

## BEZCZUJNIKOWY STEROWNIK SILNIKA BLDC MAŁEJ MOCY DO UKŁADU KOMFORTU POJAZDÓW SAMOCHODOWYCH

*W artykule omówiono sterowanie silnika bezszczotkowego prądu stałego małej mocy oraz zjawiska występujące w rzeczywistym silniku. Zaprezentowano także sposób sterowania bezszczotkowego silnika prądu stałego. Zrealizowano także własny sterownik małej mocy, umożliwiający płynny rozruch i kontrolę prędkości obrotowej silnika do 3 tys. obrotów i napięciu zasilającym do 32V DC. W niniejszym artykule zostały także zaprezentowane wyniki z przeprowadzonych pomiarów sterowania silnikiem BLDC używanym w pojazdach samochodowych, głównie w ciężarowych i autobusach.*

### WSTĘP

Jednym z celów producentów pojazdów jest poprawa komfortu pracy kierowcy i pasażerów. Konsekwencją tego jest wzrost ilości zastosowanej elektroniki. W napędach m.in. wentylatorów, pomp, w mechanizmach wycieraczek czy układach otwierania szyb bocznych stosowano silniki komutatorowe, w których niezwykle łatwo regulować prędkość obrotową. Silniki te do działania potrzebują jedynie zasilania. Główną ich wadą jest konieczność serwisowania używającego się układu komutator – szczotki, a dodatkowo brak precyzji zatrzymywania się w określonym położeniu.

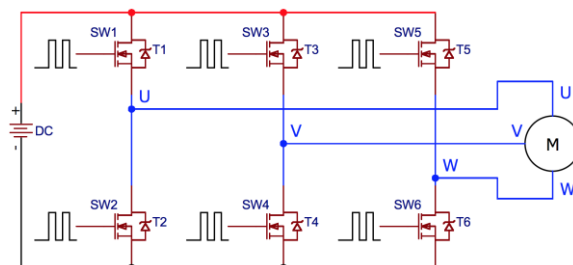
Obecnie silniki te wypierane są przez silniki bezszczotkowe, najczęściej prądu stałego (BLDC – ang. BrushLess Direct-Current motor), które z uwagi na bezobsługowość coraz częściej są stosowane w różnego rodzaju maszynach. Inne ich zalety to – trwałość, łatwość sterowania, większa niezawodność. Przewyższają one wszystkie inne silniki pod względem sprawności oraz mocy osiągniętej z jednostki ciężaru czy objętości. Dodatkowo w grupie silników do 5 kW mają sprawność średnio o 10% większą od innych silników [2].

Trwałość silników bezszczotkowych ograniczona jest praktycznie trwałością użytych łożysk. Do poprawnej pracy silniki bezszczotkowe potrzebują informacji o położeniu wirnika – tzw. sprzężenia zwrotnego. Informacja ta jest pobierana z układu enkodera zbudowanego z czujników optycznych lub w miejscach dużego zapylenia - czujników Halla i przekazywana do drivera. Układ tenysterowuje tranzystory mocy. Ten sposób jest bardzo często stosowany ponieważ zaraz po włączeniu zasilania układ sterowania zna położenie wału silnika i może dokonać płynnego rozruchu w ustalonym kierunku.

Inny sposób sterowania pracą silnika polega na wykorzystaniu sterowania bezczujnikowego (ang. Sensorless drives) omawianego w niniejszym artykule. Mimo, że sterownik nie posiada czujników położenia wału, możliwe jest sterowanie pracą silnika. Silnik rozpoczyna pracę jako klasyczny silnik skokowy w otwartej pętli sprzężenia zwrotnego, a dopiero chwilę później po nabraniu prędkości zaczyna pracować w trybie bezczujnikowym. Spowodowane jest to tym, że przy małych prędkościach obrotowych siła przeciwelektromotoryczna jest zbyt mała aby układ był w stanie właściwie wykryć moment przejścia przez zero i poprawnieysterować tranzystory mocy. Natomiast ustalanie bieżącego położenia polega na pomiarze napięcia w fazie silnika, która aktualnie nie jest zasilana.

### 1. 3 - FAZOWY SILNIK PRĄDU STAŁEGO (BLDC)

Praca silnika BLDC – kierunek wirowania i prędkość uzależniona jest od kolejności i częstotliwości łączeń 6 tranzystorów mocy T1 – T6 (działających jako klucze SW1..SW6) trójfazowego mostka tranzystorowego. Prędkość obrotowa zależy także od napięcia zasilającego. W takim układzie sterowania przyjmuje się przepływ prądu w dwóch fazach uzwojenia, a zatem jednocześnie przewodzi jeden górny i jeden dolny tranzystor mostka. Szerokość sygnału PWM i jego częstotliwość decyduje o prędkości obrotowej silnika i częstotliwości łączeń tranzystorów T1-T6 [2].



**Rys. 1.** Podstawowy układ sterowania 3-fazowego silnika prądu stałego [opr. własne]

#### 1.1. Zjawiska występujące w rzeczywistym silniku

W rzeczywistym silniku mogą występować m.in.: niesymetrie obwodów elektrycznych, niestalość lub niestacjonarność parametrów, wpływ skokowego przełączania pasm stojana na właściwości silnika.

W układach sterowników bezczujnikowych zmiany indukcyjności uzwojeń pod wpływem zmiany położenia wirnika mogą być wykorzystane do identyfikacji położenia wirnika.

W układach rzeczywistych nie występują idealne łączniki, lecz rzeczywiste klucze energoelektroniczne, którymi są najczęściej tranzystory mocy typu MOSFET lub IGBT z dodatkowo wbudowaną diodą. Producenci elektroniki starają się aby miała ona bardzo dobre parametry, ponieważ pozwala ona chronić tranzystor przed przepięciami, podobnie jak dioda montowana przy cewce przekątnika. W rzeczywistym silniku BLDC przebiegi fazowe SEM mają najczęściej przebieg quasi-trapezowy. Ich kształt uzależniony jest m.in. od sposobu magnesowania i rozmieszczenia magnesów wirnika, kształtu zębów stojana i sposobu nawijania uzwojeń. W wyniku istnienia zębów powstaje dodatkowy moment w silniku, zwany momentem za-

czepowym, który w większości zastosowań jest traktowany jako zjawisko niekorzystne. Jest on podstawowym problemem w wielobiegunowych maszynach z magnesami trwałymi i może osiągać znaczne wartości, w odniesieniu do momentu znamionowego. Powstaje w wyniku współdziałania pola magnetycznego pochodzącego od magnesów trwałych oraz stojana o zmiennej kątoowo przewodności magnetycznej, w wyniku nierównomierności szczeliny powietrznej, stąd usilnie dąży się do jego minimalizacji, najczęściej na drodze konstrukcyjnej.

Przełączenie uzwojeń w silniku rzeczywistym powoduje powstawanie dodatkowych zjawisk m.in.: skokową zmianę położenia wektora przepływu stojana, oraz pojawienie się przedziałów czasowych, gdzie przewodzą trzy uzwojenia fazowe. [1]

## 1.2. Straty i sprawność

Dobrze zaprojektowany silnik wraz z układem sterowania powinien charakteryzować się następującymi cechami: wysoką sprawnością, korzystnym wskaźnikiem stosunku mocy do masy, dużą trwałością, niskim kosztem wytworzenia [4]. Dwie pierwsze cechy są związane ze stratami mocy występującymi w silniku. Powodują one wzrost zużycia energii i wzrost temperatury uzwojeń. Przekroczenie tych parametrów ma niekorzystny wpływ na trwałość i niezawodność silnika. Ograniczenie tych strat powoduje zmniejszenie energochłonności przy jednoczesnym wydłużeniu czasu pracy. Źródłem strat mocy (1) w silniku są straty elektryczne związane z przepływem prądu przez uzwojenia (w miedzi -  $P_{Cu}$ ), straty związane ze zmianą wirującego pola magnetycznego w nieliniowym obwodzie magnetycznym (w żelazie -  $P_{Fe}$ ) i straty mechaniczne związane z ruchem wirnika (straty mechaniczne -  $P_{mech}$ ).

$$\Delta P \approx \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} \quad (1)$$

Straty w uzwojeniach zależą od prądu obciążenia - są proporcjonalne do kwadratu prądu, natomiast straty „w żelazie” i straty mechaniczne zależą od prędkości. Straty magnetyczne związane są z szybkością przemagnesowywania rdzenia i kształtem charakterystyki magnesowania stali stojana, na którym nawinięte jest uzwojenie. Straty te stanowią zwykle ułamek procenta mocy znamionowej silnika, są wielokrotnie mniejsze od pozostałych strat i nie mają większego wpływu na sprawność silnika. Maleją w miarę zmniejszania prędkości silnika. Straty mechaniczne spowodowane są tarciami w łożyskach oraz tarciami wirnika o chłodziwo. W przypadku pracy z dużymi prędkościami wskazane jest stosowanie łożysk o dużej sprawności. Do strat mechanicznych zaliczyć należy straty wentylacyjne. Są one pomijalnie małe przy małych prędkościach i gwałtownie rosną przy wzroście prędkości. Należy pamiętać, że sprawność silnika można zwiększyć zmniejszając występujące straty.

## 1.3. Bezczujnikowe metody sterowania, wykorzystujące wielkości mierzone

W grupie metod wykorzystujących wielkości mierzone oraz ich matematyczne modele wyróżnia się 3 podgrupy układów [1]:

- stosujące napięcia i prądy do obliczania strumienia skojarzonego
- wykorzystujące różnicę pomiędzy prawidłowymi napięciami lub prądami i ich wartościami aktualnymi
- stosujące równania maszyny i zmienne mierzone przy założeniu znanych parametrów maszyny

Równanie macierzowe (2) może być punktem wyjścia do analizy bezczujnikowego sterowania, wykorzystującego wielkości mierzone.

$$U = RI + \frac{d}{dt}\Psi \quad (2)$$

Gdzie:

$U$  – wektor napięć,

$R$  – macierz rezystancji,

$I$  – wektor prądu,

$\Psi$  – wektor strumienia skojarzonego.

W przypadku znajomości pozycji początkowej, parametrów silnika i zależności strumienia skojarzonego względem pozycji wirnika, można określić pozycję wirnika.

$$\Psi = \Psi_0(t) + \int_0^t (U - RI) dt \quad (3)$$

Całkując wyrażenie (3) uzyskuje się zależność zmian strumienia skojarzonego od czasu. Wyznaczając zmiany strumienia skojarzonego korzysta się z danych z poprzedniej pozycji oraz stosuje rozkład wielomianowy. Daje to możliwość przewidywania pozycji wirnika w następnym kroku. Zaletą takiej metody jest możliwość wykorzystywania napięć międzyprzewodowych i nie jest wymagany dostęp do punktu neutralnego uzwojeń silnika.

Układy wykorzystujące równania maszyny i zmienne mierzone, przy założeniu znanych parametrów, stosują wielkości określające pracę silnika do okien współrzędnych odniesienia  $d, q$  dla stojana i wirnika.

## 1.4. Metody rozruchu

Dla poprawnej pracy silnika BLDC warunkiem koniecznym jest znajomość położenia wirnika. Czujniki położenia pozwalają określić położenie wirnika zarówno w stanach ustalonych, przejściowych jak w położeniu spoczynkowym. Dla większości metod bezczujnikowych, możliwe jest określenie położenia wirnika tylko w warunkach normalnej pracy. Wymusza to konieczność opracowania dodatkowych technik rozruchu. Można podzielić je na 4 grupy [2]:

- metody rozruchu w pętli otwartej,
- metody rozruchu przy znanym położeniu początkowym,
- metody oparte na mechanizmach sprawdzających, których zasada działania najczęściej bazuje na zmianach indukcyjności, będących wynikiem nasycania obwodu magnetycznego w zależności od położenia wirnika,
- złożone metody komputerowe.

### Rozruch w układzie pętli otwartej

Metoda rozruchu w układzie pętli otwartej polega na przełączeniu uzwojeń z niewielką częstotliwością, tak by zapewnić obrót silnika w pożądanym kierunku. W tej metodzie wymagane jest ograniczenie prądu rozruchu. Podczas rozruchu w otwartej pętli, amplituda i częstotliwość powinny narastać stopniowo.

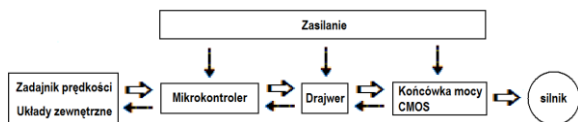
### Rozruch wykorzystujący znajomość położenia początkowego

Metody rozruchu wykorzystujące znajomość położenia początkowego przed rozruchem dokonują wstępnego ustawienia wirnika na zadanej pozycji.

Czas rozruchu  $t_a$  (4) jest proporcjonalny od momentu bezwładności  $J$  i wzmocnienia  $K_v$  generatora VCO oraz odwrotnie proporcjonalny do stałej SEM rotacji  $K_t$  silnika BLDC, a  $\xi$  jest stałą przyspieszenia:

$$t_a = \xi \frac{JK_v}{K_t} \quad (4)$$

## 2. BUDOWA I DZIAŁANIE STEROWNIKA



Rys. 2. Schemat blokowy urządzenia [opr. własne].

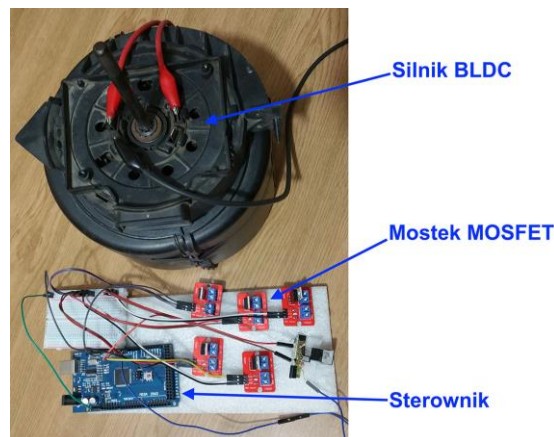
Rynek samochodowy wygenerował zapotrzebowanie na sterownik silnika o niskiej rezystancji wewnętrznej uzwojeń. Silnik ma być użyty do napędu wentylatora nawiewu kabiny. Układ powinien mieścić się w już istniejącej obudowie, być przystosowany do pracy z dużymi prądami - do 20A, pracować w zakresie temperatur otoczenia  $-30 \div 50^{\circ}\text{C}$  i komunikować się z komputerem pokładowym pojazdu. Z uwagi na trudności z umieszczeniem czujników położenia wału, prototypowy układ sterownika został zaprojektowany w oparciu o drajwer bezczujnikowy. Zastosowano w nim pompy ładunkowe, tym samym możliwe stało się użycie tranzystorów mocy jednego typu. Ponieważ układ będzie pracował w obudowie, w której chłodzenie mostka mocy będzie utrudnione, wybrano wysokoprądowe tranzystory o niskiej rezystancji otwarcia, redukując ilość wydzielanego na nich ciepła. Drajwer realizuje: poprawną pracę silnika, obroty lewo-prawo, rozruch i pracę ze zredukowanym momentem, zmianę kątaysterowania tranzystorów - niezbędną do zwiększenia mocy silnika i kontrolę prądu silnika.

Układ wykrywa uszkodzenia tranzystorów mocy, zwarcie/przerwę w uzwojeniu silnika w dowolnej fazie. Informacja o usterkach jest zapamiętywana w rejestrze diagnostycznym i wyprowadzana na zewnątrz interfejsem szeregowym, co może być pomocne w diagnostyce urządzenia. Drajwer został zaprojektowany jako układ do sterowania wieloma rodzajami silników. Świadczy o tym ilość parametrów, które można ustawiać, a są to m.in.: czas komutacji faz, czas martwy - zapobiega zwarciom tranzystorów, prąd rozruchu, czas nieczułości czujnika prądu, metoda rozruchu silnika - wg prądu lub wg momentu, czas rozruchu, współczynniki narastania - tzw. ramp, metoda detekcji przejścia przez zero, czas pomiaru siły przeciwlektromotorycznej BEMF. Układ posiada czujnik kontroli napięcia zasilającego. Daje możliwość hamowania silnika oraz odzysk energii. Umożliwia również „unieruchomienie” silnika w celu wyeliminowania niekontrolowanego obracania się wału. Po zatrzymaniu silnika, przy aktywnej tej funkcji fazy silnika są zwarte ze sobą i obracanie wałem staje się utrudnione.

Całością pracy urządzenia steruje mikrokontroler, taktowany wewnętrznym sygnałem zegarowym. Zrezygnowano z dołączenia zewnętrznego rezonatora kwarcowego, z uwagi na duże prądy sterownika i możliwość zakłócenia pracy układu taktowania. Mikrokontroler komunikuje się z drajwem przez łącze szeregowe i steruje jego pracą, a przez to pracą silnika. Podawany do drajwera sygnał o stałej częstotliwości o regulowanym współczynniku wypełnienia pozwala uzyskać żadaną prędkość silnika. Umożliwia to płynny rozruch tzw. softstart. Ponieważ mikrokontroler powinien znać prędkość obrotową, drajwer wysyła sygnał o częstotliwości proporcjonalnej do prędkości obrotowej silnika. Informacja ta może być wyprowadzana na zewnątrz urządzenia do innych modułów. Sygnał ten pojawia się dopiero po uzyskaniu synchronicznej pracy silnika. Żadana prędkość obrotowa silnika ustalana jest poprzez pomiar napięcia z potencjometru za pomocą przetwornika A/C wbudowanego w mikrokontroler. Żeby uniezależnić się od chwilowych zmian napięcia zasilającego do poprawnej pracy przetwornika analogowo-cyfrowego skorzystano z

wbudowanego źródła napięcia odniesienia. Układ ma możliwość komunikacji z serwisantem poprzez interfejs RS232C do komputera, lub prościej za pomocą diody RGB. Urządzenie posiada zabezpieczenia przeciwprzepięciowe pochodzące z zewnątrz, jak i te które mogą powstawać podczas komutacji faz.

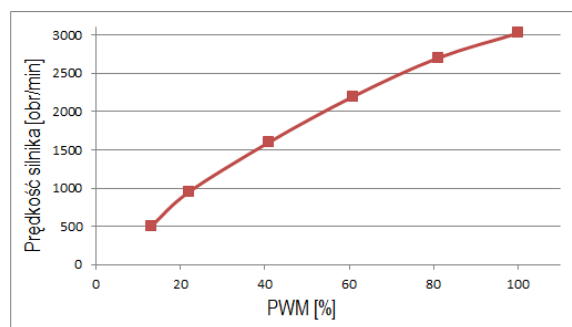
Całość zasilana jest napięciem z przedziału 18÷32V, choć sam drajwer może być zasilany napięciem 6÷50V [5]. Sterownik umożliwia regulację prędkości silnika do 3 tys. obr/min, pobierając prąd około 13 amper.



Rys. 3. Zestaw uruchomieniowy z silnikiem BLDC [opr. własne]

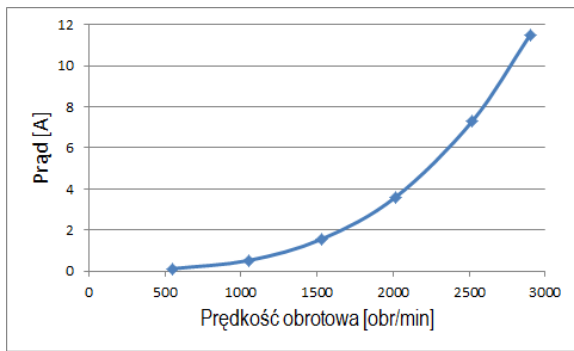
## 3. POMIARY WYKONANEGO STEROWNIKA BLDC

Silnik z przymocowanym wentylatorem został połączony ze sterownikiem i podłączony do napięcia +24V DC. Zadawanie prędkości odbywało się z potencjometru. Ponieważ jest to silnik o małej rezystancji konieczne było użycie softstartu z ograniczeniem prądu rozruchu. Drajwer został zaprojektowany jako układ uniwersalny do wielu rodzajów silników BLDC, tym samym koniecznym było dopasowanie parametrów komutacji znajdujących się w rejestrach konfiguracyjnych sterownika. Uzyskanie wyższych prędkości i większych mocy możliwe było przez programową zmianę kąta wyprzedzeniaysterowania tranzystorów mocy.



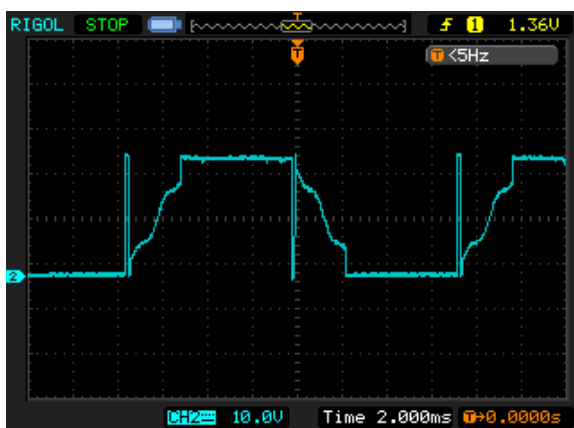
Rys. 4. Zależność prędkości obrotowej silnika od współczynnika wypełnienia impulsu sygnału sterującego [opr. własne]

Na rysunku 5 zaprezentowano zależność poboru prądu od prędkości obrotowej wentylatora. Przy małych prędkościach opory powietrza są małe, stąd małe zużycie prądu, w miarę wzrostu prędkości odnotowano nieliniowy (paraboliczny) wzrost poboru prądu. Urządzenie to pracuje na zasadzie wykorzystywania siły odśrodkowej, więc moment oporowy zależy od kwadratu prędkości kątowej. Charakterystyki tego typu nazywane są wentylatorowymi.



**Rys. 5.** Zależność prądu silnika od prędkości obrotowej [opr. własne]

Na rysunku 6 przedstawiono oscylogram pomiaru napięcia na jednej z faz silnika. Występujące tu szpilki są charakterystyczne dla momentów przełączania faz silnika.



**Rys. 6.** Pomiar napięciowy jednej z faz układu sterownika bezczujnikowego [opr. własne]

## PODSUMOWANIE

Zrealizowany układ nadaje się do zastosowania w systemach klimatyzacji, wentylacji do napędu wentylatorów, a także w przepompowniach, układach hydrauliki do napędu pomp, wszędzie tam gdzie początkowe położenie wału nie musi być znane.

Rozbudowany układ zabezpieczeń umożliwia ochronę silnika i tranzystorów wykonawczych. Dzięki uniwersalnemu drajwerowi istnieje możliwość adaptacji do napędów o różnych parametrach – różnych momentach obciążenia i różnych bezwładnościach. Połączenie z komputerem umożliwia stały nadzór nad pracą urządzenia, a zastosowanie konwerterów sygnału - monitorowanie pracy także przez sieć Ethernet.

W dalszych pracach przewidziano opracowanie sterownika dla silnika BLDC małej mocy, wykorzystującego logikę rozmytą (ang. Fuzzy logic) z estymatorem siły elektromotorycznej, opartego na 32-bitowym mikrokontrolerze ARM, a także budowę sterownika wykorzystującego sieci neuronowe dla sterowania wolnoobrotowego silnikami BLDC i dwukierunkową komunikację przez sieć Ethernet.

Docelowo wszystkie zbudowane sterowniki mają zostać zbadane w tych samych warunkach pracy i z tymi samymi silnikami BLDC małej mocy.

## BIBLIOGRAFIA

1. Goryca Z. Metody sterowania silników BLDC. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 66. 2012.
2. Krykowski K. Silniki PM BLDC właściwości, sterowanie, aplikacje. BTC, Legionowo 2015.
3. Jian Zhao, Yangwei Yu. AN047. Brushless DC Motor Fundamentals. 2014.
4. Krykowski K., Hetmańczyk J., Makiela D., Gałuszkiewicz Z., Ocena strat w wysokoobrotowym silniku PM BLDC, Zeszyty problemowe - Maszyny Elektryczne Nr 3/2012 (96).
5. A4963 Sensorless BLDC Controller. Allegro MicroSystems, LLC. 2017.

### Sensorless BLDC motor controller little power to the comfort of motor vehicles

*The article discusses low-power brushless motors and control modules that are used, among others, in trucks and buses. Also presented are methods of controlling brushless DC motors. The own low power controller was also implemented, enabling smooth start-up and control of the engine speed up to 3,000 revolutions and supply voltage up to 32V DC. This article also presents the results of the measurements of BLDC motor control used in automotive vehicles, mainly in trucks and buses.*

Autorzy:

mgr inż. **Emil Sadowski** – Przedsiębiorstwo Usługowo Handlowe HESTA w Radomiu, e-mail: [emil@hesta.com.pl](mailto:emil@hesta.com.pl)

mgr inż. **Artur Pakosz** – PECITO Systemy Mikroprocesorowe w Radomiu, e-mail: [apakosz@pecito.pl](mailto:apakosz@pecito.pl), tel: 663-301-290

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2018.161

Data zgłoszenia: 2018.05.24 Data akceptacji: 2018.06.15