

KONCEPCJE SYSTEMÓW MODUŁOWEGO ZASILANIA NA PRZYKŁADACH UKŁADÓW ZASILANIA LATAREK LED

Bartosz HEJKE¹, Szymon JESIONEK², Arkadiusz SZEWCZYK³, Stanisław GALLA⁴

1. Student Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej
e-mail: bartosz.hejke@gmail.com
2. Student Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej
e-mail: szymonjesionek@gmail.com
3. Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Katedra Metrologii i Optoelektroniki
e-mail: szewczyk@eti.pg.edu.pl
4. Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Katedra Metrologii i Optoelektroniki
tel.: 58 347 21 40, e-mail: galla@eti.pg.edu.pl

Streszczenie: W referacie przedstawiono rozwiązania systemów zasilania do zastosowania w modułowych latarkach LED pozwalające na optymalizację zużycia energii, a tym samym wydłużenie czasu ich pracy. Przedstawiono podstawowe wymagania stawiane układom zasilania stosowanym w powyższych rozwiązaniach oraz przedstawiono dwie zrealizowane koncepcje ich wykonania. Na wykonanych prototypach układów przeprowadzono pomiary a uzyskane wyniki zostały przedstawione w referacie wraz z podstawową analizą koszt - efekt. Wykonane układy pozwalają na efektywne zmniejszenie zużycia baterii zasilających w latarce LED, co przekłada się na wydłużenie czasu pracy i oszczędności finansowe.

Słowa kluczowe: latarka LED, przetwornica DC/DC.

1. WSTĘP

Diody elektroluminescencyjne (LED) wykorzystywane są w wielu aplikacjach oświetleniowych (latarkach, reflektorach samochodowych, bilbordach reklamowych, znakach drogowych). Ten rodzaj źródła światła posiada wiele niekwestionowanych zalet w porównaniu do innych konwencjonalnych źródeł [1, 2]. Produkowane diody charakteryzują się bardzo dużą trwałością. Niektóre z nich potrafią pracować nawet do 100 tys. godzin, przy czym żywotność diody zależy w głównej mierze od sposobu sterowania nią jak i od warunków temperaturowych, w jakich dioda pracuje. Ich skuteczność świetlna, która mieści się w przedziale 26 – 300 lm/W, jest jedną z największych wśród dostępnych komercyjnie źródeł światła. Ze względu na swoją budowę jest to z reguły źródło odporne na wstrząsy i wibracje. Wymaga jednakże zastosowania innych metod zasilania i sterowania, w porównaniu z tradycyjnymi źródłami światła. Podstawowe różnice w projektowaniu modułów zasilających LED w porównaniu z tradycyjnymi źródłami związane są z układami zasilania. Większość obecnie sprzedawanych latarek LED nie dysponuje sterowanymi układami zasilania. Na podstawie własnych doświadczeń autorzy na podstawie m.in. wymagań zawartych w [3, 4] dotyczącymi modułów zasilających, sformułowali własne wymagania dla modułów zasilania LED, które powinny charakteryzować się:

1. możliwością sterowania LED dla układów gdzie występują LED połączone szeregowo, jak i możliwością regulacji prądu przepływającego przez zestaw diod, w celu sterowania ich jasnością. Diody dzięki swoim właściwościom mogą być obciążane prądami wyższymi niż ich prąd znamionowy, jednakże ma to znaczący wpływ na ich żywotność.
2. Moduły zasilające powinny charakteryzować się dużą efektywnością (sprawnością) i niezawodnością pracy. W większości zastosowań LED mocy wymagane jest użycie aktywnego bądź pasywnego sposobu odprowadzania energii cieplnej.

Celem pracy było opracowanie i przebadanie modułów zasilania LED. Wybrano dwie koncepcje realizacji:

- a) moduł zasilający jako układ o wymiarach zbliżonych do wymiarów baterii typu AAA umieszczony w koszyczku na baterie, zastępujący jedną z nich. Wybrana do testów latarka LED mieści trzy baterie typu AAA, potocznie zwane „cienkie paluszki”, połączone szeregowo. Każda z baterii charakteryzuje się napięciem wyjściowym ~1,5 V i określoną pojemnością. Wymiary typowej baterii AAA to długość L~44,5 mm i średnica ϕ ~10,5 mm. Latarka wyposażona jest w dziewięć diod LED, połączonych ze sobą równolegle. Rozkład diod i ich połączenie, powoduje, iż mogą one działać już przy napięciu ~3,6 V. Pobór prądu przy założeniu, iż każda z diod pracuje przy prądzie ~20 mA, w przypadku połączenia równoległego wynosi ~180 mA [1]
- b) moduł zasilający będący równocześnie podstawką pod LED z możliwością pracy i sterowania strumieniem świetlnym wg zadanych programów dla zasilania realizowanego za pomocą pojedynczej lub wielokrotniej liczby ogniw dla latarki z jedną diodą o mocy 1 W o wysokiej wydajności świetlnej mieszczącej się w typowej obudowie latarki [2].

Wykonane moduły zasilania zostały porównane w zakresie uzyskanej efektywności koszt – efekt. Podstawowym wyznacznikiem oceny miała być cena wykonania oraz efektywność wykorzystania źródeł zasilania. W pracy położono nacisk na optymalizację kosztów

wykonania w każdym z proponowanych rozwiązań oraz uzyskanie wzrostu efektywności wykorzystania dysponowanych źródeł zasilania (baterii).

1.1. Diody LED

LED są to diody, które zalicza się do półprzewodnikowych przyrządów optoelektronicznych, emitujących promieniowanie w zakresie światła widzialnego [2]. W przypadku najczęściej stosowanych źródeł światła są to LED o kształcie okrągłym o średnicy 5 mm. Emitują one światło barwy białej (zimnej), jasność świecenia jest różna, zależna od jakości elementów użytych przez producenta. Parametry, które charakteryzują diody to m.in. długość fali emitowanego światła, intensywność świecenia (jasność), prąd przepływający przez diodę oraz napięcie progowe diody, i napięcie pracy odpowiednie do przepływającego przez nią prądu [3]. Dla typowej białej diody zalecana wartość prądu pracy uzyskiwana przy napięciu $V_F \sim 3,6\text{ V}$ wynosi $I_F \sim 20\text{ mA}$ [4]. Parametrem charakteryzującym diody jest również jasność świecenia (wyrażana w cd), której charakterystyka jest z reguły podawana w funkcji prądu. Wykresy są znormalizowane dla typowych wartości prądu, np.: dla prądu diody $I_F = 20\text{ mA}$. Z reguły w aplikacjach oświetleniowych ze względu na trwałość diod i pobierane prądy dobiera się punkt pracy LED poniżej wartości znamionowych deklarowanych przez danego producenta.

1.2. Przetwornice impulsowe

Przetwornice są to urządzenia elektryczne lub elektromechaniczne, które pozwalają zasilać inne urządzenia których parametry prądowo - napięciowe nie pozwalają na ich bezpośrednie podłączenie do źródła zasilania. Typowa przetwornica ma za zadanie zmianę napięcia i natężenia prądu w sposób odpowiedni do wymagań zasilanego urządzenia. Jednym z podstawowych elementów przetwornicy jest transformator lub cewka, która jest odpowiedzialna za zmianę wartości napięcia i natężenia prądu. Ze zmianą parametrów zasilania związane są straty mocy, które są reprezentowane przez sprawność układu (η). Obecnie wyróżniamy trzy podstawowe typy przetwornic:

- *boost* (*step – up*) – podwyższająca napięcie wyjściowe,
- *buck* (*step – down*) – obniżająca napięcie wyjściowe,
- odwracające napięcie (*inverting converter*) – zmieniające polaryzację napięcia wyjściowego.

W pracy były wykorzystywane przetwornice typu *boost*.

1.3. Sposoby sterowania jasnością LED

W celu zmniejszenia intensywności świecenia LED używa się bezpośredniej redukcji prądu płynącego przez diodę lub stosuje się modulację prądu zasilania *PWM* (ang. Pulse - Width Modulation). Zastosowanie konkretnej metody zależy głównie od rodzaju aplikacji. Obie te metody bazują na kontroli wartości średniej prądu. Analogowe sterowanie prądem polega na bezpośrednim kontrolowaniu wartości prądu płynącego przez diodę. Pełna intensywność świecenia odpowiada maksymalnej wartości prądu dostarczanego przez moduł zasilający. Prąd płynący przez diodę jest liniowo ograniczany, co wiąże się z liniową redukcją intensywności świecenia. Intensywność świecenia jest proporcjonalna do prądu przepływającego przez diodę. W przypadku sterowania *PWM* mamy do czynienia z impulsami o maksymalnej amplitudzie prądu źródła gdzie szerokość tych

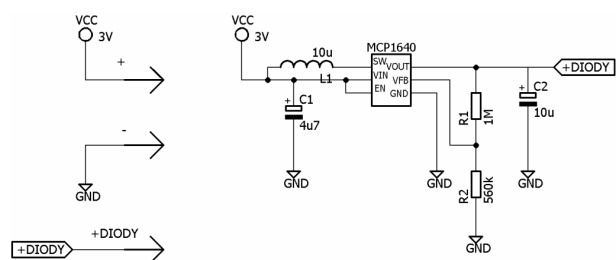
impulsów wpływa na jasność świecenia diody. Metoda ta wykorzystuje cechę ludzkiego wzroku jaką jest bezwładność wynosząco około 100 ms [5]. Ludzkie oko przy odpowiedniej dużej częstotliwości impulsów świetlnych odbiera światło jako ciągłe. Metoda *PWM* polega na generowaniu przebiegu prostokątnego D o zmiennym współczynniku wypełnienia, czyli zmiennym czasie trwania stanu wysokiego T_{ON} względem okresu T . Przyjmuje się, że częstotliwość rzędu 200 Hz (5 ms) jest wystarczająca by zapewnić wrażenie ciągłości świecenia a równocześnie pozwala zminimalizować efekt stroboskopowy. Zastosowane wypełnienie odpowiada bezpośrednio za intensywność świecenia LED. Sterowanie jasnością diody poprzez modulację *PWM* wymaga generatora takiego sygnału oraz tranzystora przełączającego prąd zasilania. Wybór powyższej metody kontroli jasności jest bardziej skomplikowany konstrukcyjnie i droższy w aplikacji [6].

2. UKŁAD PRZETWORNICY IMPULSOWEJ NA BAZIE UKŁADU SCALONEGO MCP1640 DLA UKŁADU UMIESZCZANEGO W KOSZYKU BATERII

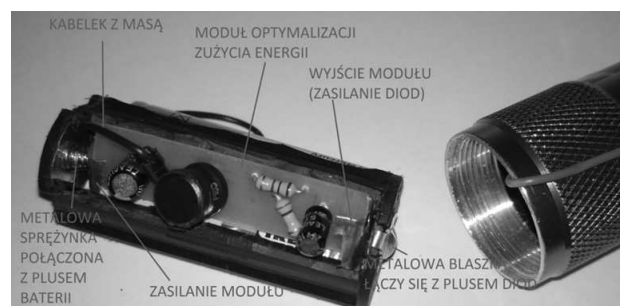
Do realizacji zadania wybrano układ MCP1640, który jest scaloną synchroniczną przetwornicą DC – DC. Podstawowymi cechami układu są [7]:

- tryb pracy: *PWM* przy jednej częstotliwości pracy wynoszącej 500 kHz,
- napięcie startowe od 0,65 V dla $U_{wyj} = 3,3\text{ V}$, przy maksymalnym prądzie wyjściowym do 100 mA,
- regulacja napięcia wyjściowego $U_{wyj} = 2,0 - 5,5\text{ V}$,
- sprawność (η) do 96%,
- wymiary $\sim 3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$.

Dodatkowo przetwornica zawiera wszystkie układy kompensujące i zabezpieczające, co pozwala zmniejszyć liczbę elementów zewnętrznych. Schemat ideowy układu przedstawiono na rysunku 1, na rysunku 2 przedstawiono wykonany układ eksperymentalny.



Rys. 1. Schemat ideowy modułu zasilającego na bazie przetwornicy MCP1640



Rys. 2. Fotografia modułu zasilającego na bazie przetwornicy MCP1640

Przy projektowaniu układu wykorzystano informacje zawarte w nocie katalogowej wraz z ich zaleceniami aplikacyjnymi. Największymi objętościowo elementami układu były kondensatory elektrolityczne oraz cewka.

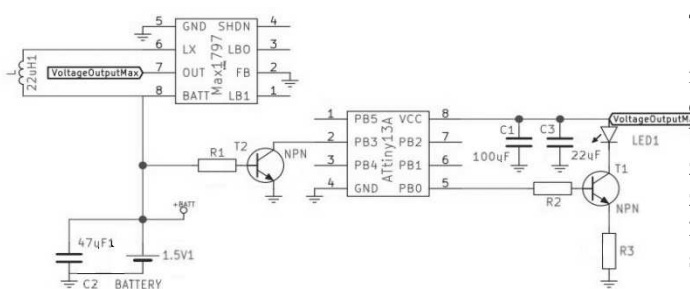
Projektując zdecydowano się na kondensatory elektrolityczne (dostępne w fazie wykonania), natomiast również dobrym rozwiązaniem byłoby zastosowanie kondensatorów tantalowych, które umożliwiłyby dalszą miniaturyzację modułu.

3. UKŁAD PRZETWORNICY IMPULSOWEJ NA BAZIE UKŁADU SCALONEGO MAX1796 DLA UKŁADU ZINTEGROWANEGO

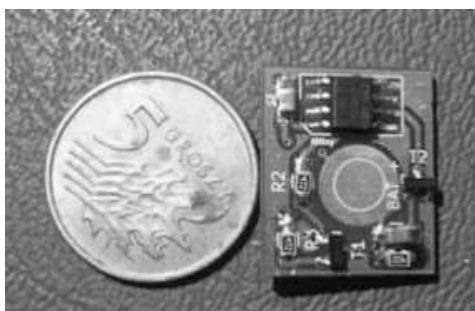
Sercem drugiego układu jest przetwornica *boost* MAX1796 charakteryzująca się [7]:

- trybami pracy: *PWM* o zmiennej częstotliwości do 500 kHz,
- napięcie startowe od 0,7 V,
- regulacja napięcia wyjściowego $U_{wyj} = 2,0 - 5,2$ V, przy maksymalnym prądzie wyjściowym do 1 A,
- sprawność (η) do 95%,
- wymiary ~ 3 mm x 3 mm.

Przetwornica umożliwia pracę w szerokim zakresie napięć wejściowych od 0,7 V do 5 V [8]. Małe wymiary układu i niewielka ilość zewnętrznych elementów pozwalają na zaprojektowanie układu charakteryzującego się wysoką gęstością upakowania. Na rysunku 3 przedstawiono schemat zrealizowanego układu a jego zdjęcie na rysunku 4.



Rys. 3. Schemat ideowy modułu zasilającego na bazie przetwornicy MAX1796



Rys. 4. Zrealizowany moduł zasilający na bazie przetwornicy MAX1796 (bez diody świecącej)

Za dostarczenie odpowiedniego napięcia do zasilania *LED* jak i mikrokontrolera ATiny 13A odpowiada układ złożony z układu MAX1797 i komponentów dodatkowych. Za sterowanie jasnością diody odpowiedzialny jest mikrokontroler kluczujący tranzystorem *T1*. Tranzystor *T2* służy do poprawnego sprawdzania stanu napięcia na zaciskach baterii. Użycie jednego przycisku bistabilnego umożliwia sterowanie zarówno wypełnieniem modulacji *PWM* zastosowanego mikrokontrolera jak i załączania

zasilania baterijnego do układu. Takie zastosowanie przycisku sterującego wymusiło użycie kondensatora *C1* o relatywnie dużej pojemności 100 μ F w celu podtrzymania napięcia na mikrokontrolerze. Pozostałe kondensatory *C2*, *C3* służą do filtracji napięcia zasilania. Po załączeniu napięcia układ sterujący domyślnie pracuje z maksymalną mocą. W celu zmniejszenia jasności świecenia należy na krótką chwilę przerwać zasilanie, czas ten powinien mieścić się w przedziale 0,2 - 0,8 sekundy i jest uzyskiwany przez przyciśnięcie przycisku. W tym czasie mikrokontroler dzięki kondensatorowi podtrzymującemu napięcie *C1* nie wyłączy się, ale zmieni wypełnienie *PWM*. Programowo ustawiono cztery stopnie świecenia, które powtarzają się cyklicznie. W pierwszym stopniu świecenia wypełnienie *PWM* równe jest 100%, w kolejnych wartości zadawana spada o 25%.

4. POMIARY

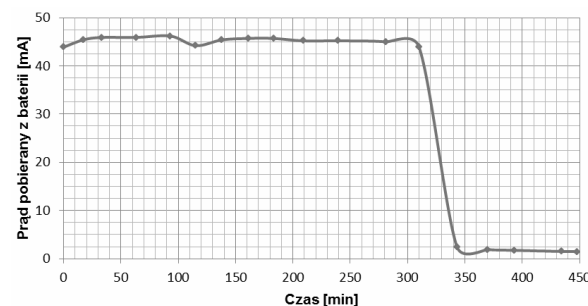
Testy przeprowadzono dla obu zrealizowanych układów. Dla układu z przetwornicą MCP1640 zasilanie zrealizowano z baterii alkalicznej AAA, w przypadku układu z przetwornicą MAX1796 wszystkie pomiary zrealizowano z zasilaniem za pomocą pojedynczego akumulatora NiMn o pojemności 2500 mAh. Pomiary prądu i napięcia wykonano przy użyciu multimetrów BM 859 CF i BM 857. Wykorzystano również aparat fotograficzny wykonujący zdjęcia w 15 - minutowych odstępach czasu, pozwalało to na usprawnienie procesu szacowania czasu świecenia LED (diod).

4.1. Wybrane wyniki pomiarów

W tabeli 1 zestawiono czasy pracy poszczególnych modułów dla ustawionych prądów pracy. Zasilanie modułu opartego o układ MCP1640 zrealizowano z pojedynczej baterii AAA. W drugim przypadku dla modułu zrealizowanego na bazie układu MAX1796 zasilanie zrealizowano z akumulatora NiMn o nominalnej pojemności 2500 mAh. Pomiary wykonywano dla dwóch skrajnych stanów pracy. Dla maksymalnego prądu diody wynoszącego 155 mA oraz przy minimalnym poborze prądu diody o wartości 15 mA.

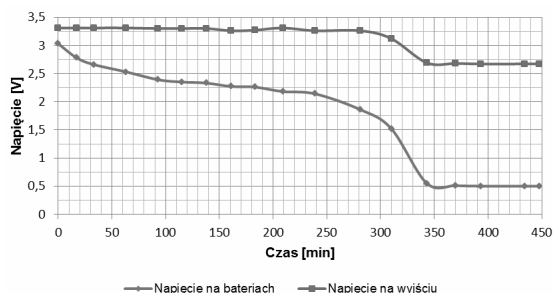
Tabela 1. Szacowane czasy pracy latarki LED w zależności od zastosowanego modułu przetwornicy

Lp.	Moduł przetwornicy	Szacowany czas do wyłączenia	Uwagi
-	-	min.	-
1.	MCP1640	160	Ustawiony prąd diod 45 mA
2.	MAX1796	195	Max. prąd diody 155 mA
3.	MAX1796	~4500	Min. prąd diody 15 mA



Rys. 5. Pomiar prądu wyjściowego w funkcji czasu dla przetwornicy MCP1640

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki pomiaru prądu wyjściowego z baterii w funkcji czasu pracy przetwornicy MCP1640 dla zasilania z dwóch baterii AAA. Rysunek 6 przedstawia wyniki pomiarów napięcia na bateriach AA oraz napięcia na wyjściu w funkcji czasu pracy dla prądu diod 45 mA.



Rys. 6. Wyniki pomiaru napięcia na wejściu i wyjściu w funkcji czasu dla przetwornicy MCP1640

W tabeli 2 zestawiono szacowane sprawności η układ dla obu rozwiązań modułów zasilania.

Tabela 2. Szacowane sprawność pracy latarki LED w zależności od zastosowanego modułu przetwornicy

Lp.	Moduł przetwornicy	Szacowana sprawność η [%]	Uwagi
-	-	[%]	-
1.	MCP1640	~60	Ustawiony prąd diod 45 mA
2	MAX1796	~80	Max. prąd diody 155 mA
3	MAX1796	~80	Min. prąd diody 15 mA

W tabeli 3 podano szacowane koszty wytworzenia modułów zasilających bez kosztów diod świecących.

Tabela 3. Porównanie kosztów i czasów pracy w zastosowanych układach przetwornic DC / DC

L p.	Moduł przetwornicy	Szacowany koszt wykonania [PLN]	Szacowany czas pracy na jednej baterii [min]	Uwagi
-	-	[PLN]	[min]	-
1.	MCP1640	4,0	160	Ustawiony prąd diod 45 mA
2	MAX1796	9,5	195	Max. prąd diody 155 mA
			~4500	Min. prąd diody 15 mA

EXAMPLE CONCEPTS OF MODULE SUPPLY CIRCUITS FOR LED FLASHLIGHT

In the paper, several concepts for supply system for LED flashlight are discussed. The aim of proposed solutions is to optimize energy consumption and thereby lengthen the time of operation without battery changes. Most popular methods of LED supply are presented and discussed, as direct supply current control and current pulse width modulation. Two circuit for LED flashlight are presented. First is based on MCP1640 integrated DC-DC converter. The circuit printed board is intended to be installed in the battery container of LED flashlight in a place of one of three batteries. Two batteries that left are sufficient to supply the flashlight. The second circuit contains DC-DC integrated converter MAX1796 and PWM current control circuit that allows to control LED intensity of light. The circuit could be powered with one 1,5 V battery and its small dimensions allow to build it into flashlight casing. Both solutions were tested and proved their usefulness. They allow to reduce battery power consumption and extend working hours and reduce costs.

Keywords: LED flashlight, DC-DC converter.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Stawiane w pracach cele pozwoliły na porównanie dwóch typów rozwiązań aplikacyjnych, które mogą być zastosowane w konstrukcjach latarek LED. Obydwie konstrukcje zapewniają możliwość bardziej efektywnego wykorzystania dysponowanym źródłem zasilania w stosunku do układów z zasilaniem bezpośrednim. W przypadku modułu zasilania opartego o układ MAX1796 uzyskano dodatkowo możliwość sterowania generowanym strumieniem świetlnym, jednakże podnosi to koszt wykonania układu prawie dwukrotnie w stosunku do modułu zasilającego opartego o układ MCP1640. Równocześnie sprawność modułu opartego o układ MCP1640 jest zdecydowanie niesatysfakcjonująca i poniżej oczekiwań, i wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań. Podobne problemy nie ujawniają się w drugiej aplikacji. Zdaniem autorów obydwie koncepcje rozwiązania modułów zasilających są sobie równoważne i mają potencjał rozwojowy ukryty w możliwościach zastosowania nowych bardziej energooszczędnych układów sterujących oraz w możliwości zaaplikowania przetwornic DC / DC o wyższych częstotliwościach przetwarzania i niższych napięciach wejściowych. Dodatkowo nowe rozwiązania przetwornic dysponują zdecydowanie elastyczniejszymi metodami sterowania pozwalając zaaplikować różnorodne funkcje do układów latarek LED (np.: nadawanie świetlnego sygnału S.O.S).

6. BIBLIOGRAFIA

- Hejke B.: Praca Dyplomowa Inżynierska, Układ optymalizacji zużycia energii latarki LED, Gdańsk 2016
- Jesionek S.: Praca Dyplomowa Inżynierska, Moduł zasilający dla latarek LED, Gdańsk 2016
- Richard C. Dorf: *The Energy Factbook*, McGraw-Hill, 1981
- Horowitz P., Hill W.: *Sztuka Elektroniki*, WKiŁ, Warszawa, 2014, s. 41-42.
- Traczyk W. Z.: *Fizjologia człowieka z elementami fizjologii klinicznej*, PZWL, Warszawa 1980.
- Pulse width modulation, <http://fab.cba.mit.edu/classes/961.04/topics/pwm.pdf>, (data dostępu: 15.11.2016 r.).
- Nota katalogowa układu MCP1640, <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22234B.pdf> (data dostępu 07.12.2016 r.).
- Nota katalogowa układu MAX1797, <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX1795-MAX1797.pdf> (data dostępu: 15.11.2016 r.).