Paris, France, Referat nr. 2002-01-2239, 2002.
- [6] www.auto-innovations.com.
- [7] www.insightcentral.net.