

Wstępna analiza możliwości wykorzystania światła odbitego od Księżycy w celu poprawy efektywności energetycznej oświetlenia drogowego.

Streszczenie Artykuł porusza temat możliwości wykorzystania światła pochodzącego od Księżycy w celu poprawy efektywności energetycznej oświetlenia drogowego. W publikacji opisano poziomy natężenia oświetlenia na powierzchni Ziemi, pochodzące od światła odbitego od Księżycy i poziomy luminancji Księżycy

Abstract. The article discusses the possibility of using light from the Moon to improve the energy efficiency of road lighting. The paper describes the illuminance levels on Earth's surface, resulting from light reflected from the Moon and the luminance levels of the Moon. (Preliminary analysis of the possibility of using reflected light from the Moon to improve the energy efficiency of road lighting).

Słowa kluczowe: oświetlenie dróg, natężenie oświetlenia, niebo nocne

Keywords: road lighting, illuminance, night sky

Wstęp

Zagadnienie poprawy efektywności energetycznej jest w ostatnich latach jednym z ważniejszych aspektów rozważanych przez państwa Unii Europejskiej. Nowelizacje norm oraz rozporządzeń prawnych mają za zadanie skupić uwagę społeczeństwa na problemie nadmiernego zużycia energii oraz zachęcić do podjęcia wysiłku jego ograniczenia.

Na Świecie ponad 4,3% a w Polsce około 7% całkowitego rocznego zużycia energii elektrycznej jest wykorzystywane na potrzeby oświetlenia dróg i ulic [12, 13]. W celu stworzenia wydajnego energetycznie systemu oświetleniowego stosuje się nowoczesne energooszczędne źródła światła, bądź systemy sterowania oprawami. Wciąż jednak niedoceniane są naturalne źródła światła, takie jak promieniowanie słoneczne, które w nocy dociera do Ziemi jako światło odbite od powierzchni Księżycy.

Celem niniejszej pracy jest określenie możliwości wykorzystania światła odbitego od Księżycy, w celu poprawy efektywności energetycznej oświetlenia terenów zewnętrznych. W pierwszej części referatu przedstawiono najważniejsze regulacje prawne z zakresu oświetlenia obszarów zewnętrznych i efektywności energetycznej. Ponadto opisano ruch Księżycy po nieboskłonie oraz przedstawiono poziomy natężenia oświetlenia od światła emitowanego przez Księżyc w podstawowych fazach na powierzchni Ziemi. W analizie uwzględniono równomierny rozsył strumienia świetlnego emitowanego z powierzchni Księżycy.

Przepisy prawne dotyczące efektywności energetycznej i oświetlenia obszarów zewnętrznych

Poprawnie zaprojektowane oświetlenie drogowo ma za zadanie zapewnić właściwe warunki obserwacji sytuacji panującej na drodze dla wszystkich uczestników ruchu. Wymagania oświetleniowe dla terenów zewnętrznych, dróg i ulic zostały przedstawione w pięcioczęściowej Polskiej Normie PN-EN 13201:2016:

- PKN-CEN/TR 13201-1:2016 Oświetlenie dróg. Część 1: Wybór klas oświetlenia [1],
- PN-EN 13201-2:2016 Oświetlenie dróg. Część 2: Wymagania oświetlenia [2],
- PN-EN 13201-3:2016 Oświetlenie dróg. Część 3: Obliczenia parametrów oświetleniowych [3],
- PN-EN 13201-4:2016 Oświetlenie dróg. Część 4: Metody pomiarów parametrów oświetlenia [4].

- PN-EN 13201-5:2016 Oświetlenie dróg. Część 5: Wskaźniki efektywności energetycznej [5].

W normie [2] opierając się o potrzeby wzrokowe uczestników ruchu, wymagania fotometryczne, rodzaje powierzchni dróg i otoczenie danego terenu, zdefiniowano siedem klas oświetleniowych: M, C, P, HS, SC i EV. W poniższej tabeli opisano klasy oświetleniowe w zależności od obszaru ich zastosowania.

Tabela 1 Klasy oświetleniowe i obszary ich zastosowania

Klasa oświetleniowa	Obszar zastosowania
M	Drogi o ruchu motorowym (dopuszczalne średnie i duże prędkości ruchu)
C	Drogi o ruchu motorowym (powierzchnie konfliktowe, np. skrzyżowania, rondo) oraz drogi dla pieszych i rowerzystów (np. przejścia dla pieszych)
P	Drogi dla pieszych i rowerzystów (np. chodniki, drogi dla rowerów, pasy postojowe)
HS	
SC	Oświetlenie publiczne (do identyfikacji osób i przedmiotów) oraz powierzchnie drogowe o wyższym ryzyku złamania przepisów
EV	Konieczność widzenia powierzchni pionowych (np. punkty poboru opłat na autostradach)

Poszczególne klasy opisywane są przez różne parametry oświetleniowe. W przypadku klas M wymagania określone są na podstawie luminancji nawierzchni drogi (L), dla klas C, P i HS głównym parametrem jest poziome natężenie oświetlenia (E), z kolei w klasach SC rozpatruje się półcylicydryczne natężenie oświetlenia (E_{sc}), a w klasach EV pionowe natężenie oświetlenia (E_v). Wymagania dla wybranej klasy oświetleniowej zostały przedstawione w tabeli 2.

Tabela 2 Klasy oświetlenia C [2]

Klasa	Poziome natężenie oświetlenia	
	E_m [lx] (eksploatacyjne minimum)	U_0 (minimum)
C0	50	0,40
C1	30	0,40
C2	20	0,40
C3	15	0,40
C4	10	0,40
C5	7,5	0,40

W zeszłym roku wprowadzono dodatkowe regulacje z zakresu efektywności energetycznej oświetlenia drogowego. W normie [5] przedstawiono metody obliczania wskaźników charakterystyki energetycznej takich jak wskaźnik gęstości mocy, czy wskaźnik rocznego zużycia energii na potrzeby urządzeń oświetlenia drogowego.

Wymagania dla terenów zewnętrznych, dotyczące minimalnego eksploatacyjnego poziomu natężenia oświetlenia (E_m), maksymalnej dopuszczalnej wartości oślnienia (GR_L), równomierności oświetlenia (U_0) oraz wskaźnika oddawania barw (R_a) zostały określone w Polskiej Normie PN-EN 12464-2: 2014 Światło i oświetlenie. Oświetlenie miejsc pracy. Część 2: Miejsca pracy na zewnątrz [6]. W tabeli 3 przedstawiono wymagania oświetleniowe dla ogólnych stref ruchu w miejscach pracy na zewnątrz.

Tabela 3 Wymagania oświetleniowe dla ogólnych stref ruchu w miejscach pracy na zewnątrz [6]

Typ strefy, zadania lub czynności	E_m [lx]	U_0	GR_L	R_a
Drogi wyłącznie dla pieszych	5	0,25	50	20
Strefy ruchu dla wolno poruszających się pojazdów (max. 10 km/h), np. rowery, samochody ciężarowe i koparki	10	0,40	50	20
Normalny ruch pojazdów (max. 40 km/h)	20	0,40	45	20
Przejścia dla pieszych, zawracanie pojazdów, punkty załadunku i rozładunku pojazdów	50	0,40	50	20

W celu poprawy efektywności energetycznej oświetlenia drogowego wprowadzono dwie dyrektywy:

- Dyrektywę 2006/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 5 kwietnia 2006 r. w sprawie efektywności końcowego wykorzystania energii i usług energetycznych [7],
- Dyrektywę 2005/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 6 lipca 2005 r. ustanawiającą ogólne zasady ustalania wymogów dotyczących ekoprojektu dla producentów wykorzystujących energię [8].

Niniejsze regulacje prawne mają za zadanie zachęcić producentów, wykonawców, projektantów, a także inwestorów do zwrócenia szczególnej uwagi na problem nadmiernego zużycia energii elektrycznej oraz do podjęcia próby zwiększenia efektywności energetycznej oświetlenia drogowego.

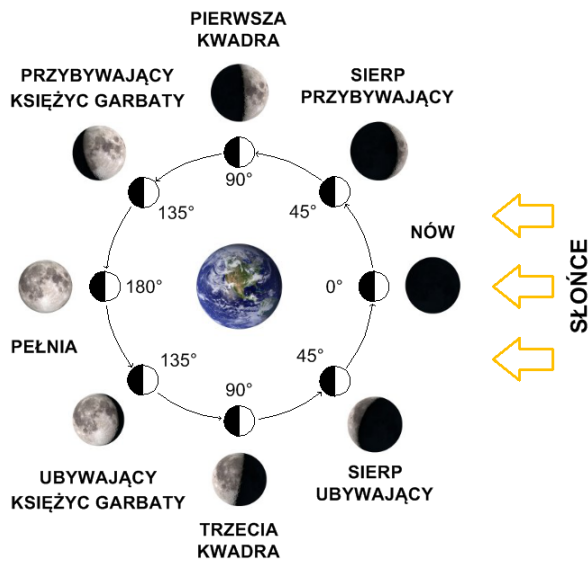
Charakterystyka ruchu i faz Księżyca

Księżyc, jako naturalny satelita Ziemi, krąży po orbicie eliptycznej wokół planety. Jego pełen obieg trwa 27,3 doby, co oznacza że średnio w ciągu jednej doby Księżyc pokonuje odległość 13,18° z prędkością 1,023 km/s.

Widoczność Księżyca z powierzchni Ziemi zależy od wzajemnego położenia Księżyca, Ziemi i Słońca, gdyż Księżyc jako ciało ciemne nie świeci własnym światłem, a jedynie odbija promieniowanie słoneczne. Zależnie od kąta padania promieniowania i miejsca w którym znajduje się Księżyc względem pozostałych ciał niebieskich, wyróżnić można kilka faz Księżyca (rys. 1).

Nów, czyli moment w którym z powierzchni Ziemi nie da się zauważyć Księżyca, następuje w chwili kiedy Księżyc znajduje się w linii prostej pomiędzy Słońcem a Ziemią. Po około siedmiu dobach następuje pierwsza kwadra, podczas której widoczna jest połowa Księżyca. W połowie obiegu, kiedy Ziemia znajduje się między swoim naturalnym satelitą a Słońcem, Księżyc jest w pełni, po czym stopniowo zmniejsza się jego widoczność aż do kolejnego nowiu. Cały taki cykl nazywany jest miesiącem synodycznym i trwa

29,53 doby. W tabeli 4 przedstawiono widoczność oraz fazy Księżyca w marcu 2017 roku.



Rys. 1 Fazy Księżyca

Tabela 4 Widoczność oraz fazy Księżyca w marcu 2017 r. [9]

Dzień	Widoczność [%]	Faza
1 marzec 2017	7%	
2 marzec 2017	14%	
3 marzec 2017	23%	
4 marzec 2017	33%	
5 marzec 2017	50%	Pierwsza kwadra
6 marzec 2017	56%	
7 marzec 2017	67%	
8 marzec 2017	77%	
9 marzec 2017	86%	
10 marzec 2017	92%	
11 marzec 2017	97%	
12 marzec 2017	100%	Pełnia
13 marzec 2017	99%	
14 marzec 2017	98%	
15 marzec 2017	94%	
16 marzec 2017	89%	
17 marzec 2017	82%	
18 marzec 2017	74%	
19 marzec 2017	66%	
20 marzec 2017	50%	Trzecia kwadra
21 marzec 2017	47%	
22 marzec 2017	37%	
23 marzec 2017	28%	
24 marzec 2017	19%	
25 marzec 2017	12%	
26 marzec 2017	6%	
27 marzec 2017	2%	
28 marzec 2017	0%	Nów
29 marzec 2017	1%	
30 marzec 2017	5%	
31 marzec 2017	11%	

Powierzchnia pozorna tarczy Księżyca

Ze względu na to, że orbita po której przemieszcza się Księżyc jest orbitą eliptyczną, odległość satelity od Ziemi zmienia się. Moment, w którym Księżyc znajduje się najbliżej Ziemi nazywany jest perygeum, a ten w którym jest najbardziej oddalony – apogeum. Wraz ze zmianą odległości zmienia się również, widziana z Ziemi kątowa średnica Księżyca.

Wielkość kątowa definiowana jest jako kąt pomiędzy dwiema krawędziami widzianego obiektu z wierzchołkiem w miejscu znajdowania się obserwatora. Na podstawie wzoru

(1) oraz danej średnicy i odległości Księżyca od Ziemi, można obliczyć wielkość kątową widzianego w danym dniu satelity.

$$(1) \quad \theta = 2 \arcsin\left(\frac{0,5d}{r}\right)$$

gdzie: d – średnica obserwowanego obiektu, r – odległość obiektu od obserwatora.

W ciągu całego roku wartości średnicy kątowej tarczy Księżyca widzianego z Ziemi, oscylują w granicach od $0^{\circ}29'55''$ do $0^{\circ}33'28''$. Na podstawie przykładowych obliczeń wykonanych dla miesiąca marca 2017 roku, wielkość kątowa Księżyca największą wartość $0^{\circ}32'49''$ osiągnęła 30 marca, a najmniejszą $0^{\circ}29'31''$ 18 marca.

Obserwowana wielkość gwiazdowa

W technice świetlnej obserwowana jasność obiektów opisywana jest za pomocą, wyrażonej w kandelach na metr kwadratowy, luminancji. W astronomii natomiast parametr ten zastępuje, tak zwana wielkość gwiazdowa – magnitudo, opisywana poniższym wzorem [10]:

$$(2) \quad m = 0,987(-2,5 \log B) - 12,91^2$$

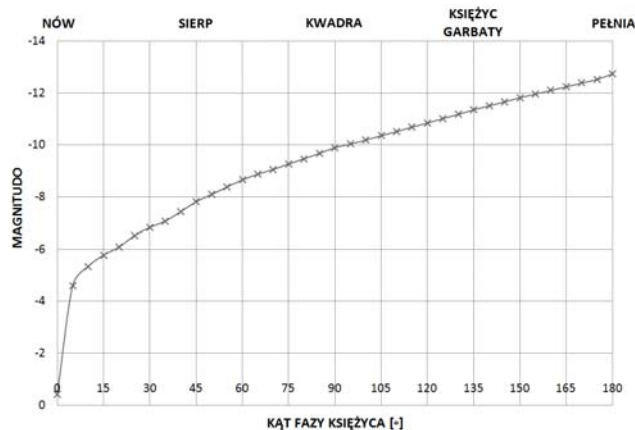
gdzie: m – jasność obserwowana gwiazdy, B – współczynnik względnej jasności.

Tabela 5 Współczynnik względnej jasności zależnie od kąta fazy Księżyca oraz wartości obserwowanej wielkości gwiazdowej.

Faza Księżyca	Kąt fazy Księżyca [°]	Współczynnik B	Obserwowana wielkość gwiazdowa m [mag]
Nów	0°	0,000	-0,403
	5°	0,0005	-4,595
	10°	0,0010	-5,338
	15°	0,0015	-5,772
	20°	0,002	-6,080
Sierp	25°	0,003	-6,515
	30°	0,004	-6,823
	35°	0,005	-7,062
	40°	0,007	-7,423
	45°	0,010	-7,805
	50°	0,013	-8,086
	55°	0,017	-8,374
	60°	0,022	-8,650
	65°	0,027	-8,869
	70°	0,032	-9,051
Kwadra	75°	0,039	-9,263
	80°	0,047	-9,463
	85°	0,057	-9,670
	90°	0,070	-9,890
	95°	0,080	-10,033
	100°	0,092	-10,183
	105°	0,108	-10,355
	110°	0,125	-10,512
	115°	0,147	-10,685
	120°	0,170	-10,841
Księżyc garbaty	125°	0,200	-11,015
	130°	0,232	-11,174
	135°	0,274	-11,353
	140°	0,316	-11,505
	145°	0,364	-11,657
	150°	0,422	-11,815
	155°	0,482	-11,958
	160°	0,550	-12,099
	165°	0,626	-12,238
	170°	0,715	-12,381
Pełnia	175°	0,818	-12,525
	180°	1,000	-12,740

W tabeli 5 przedstawiono wartości współczynnika względnej jasności zależnie od kąta fazy Księżyca [10] oraz wyniki obliczeń obserwowanej wielkości gwiazdowej magnitudo.

Dodatkowo wykreślono zależność zmiany jasności obserwowanej od kąta fazy Księżyca (rys. 2). Wartość magnitudo swoją najniższą wartość osiąga przy pełni Księżyca, natomiast podczas nowiu jest bliska zeru.



Rys. 2 Jasność obserwowana zależnie od kąta fazy Księżyca

Tabela 6 Natężenie oświetlenia na powierzchni Ziemi oraz luminancja powierzchni Księżyca w marcu 2017 roku.

Faza Księżyca	Dzień	Natężenie oświetlenia E [lx]	Luminancja L [cd/m ²]	
Nów	1 marzec 2017	0,001603	0,00060	
	2 marzec 2017	0,003177	0,00012	
	3 marzec 2017	0,006918	0,00026	
I Kwadra	4 marzec 2017	0,010009	0,00038	
	5 marzec 2017	0,017701	0,00068	
	6 marzec 2017	0,024729	0,00095	
	7 marzec 2017	0,033266	0,00127	
	8 marzec 2017	0,052048	0,00199	
	9 marzec 2017	0,070729	0,00270	
	10 marzec 2017	0,110357	0,00422	
	11 marzec 2017	0,145613	0,00556	
Pełnia	12 marzec 2017	0,214981	0,00822	
	13 marzec 2017	0,299226	0,01144	
	14 marzec 2017	0,214981	0,00822	
	15 marzec 2017	0,145613	0,00556	
	16 marzec 2017	0,095940	0,00367	
	17 marzec 2017	0,070729	0,00270	
	18 marzec 2017	0,052048	0,00199	
	19 marzec 2017	0,033266	0,00127	
	III Kwadra	20 marzec 2017	0,024729	0,00095
		21 marzec 2017	0,014629	0,00056
22 marzec 2017		0,010009	0,00038	
23 marzec 2017		0,006918	0,00026	
24 marzec 2017		0,003177	0,00012	
25 marzec 2017		0,001603	0,00006	
Nów	26 marzec 2017	0,000649	0,00002	
	27 marzec 2017	0,000327	0,00001	
	28 marzec 2017	0,000165	0,00001	
	29 marzec 2017	0,000488	0,00002	
	30 marzec 2017	0,001286	0,00005	
	31 marzec 2017	0,002235	0,00009	

Korzystając z zależności (3), przedstawione w tabeli 5 wartości magnitudo, można przeliczyć na natężenie oświetlenia.

$$(3) \quad E = 10^{\frac{m+14,05}{-2,5}}$$

Zakładając, że powierzchnia Księżyca odbija promieniowanie słoneczne zgodnie z prawem Lamberta, wartość luminancji można obliczyć na podstawie wzoru (4).

$$(4) \quad L = \frac{\rho}{\pi} E$$

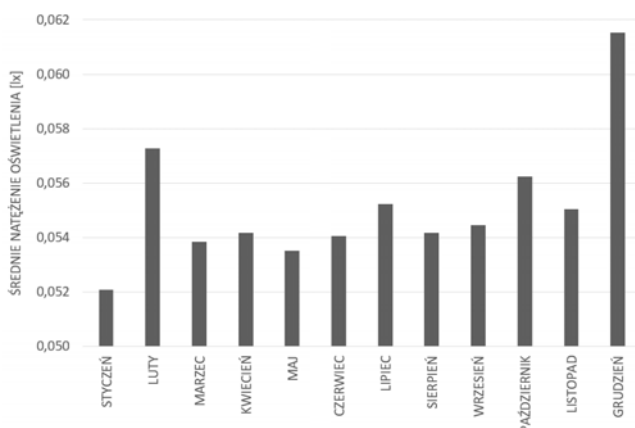
gdzie: ρ – współczynnik odbicia.

Analiza poziomu natężenia oświetlenia światła odbitego od powierzchni Księżyca na powierzchni Ziemi

Analizę poziomu natężenia oświetlenia światła odbitego od powierzchni Księżyca, wykonano dla całego 2017 roku. Obliczenia wykonano dla godziny 1:00 każdego dnia roku.

Kąt fazy Księżyca określono na podstawie danych udostępnionych przez [9]. Następnie na podstawie zależności (3) i (4) oraz przedstawionych w tabeli 5 wartości współczynnika względnej jasności, określono wartości natężenia oświetlenia na powierzchni Ziemi oraz luminancji powierzchni Księżyca dla poszczególnych dni miesiąca marca (tabela 6).

Według powyższych danych w marcu 2017 roku, średnie natężenie oświetlenia pochodzące od Księżyca wyniosło 0,054 lx, natomiast poziom średniej luminancji na powierzchni ziemskiego satelity, był równy 0,002 cd/m².



Rys. 3 Średnie wartości natężenia oświetlenia na powierzchni Ziemi w roku 2017.

Wartości średniego natężenia oświetlenia w roku 2017 (rys. 3) oscylują pomiędzy 0,052 lx a 0,062 lx, natomiast średnia dla całego roku wynosi 0,055 lx, średnia roczna luminancja powierzchni Księżyca to około 0,002 cd/m².

Porównując otrzymane wyniki z wymaganiami wartościami natężenia oświetlenia, przedstawionymi w tabeli 3, można zauważyć że światło odbite od Księżyca zapewnia jedynie 0,6% koniecznego natężenia dla stref ruchu wolno poruszających się pojazdów, a przy przejściach dla pieszych jest to jedynie 0,1%. Obliczenia obejmują wyłącznie luminancję samej tarczy Księżyca. Nie uwzględniono w analizie emisji koronowej oraz światła emitowanego przez gwiazdy oraz pominięto luminancję nieboskłonu w wyniku zanieczyszczenia światłem.

Wartości te wydają się niewielkie, jednakże porównując otrzymane rezultaty z całorocznymi pomiarami jasności nieba nocnego, wykonanymi między innymi przez autorów artykułu "Oświetlenie gruntu przez zanieczyszczone światłem niebo nocne" [11], można zauważyć, że sam Księżyc nie jest jedynym, ani najważniejszym źródłem światła w porze nocnej. Według badań w centralnych dzielnicach Krakowa wartość luminancji w okresie zimowym wahała się pomiędzy 0,43 a 0,48 cd/m², w miarę oddalania się od miasta wartości malały do 0,07 – 0,08 cd/m², co jest

już znacznie wyższym wynikiem niż ten otrzymany przy rozważaniach teoretycznych.

Podsumowanie

Wykonane w niniejszym artykule obliczenia są wstępna analizą świadcząca o tym, że możliwe jest wykorzystanie naturalnego światła do oświetlenia dróg i terenów zewnętrznych. Adaptacja oświetlenia drogowego, światła pochodzącego od Księżyca i nieba nocnego ale też wykorzystanie istniejącej iluminacji obiektów, czy też warunków środowiskowych, wpływających na odbicie i rozproszenie światła może pomóc w ograniczeniu zużycia energii, a jednocześnie wpłynąć na zmniejszenie zanieczyszczenia atmosfery światłem sztucznym.

Dogłębna analiza warunków atmosferycznych, iluminacji miejskiej oraz naturalnego nocnego światła może pozwolić na rozwinięcie tematyki poprawy efektywności energetycznej oświetlenia zewnętrznego oraz zmniejszenie efektu zanieczyszczenia światłem.

Artykuł został zrealizowany w Katedrze Elektroenergetyki Fotoniki i Techniki Świetlnej Politechniki Białostockiej w ramach pracy statutowej S/WE/4/2013 oraz w ramach pracy MB/WE/5/2017 finansowanych ze środków MNiSW.

Autorzy: mgr inż. Magdalena Sielachowska, Politechnika Białostocka, Katedra Elektroenergetyki, Fotoniki i Techniki Świetlnej, E-mail: m.sielachowska@doktoranci.pb.edu.pl
dr hab. inż. Maciej Zajkowski, prof. nzw. w PB, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki Fotoniki i Techniki Świetlnej, ul. Wiejska 45D/124, 15-351 Białystok e-mail: m.zajkowski@pb.edu.pl

LITERATURA

- [1] PKN-CEN/TR 13201-1:2016 Oświetlenie dróg. Część 1: Wybór klas oświetlenia.
- [2] PN-EN 13201-2:2016 Oświetlenie dróg. Część 2: Wymagania oświetlenia.
- [3] PN-EN 13201-3:2016 Oświetlenie dróg. Część 3: Obliczenia parametrów oświetleniowych.
- [4] PN-EN 13201-4:2016 Oświetlenie dróg. Część 4: Metody pomiarów parametrów oświetlenia.
- [5] PN-EN 13201-5:2016 Oświetlenie dróg. Część 5: Wskaźniki efektywności energetycznej.
- [6] Polska Norma PN-EN 12464-2:2014. Światło i oświetlenie. Oświetlenie miejsc pracy. Część 2: Miejsca pracy na zewnątrz.
- [7] Dyrektywa 2006/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 5 kwietnia 2006 r. w sprawie efektywności końcowego wykorzystania energii i usług energetycznych [6].
- [8] Dyrektywa 2005/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 6 lipca 2005 r. ustanawiająca ogólne zasady ustalania wymogów dotyczących ekoprojektu dla producentów wykorzystujących energię
- [9] NASA Scientific Visualization Studio, <https://svs.gsfc.nasa.gov/4537> [dostęp 7.05.2017]
- [10] Shevchenko V. V., Fundamental photometric constants of the moon in the true full-moon system, *Soviet Astronomy*, 24 (1980), nr 6, 772-773
- [11] Kubala M., Ścieżor T., Oświetlenie gruntu przez zanieczyszczone światłem niebo nocne, *Interdyscyplinarne zagadnienia w inżynierii i ochronie środowiska 2* (2012), 301-308.
- [12] Pracki P., Analiza zapotrzebowania na energię do oświetlenia drogowego przy zmiennym natężeniu ruchu, *Przegląd Elektrotechniczny* (2014), nr 4, 104-107
- [13] Grzonkowski J., Energooszczędność oświetlenia w Polsce. Rzeczywistość roku 2014. Fakty i złudzenia, *SEP INPE* (2014), nr 179, 17-25