

Weryfikacja metody obliczania odbłyśników opraw oświetleniowych

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących obliczania kształtu zwierciadlanego odbłyśnika, który zapewnia uzyskanie na zadanej powierzchni rozkładu natężenia oświetlenia o założonej równomierności. Obliczenia wykonano z wykorzystaniem optymalizacji opierającej się na algorytmie genetycznym. Wykonana z zastosowaniem technik skanowania i wydruku 3D weryfikacja potwierdza przydatność opracowanych metod obliczania i optymalizacji odbłyśników opraw oświetleniowych.

Abstract. There are presented research results that concern of calculation of mirror reflector that is using for obtaining the highest value of average illumination and uniformity ratio on the illuminated surface. The genetic algorithm optimization method with linear inequality constraints was used. Using the techniques of scanning and 3D printing verification was carried out, which confirmed the suitability of the developed methods for calculating and optimizing reflector luminaires. (**Verification the method of calculation luminaires reflectors.**)

Słowa kluczowe: obliczanie opraw oświetleniowych, optymalizacja, metoda śledzenia promienia.

Keywords: calculation of luminaires, optimization, ray tracing method.

doi:10.12915/pe.2014.01.73

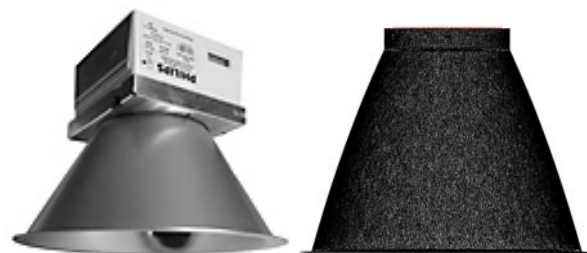
Wstęp

Artykuł zawiera opis wyników badań, w których wykorzystano algorytm genetyczny do obliczania kształtu odbłyśnika zwierciadlanego zapewniającego uzyskanie jak największej wartości natężenia oświetlenia na zadanej powierzchni przy założonym poziomie równomierności oświetlenia [1, 2]. Obliczanie parametrów fotometrycznych oprawy oświetleniowej dla przyjętego w danej iteracji modelu elementów optycznych wykonywane jest z zastosowaniem oryginalnej techniki obliczeniowej wykorzystującej metodę śledzenia promieni [3]. Weryfikację dokładności metody obliczeniowej przeprowadzono wykorzystując technologie skanowania oraz wydruku 3D.

Weryfikacja dokładności metody obliczeniowej za pomocą techniki skanowania 3D

Do obliczeń wielkości fotometrycznych (światłość, natężenie oświetlenia) zastosowano autorską metodę wykorzystującą algorytm śledzenia promienia zaimplementowany w systemie Radiance [4]. Metoda ta została opisana w kilku publikacjach [3], gdzie przedstawiono wyniki obliczeń opraw oświetleniowych z elementami optycznymi o różnych właściwościach fotometrycznych. Weryfikację metody obliczeniowej przeprowadzono wykonując dwie, następujące operacje:

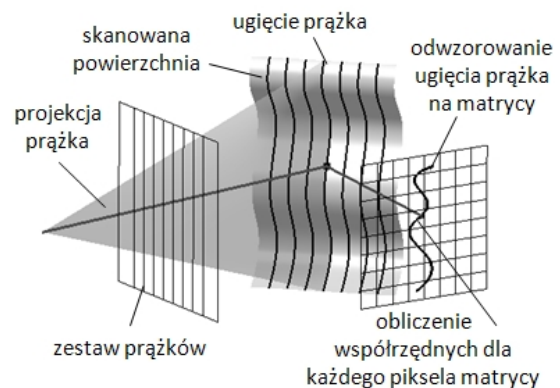
1. Pomiary krzywej światłości odbłyśnika ACL z modułem Fortimo LED DLM 2000 (rys. 1).
2. Skanowanie 3D odbłyśnika ACL i stworzenie komputerowego modelu odbłyśnika i modułu LED. Obliczenie krzywej światłości modelu oprawy oświetleniowej z odbłyśnikiem za pomocą opracowanej metody śledzenia promieni.



Rys.1. Odbłyśnik ACL z modułem Fortimo oraz komputerowy model odbłyśnika stworzony za pomocą skanowania 3D

Skanowanie optyczne światłem strukturalnym jest jedną z bezstykowych metod pomiarów współrzędnościowych.

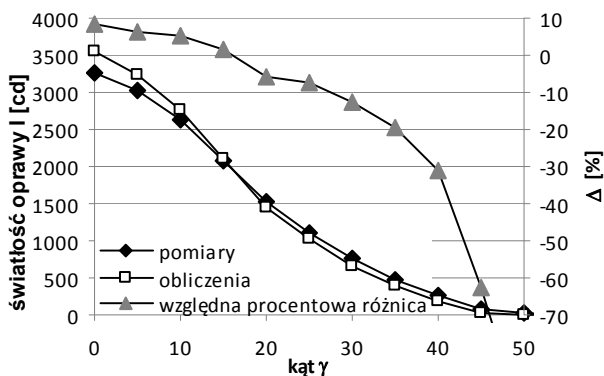
Obok skanowania laserowego oraz tomografii, skanowanie z wykorzystaniem światła strukturalnego jest jedną z najczęściej wymienianych w literaturze i stosowanych w przemyśle technik nie wymagających kontaktu pomiędzy mierzonym obiektem a elementami systemu pomiarowego. Zasada działania skanera prążkowego została przedstawiona na rysunku 2.



Rys.2. Zasada działania skanera wykorzystującego światło strukturalne

Bezpośrednim wynikiem procesu skanowania jest chmura punktów. Na jej podstawie uzyskuje się siatkę trójkątów, w procesie tzw. triangulizacji (w pierwszym etapie następuje łączenie punktów odcinkami, wynikowe odcinki zostają połączone w trójkąty). Oprogramowanie skanera przeprowadza ten proces na bieżąco, tworząc tymczasową, pomocniczą siatkę ułatwiającą ocenę postępów procesu skanowania. Właściwa siatka trójkątów jest tworzona już po zakończeniu procesu skanowania [5]. W wyniku skanowania otrzymano model odbłyśnika składający się z 51746 powierzchni płaskich (trójkątów). Dane otrzymane w procesie skanowania przedstawiono na rysunku 1.

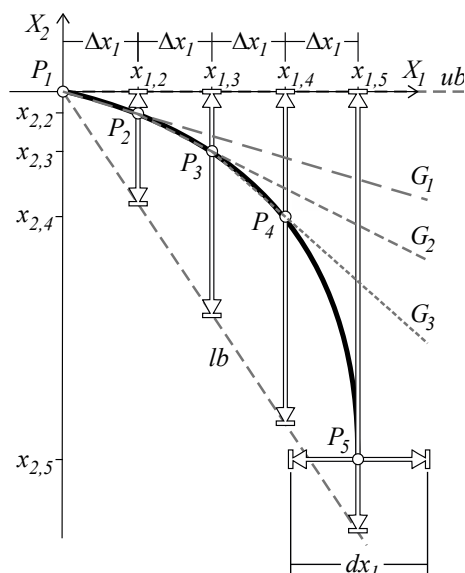
Na rysunku 3 przedstawiono porównanie wyników pomiarów z wynikami obliczeń. Krzywe światłości uzyskane z pomiarów oraz w wyniku procesu symulacji mają bardzo podobny przebieg. Tylko lokalnie, przy małych wartościach światłości względna różnica wzrasta do 30%. Różnica, pomiędzy obliczonymi z uzyskanych krzywych wartościami strumienia świetlnego wynosi 4,3%.



Rys.3. Porównanie wyników pomiarów krzywej światłości z wynikami obliczeń przeprowadzonymi z zastosowaniem metody śledzenia promienia dla komputerowego modelu oprawy oświetleniowej

Model odbłyśnika

Profil odbłyśnika opisany jest za pomocą wielomianu interpolacyjnego Hermite'a z ochroną kształtu wykorzystującą metodę Fritsch'a i Carlson'a [2, 6]. Punkty P_1, P_2, P_3, P_4 i P_5 (rys. 4) stanowią węzły interpolacji, przez które przechodzi krzywa opisująca profil odbłyśnika. Algorytm optymalizacji w kolejnych krokach, które mają prowadzić do znalezienia minimum funkcji celu zmienia wartości zmiennej decyzyjnej C_i (odpowiednie współrzędne punktów $P_2 \neq P_3$). Punkt P_1 nie zmienia swojego położenia, podczas gdy pozostałe cztery punkty zmieniają zarówno położenia w osi X_2 ($x_{2,i}$) jak również w osi X_1 ($x_{1,i}$). Działanie algorytmu optymalizacji może prowadzić do zmiany wysokości i szerokości odbłyśnika. Ustalenie położenia węzłów interpolacji w osi X_1 dokonywane jest za pomocą jednej zmiennej dx_1 , która odpowiada za zmianę wartości współrzędnej $x_{1,5}$ punktu P_5 . Współrzędne pozostałych punktów obliczane są z uwzględnieniem jednakowego odstępu Δx_1 w osi X_1 pomiędzy kolejnymi punktami. Algorytm optymalizacji operuje na pięciu zmiennych ($x_{2,2}, x_{2,3}, x_{2,4}, x_{2,5}, dx_1$).



Rys.4. Profil odbłyśnika, ilustracja warunków ograniczających położenie węzłów interpolacji

Odbłyśnik zbudowano w ten sposób, że jego otwór górny jak i otwór dolny mają kształt kwadratu. Kształt czterech bocznych ścian jest tworzony przez krzywą profilową opisaną za pomocą wielomianu interpolacyjnego

Hermite'a. W otworze górnym umieszczony jest model tzw. modułu LED, którego parametry odpowiadają danym technicznym modułu Fortimo LED DLM 2000. Element świecący modułu stanowi powierzchnia w kształcie koła o średnicy 6 cm, którą pokryto luminoforem. Powierzchnia ta ma rozsył strumienia świetlnego prawie lambertowski [4].

Optymalizacja kształtu odbłyśnika

Algorytm genetyczny wykorzystuje trzy główne operacje na każdym etapie tworzenia nowej generacji z bieżącej populacji [7]:

- selekcja – wybór rodziców spośród osobników w danej populacji,
- krzyżowanie – łączenie rodziców, którzy tworzą osobniki dla następnego pokolenia,
- mutacja - wprowadzanie losowych zmian dla wybranych rodziców.

Zastosowano następujące rozwiązania [8]:

- reprezentacja zmiennoprzecinkowa – pozwala na przybliżenie algorytmu do przestrzeni zadania, dwa punkty leżące blisko siebie w przestrzeni reprezentacji będą także leżały blisko siebie w przestrzeni zadania,
- skalowania funkcji celu metodą nadawania rang wyrównuje punktację słabiej przystosowanych osobników przy jednoczesnym zachowaniu dużej różnorodności w populacji,
- selekcja elitarna przenosi do następnego pokolenia dwa najlepsze osobniki,
- krzyżowanie heurystyczne,
- mutacja z rozkładem Gaussa (wielkość mutacji zmniejsza się w każdym nowym pokoleniu).

Zadanie optymalizacji polegało na znalezieniu takiego kształtu odbłyśnika, który zapewni uzyskanie jak największej wartości średniego natężenia oświetlenia E_{sr} przy zachowaniu odpowiedniej równomierności oświetlenia na oświetlanej powierzchni (stosunek minimalnej wartości natężenia oświetlenia E_{min} do średniej wartości natężenia oświetlenia E_{sr}). Odbłyśnik oświetla powierzchnię w kształcie kwadratu, którego bok ma wymiar 3 metrów. Model oprawy oświetleniowej jest umieszczony na wysokości 3 m nad środkiem tej powierzchni. Optymalizację przeprowadzono dla funkcji celu w postaci (1).

$$(1) \quad F(C) = -E_{sr} + f_k$$

gdzie: f_k – funkcja kary w postaci (2):

$$(2) \quad f_k = \begin{cases} \left(50 \left(R - \frac{E_{min}}{E_{sr}} \right) \right)^2 & \text{jeżeli } \left(R - \frac{E_{min}}{E_{sr}} \right) > 0 \\ 0 & \text{inaczej} \end{cases}$$

Ponieważ algorytm optymalizacji poszukuje minimum funkcji, a w postawionym zadaniu chodzi o uzyskanie jak największej wartości natężenia oświetlenia, to w równaniu funkcji celu wstawiony został znak minus. Przyjęto, że minimalna wartość równomierności oświetlenia R ma wartość 0,7. Oznacza to, że wartość funkcji kary (2) będzie większa od zera w przypadku, gdy obliczona wartość równomierności oświetlenia będzie mniejsza od 0,7. Wszystkie wyniki, dla których równomierność oświetlenia jest większa lub równa 0,7 akceptowane są bez zastrzeżeń.

Wprowadzono następujące ograniczenia w przestrzeni zadania:

1. Ograniczenia nałożone na dziedzinę $lb \leq x_{2,i} \leq ub$:
 - mają na celu spowodowanie, że krzywa opisująca profil odbłyśnika będzie wypukła w górę, wartości

punktów $x_{2,i}$ określające współrzędne w osi X_2 mogą zmieniać się w granicach wyznaczonych przez proste ub oraz lb (rys. 4).

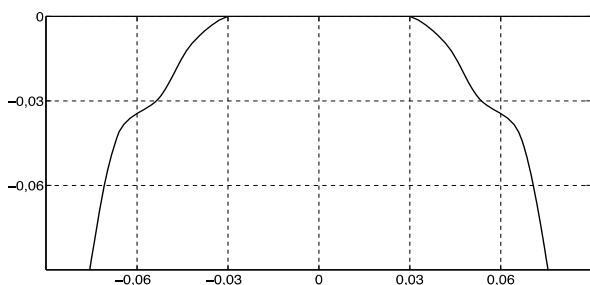
2. Ograniczenia nierównościowe $G_i(x) \leq 0$:
 - krzywa opisująca profil odbłyśnika powinna zachować monotoniczność w całym przedziale; tworzenie profilu odbłyśnika, którego krzywa nie jest monotoniczna może prowadzić do zwiększenia czasu obliczeń poprzez rozszerzenie obszaru przeszukiwania o obszar, w którym nie znajduje się optymalne rozwiązanie,
 - punkt P_3 powinien znajdować się poniżej prostej G_1 (prosta przechodzi przez punkty P_1 i P_2), punkt P_4 poniżej prostej G_2 , a punkt P_5 poniżej prostej G_3 .

Zastosowane metody obliczeniowe wykorzystują liczbę generowane losowo co powoduje, że za każdym razem uzyskiwane jest nieco inne rozwiązanie. Z tego powodu aby otrzymać wartości średnie pozwalające na statystyczną analizę wyników, dla każdego z algorytmów wykonano po dziesięć serii obliczeń (tab. 1).

Tabela 1. Zestawienie wyników obliczeń. Wartość funkcji celu $F(C)$, średnie natężenie oświetlenia E_{sr} , równomierność oświetlenia i czas wykonania obliczeń dla algorytmu z ograniczeniami i bez ograniczeń

Lp	Nazwa	Bez ograniczeń		Z ograniczeniami	
		Średni	Najlepszy	Średni	Najlepszy
1	$F(C)$	-102,3	-113,6	-95,6	-106,9
2	Odchylenie standardowe dla $F(C)$	7,4	-	7,2	-
3	E_{sr} [lx]	102,8	116,4	98,7	108,4
4	E_{min} / E_{sr}	0,72	0,67	0,71	0,60
5	Liczba iteracji	454	-	446	-
6	Czas CPU [s]	679	-	734	-
7	Liczba iteracji do czasu wykonania obliczeń	0,67	-	0,61	-

Wprowadzenie ograniczeń (tab. 1) spowodowało pogorszenie efektywności algorytmu. Wprowadzone ograniczenia powodują uzyskanie profilu odbłyśnika, który jest opisany krzywą monotoniczną. Wybór takiego kształtu odbłyśnika jest niekiedy podyktowany koniecznością spełnienia wymogów technologicznych. Jednak kiedy technologia produkcji pozwala na budowę odbłyśników, których krzywa profilowa nie jest monotoniczna to przy ich projektowaniu warto wyłączyć opcje ograniczeń aby sprawdzić czy uzyskane wtedy rozwiązanie nie okaże się lepsze.



Rys.5. Rysunek trójkrzywiznowego profilu odbłyśnika obliczonego za pomocą algorytmu bez ograniczeń

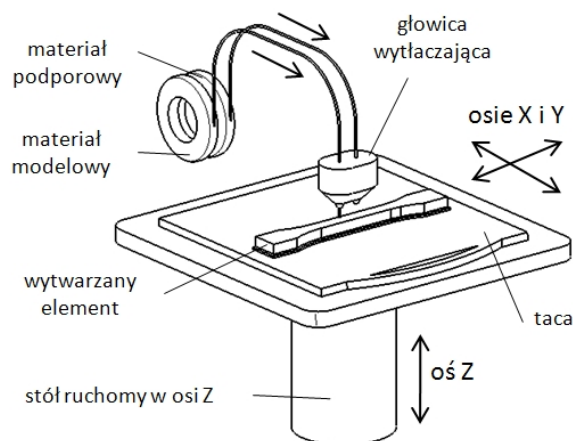
Na rysunku 5 przedstawiono profil odbłyśnika obliczony z zastosowaniem algorytmu bez ograniczeń, w serii dającej najlepszy wynik. Jest to przykład odbłyśnika trójkrzywiznowego, w którym możemy wyróżnić trzy części, każda opisana za pomocą innej krzywej. Odbłyśniki wielokrzywiznowe umożliwiają niekiedy uzyskanie lepszych wyników w stosunku do odbłyśników jednokrzywiznowych [9].

Weryfikacja dokładności metody obliczeniowej za pomocą techniki wydruku 3D

Weryfikację metody obliczeniowej przeprowadzono wykonując dwie, następujące operacje:

1. Wybranie komputerowego modelu odbłyśnika uzyskanego w wyniku działania algorytmu optymalizacji. Obliczenie krzywej światłości komputerowego modelu odbłyśnika za pomocą opracowanej metody śledzenia promieni.
2. Stworzenie za pomocą wydruku 3D prototypowego egzemplarza odbłyśnika odpowiadającego wybranemu, komputerowemu modelowi. Obróbka powierzchni odbłyśnika. Pomiary krzywych światłości prototypowego odbłyśnika z modulem Fortimo LED DLM 2000 (rys. 7).

Szybki rozwój warstwowych technologii przyrostowego wytwarzania (ang. Additive Manufacturing Technologies) oraz systemów do komputerowego wspomaganie projektowania (ang. ComputerAided Design) pozwolił na znaczne skrócenie czasu potrzebnego aby nowy wyrób trafił na rynek. Wszystkie te metody wyróżnia możliwość budowania trójwymiarowych elementów o niemal dowolnie skomplikowanej geometrii, bezpośrednio na podstawie cyfrowej reprezentacji wyrobu (modelu CAD). Nie jest przy tym wymagane stosowanie dodatkowego oprzyrządowania, a cały proces wytwórczy sprowadza się do jednej operacji technologicznej [10]. Jedną z najpowszechniej wykorzystywanych w przemyśle technik przyrostowych jest modelowanie uplastycznionym tworzywem sztucznym (ang. Fused Deposition Modeling – FDM), z pomocą której wytwarza się elementy z tworzyw termoplastycznych. Najczęściej wykorzystywanym materiałem budulcowym jest acrylonitrylo-butadieno-styren, który zapewnia względnie dobre właściwości wytrzymałościowe, a także umożliwia dalszą obróbkę wytworzonych obiektów (szlifowanie, malowanie, klejenie itp.).

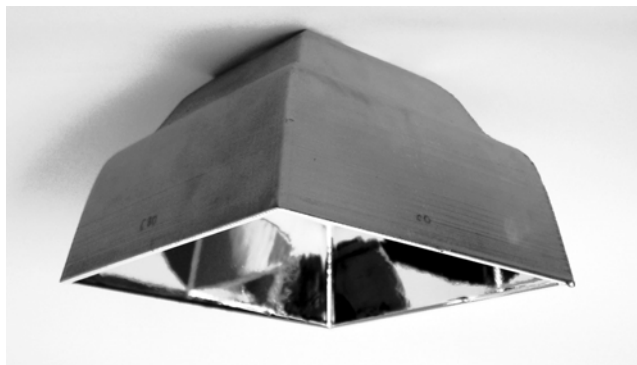


Rys.6. Schemat budowy modelu metodą FDM

Metoda FDM polega na liniowym nakładaniu uplastycznionego termoplastu, wyluczanego dyszą o małej średnicy wylotowej (na przykład dla maszyny BST 1200 zastosowanej w badaniach opisanych w tej pracy średnica dyszy wynosi 0,3mm), przez specjalnego kształtu głowicę, która może poruszać się w dwóch osiach (X oraz Y), równoległe do stołu roboczego. Po wytworzeniu geometrii w

danej warstwie, stół obniża swoją pozycję względem głowicy (oś Z urządzenia) o grubość warstwy z jaką budowany jest konkretny model. Wyłaczany materiał w kontakcie z wcześniej naniesioną warstwą momentalnie zastyga tworząc trwałe połączenie [11]. Schemat budowy modelu metodą FDM przedstawia rysunek 6.

Bezpośrednio po wydruku należy przeprowadzić postprocessing polegający na oddzieleniu modelu od tacy modelowej oraz usunięciu zbędnego materiału podporowego. Cechą charakterystyczną modeli wykonanych metodą FDM jest efekt „schodkowy” powierzchni zewnętrznych wynikający z warstwowego nakładania uplastycznionej nitki materiału. Na potrzeby badań wydrukowany model odbłyśnika został poddany dalszej obróbce polegającej na wygładzeniu powierzchni poprzez wypełnienie rowków pomiędzy nitkami specjalną masą szpachlową przeznaczoną do tworzyw sztucznych. W kolejnym etapie naddatek szpachli został usunięty poprzez szlifowanie, a cały model został pokryty farbą podkładową. Końcowe szlifowanie na mokro farby podkładowej pozwoliło na uzyskanie powierzchni odpowiednio gładkiej i przygotowanej do napylenia warstwy aluminium w komorze próżniowej. Próżniowe pokrycie gładkiej powierzchni odbłyśnika cienką warstwą aluminium tworzy efekt powłoki lustrzanej. Prototyp odbłyśnika po wykonaniu prac wykończeniowych został przedstawiony na rysunku 7.



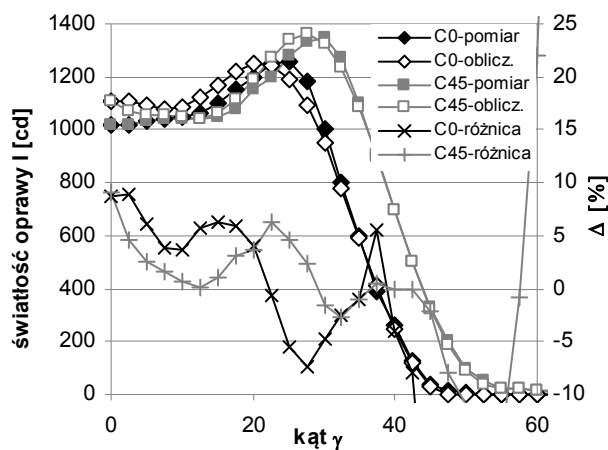
Rys.7. Fotografia prototypowego odbłyśnika wykonanego z zastosowaniem technologii wydruku 3D

Na rysunku 8 przedstawiono porównanie wyników pomiarów z wynikami obliczeń. Krzywe światłości uzyskane z pomiarów oraz w wyniku procesu symulacji mają bardzo podobny przebieg. W przedziale do 50 stopni względna procentowa różnica nie przekracza 10%. Powyżej 50 stopni błąd jest już większy, ale dotyczy on punktów o bardzo małych wartościach światłości i wynika głównie z błędów metody pomiarowej.

Wnioski

Przeprowadzone badania pokazują, że proponowana metoda optymalizacji kształtu odbłyśnika [1, 2, 3] może być również wykorzystana w przypadku postawienia zadania polegającego na uzyskaniu równomiernego rozkładu natężenia oświetlenia na zadanej powierzchni.

Wprowadzenie ograniczeń może przynosić niekorzystny skutek w postaci odrzucenia rozwiązań mogących zapewnić lepszy wynik. Jeżeli możliwości technologiczne produkcji odbłyśników pozwalają na budowę odbłyśników wielokrzywiznowych to przy obliczeniach należy wyłączyć opcję ograniczeń i sprawdzić rozwiązanie uzyskane dla odbłyśników, których krzywa profilowa nie jest monotoniczna. Weryfikacja metody obliczeniowej wykonana z zastosowaniem technik skanowania i wydruku 3D potwierdza przydatność opracowanych metod obliczania i optymalizacji odbłyśników opraw oświetleniowych.



Rys.8. Porównanie wyników pomiarów krzywej światłości prototypowego odbłyśnika z wynikami obliczeń przeprowadzonymi z zastosowaniem metody śledzenia promienia dla komputerowego modelu oprawy oświetleniowej, krzywe światłości przedstawiono w dwóch płaszczyznach C0 oraz C45, przedstawiono przebieg względnej procentowej różnicy Δ pomiędzy porównywanymi krzywymi

LITERATURA

- [1] Wandachowicz K., Antonutto G.: Optimization of rotationally symmetrical mirror reflector profile. *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 10/2010, Warszawa, Sigma-Not, PL ISSN 0033-2097, 252-256.
- [2] Wandachowicz K.: Obliczanie profilu odbłyśnika z wykorzystaniem interpolacji Hermite'a. *Materiały konferencyjne: XV Conference Computer Applications in Electrical Engineering, ZKwE'2010, Poznań, 19-21.04.2010*, 231-232.
- [3] Wandachowicz K.: Calculation of Luminaires Using Radiance. 3rd International RADIANCE Workshop. 11-12 October 2004, Ecole d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg, Switzerland
- [4] Ward Larson G., Shakespeare R.: *Rendering with Radiance*. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco (1997).
- [5] Kuczko W., Kowalski M., Zawadzki P., Wichniarek R.: „Automatyzacja procesu skanowania na podstawie danych pozyskanych z pomiarów fotogrametrycznych.”, *Postępy Nauki i Techniki*, nr 7/2011
- [6] Fritsch F. N., Carlson R. E.: Monotone Piecewise Cubic Interpolation. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 17 (1980), 238-246.
- [7] *Global Optimization Toolbox User's Guide*. The MathWorks, Inc.
- [8] Michalewicz Z.: *Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne*. WNT Warszawa 2003.
- [9] Wandachowicz K.: Optymalizacja kształtu odbłyśnika zapewniającego uzyskanie zakładanego poziomu równomierności oświetlenia. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)* 5a/2012. Warszawa, Sigma-Not. 181-183.
- [10] Pająk E., Górski F., Wichniarek R., Dudziak A., „Techniki przyrostowe i wirtualna rzeczywistość w procesach przygotowania produkcji”, wyd. Promocja 21, Poznań 2011
- [11] Kuczko W., Wichniarek R., Górski F.: „Analiza wpływu stopnia wypełnienia wyrobów wytwarzanych metodą modelowania uplastycznionym tworzywem polimerowym na ich dokładność kształtową”, *Przetwórstwo Tworzyw*, nr 5 2012

Autorzy: dr inż. Krzysztof Wandachowicz, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, Zakład Techniki Światłowej i Elektrotermii, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: Krzysztof.Wandachowicz@put.poznan.pl;
mgr inż. Wiesław Kuczko, Politechnika Poznańska, Katedra Zarządzania i Inżynierii Produkcji, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, E-mail: wieslaw.kuczko@doctorate.put.poznan.pl