

Paweł WAJSS¹
Mariusz FILIPOWICZ²
Wiktor WESOŁOWSKI³

KONCENTRACJA BEZPOŚREDNIEGO PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO W UKŁADACH NADAŻNYCH Z WYKORZYSTANIEM NIEOBRAZUJĄCYCH ELEMENTÓW OPTYCZNYCH

Niniejszy artykuł stanowi wprowadzenie w dziedzinę nieobrazujących układów optycznych wykorzystywanych w układach nadażnych za pozornym ruchem Słońca; dokonuje przeglądu aktualnego stanu wiedzy i techniki z tej dziedziny oraz przedstawia konkretny przypadek wykorzystania soczewki Fresnela w układzie nadażnym o kształcie sferycznym. W pierwszej części opisano zagadnienie jakim jest refrakcja (załamanie) promieniowania słonecznego występujące w układach optycznych stosowanych m.in. w energetyce, w dalszej części dokonano analizy dostępnych dziś, w rozwiązaniach komercyjnych, nieobrazujących układów optycznych wykorzystujących soczewki Fresnela, w trzeciej, ostatniej, części przedstawiono metodologię wyznaczenia geometrii takiej soczewki dla układu optycznego o kształcie sferycznym, w celu jego zastosowania w urządzeniu nadażnym za pozornym ruchem Słońca przy jednoczesnej minimalizacji zjawiska aberacji sferycznej. W przeprowadzonych badaniach przyjęta została stała wysokość pierścienia (karbu) w zmienna dla dwóch zakresów zależnych od liczby pierścienia p . W pracy wykorzystano zjawisko załamania światła słonecznego występującego na granicy dwóch ośrodków o różnej gęstości (prawo Snell'a) przy czym na modelowanej soczewce występują dwa punkty załamania zarówno na zewnętrznej jak i na wewnętrznej (karbowanej) powierzchni. Przedstawione wyniki analizy zamodelowanego układu optycznego, w środowisku RayTracing, świadczą o poprawności wykonania programu obliczeniowego oraz o odpowiednim odwzorowaniu wyznaczonych parametrów w projekcie zrealizowanym w środowisku graficznym. Jak założono w projekcie położenie ogniska przypadło w środku (hemi)sfery czyli $f=R$.

Słowa kluczowe: Fresnel, soczewka, systemy energetyczne, technologie słoneczne

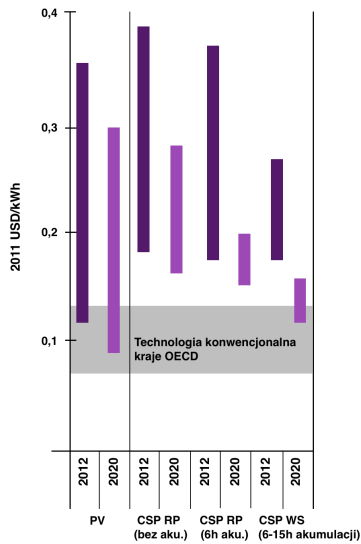
¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Paweł Wajss, Wydział Energetyki i Paliw AGH w Krakowie, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, tel. 12 617 34 28, wajss@agh.edu.pl

² Mariusz Filipowicz, WEiP AGH w Krakowie, , tel. 12 617 51 92, filipow@agh.edu.pl

³ Wiktor Wesołowski, WEiP, AGH w Krakowie, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow

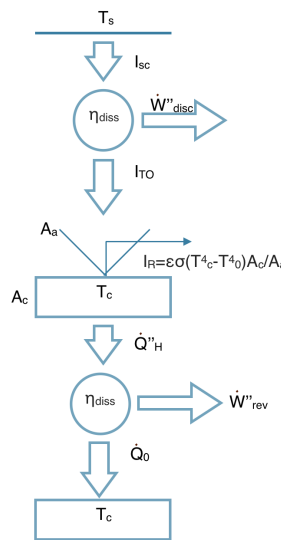
1. Koncentracja

Głównym wyznacznikiem w dziedzinie projektowania nowoczesnych rozwiązań energetycznych, również z branży odnawialnych źródeł energii powinien być czynnik ekonomiczny, tak aby rozwiązania te stały się rynkowo konkurencyjne. Już dziś w wybranych, najczęściej trudnodostępnych lub ubogich w infrastrukturę przesyłową regionach rozwiązania takie są konkurencyjne cenowo, niemniej w większości przypadków nadal występuje rozbieżność kosztowa między technologiami konwencjonalnymi a słonecznymi (w rozumieniu fotowoltaiki), co przedstawia Rys. 1 na korzyść tych drugich. Sprawność dostępnych obecnie na rynku paneli fotowoltaicznych dla $AM=1,5$ wynosi odpowiednio 15-19% dla krzemu monokrystalicznego (sc-Si) oraz 14-18% dla krzemu polikrystalicznego (pc-Si) dla warunków: temperatura 25°C oraz nasłonecznienie 1000 W/m^2 . Najwyższa, otrzymana laboratoryjnie, sprawność dla tego typu ogniwa wyniosła 24,7% [1]. Technologie fotowoltaiczne drugiej generacji, do której zaliczamy m.in. ogniwa wytworzone w oparciu o krzem amorficzny (a-Si) cechują się jeszcze niższą sprawnością w granicach 5-8%. W celu zwiększenia sprawności układków opracowano wielowarstwowe ogniwa, w których każda z warstw „aktywizuje się” dla różnej długości fali, podwyższając sprawność konwersji do nawet 43,5%. Aktualnie osiągalna sprawność tego typu ogniwa w rozwiązaniach komercyjnych wynosi 25-30% [1].



Rys. 1. LCOE (z ang. *Levelized cost of energy*) dla technologii słonecznych w skali przemysłowej, na podstawie [1]

Fig. 1. LCOE of solar systems, based on [1]



Rys. 2. Bilans egzergii dla układów słonecznych, na podstawie [2]

Fig. 2. Exergy balance of solar systems, based on [2]

Niestety ogniwo takie staje się przez to droższe, stąd duże nadzieje pokłada się w układach optycznych dokonujących koncentracji promieniowania słonecznego, a przez to zagęszczających strumień energii na mniejszej powierzchni. Korzyść z wykorzystania układu koncentracji promieniowania słonecznego wynika również z samego fizycznego rozpatrzenia zjawiska jakim jest konwersja promieniowania słonecznego na inną formę energii, rys. 2. Maksymalna możliwa praca jaką może wykonać układ (W_{rev}) przy dostarczeniu mu określonej energii (Ik) – egzergia – jest tym wyższa im wyższa jest temperatura absorbera (T_c) a straty układu są tym mniejsze im mniejsza jest jego powierzchnia (A_c). Wynika stąd, że wykorzystanie zjawiska koncentracji promieniowania słonecznego jest bardziej niż zasadne. Wyróżniamy dwie główne metody koncentrowania promieniowania słonecznego: układy optyczne z wykorzystaniem zjawiska refleksji (odbicia) oraz refrakcji (załamania). Znaczący rozwój tych pierwszych odbył się w przeciągu drugiej połowy XX w, doprowadzając do powstania licznych instalacji dużej skali, tzw. helioelektrowni, gdzie zjawisko odbicia następuje na heliostatach lub na trackerach o jednej osi obrotu (najczęściej w kształcie rynny), w której liniowy absorber umieszczony w ognisku odpowiedzialny jest za odprowadzenie ciepła do układu generacji energii elektrycznej. Systemy te są bardzo wrażliwe na precyzyjne ustawienie układu nadążnego, gdyż każda nieoptymalna pozycja skutkuje minięciem celu jakim jest absorber, a przez to znaczący spadek wydajności systemu. Dlatego dla mniejszych układów koncentrowania bezpośredniego promieniowania słonecznego prym ostatnich lat niosą systemy wyposażone w refrakcyjny układ optyczny, w którym wrażliwość na położenie Słońca nie jest tak wysoka. Do technologii tej zaliczamy soczewki Fresnela.

Wyróżniamy aktualnie dwa główne typy takich soczewek:

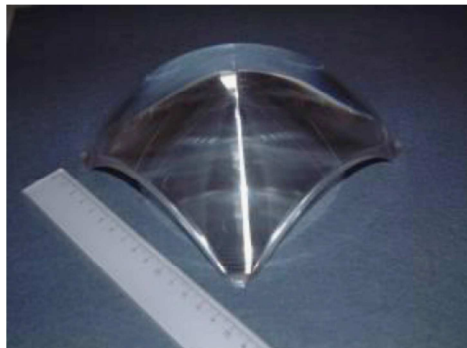
- SoG (z ang. Silicon on Glass) gdzie szkło, przeważnie kwarcowe, stanowi warstwę nośną dla silikonu optycznego uformowanego w mikropierścieniowe soczewki Fresnela. Pierścienie powstają w procesie polimeryzacji silikonu bezpośrednio na szkłe z wykorzystaniem formy o odpowiednim kształcie. Do zalet takiego rozwiązania zaliczyć można wysoką odporność na promieniowanie UV, nagłe zmiany temperatury oraz bardzo dobre przyleganie soczewki do powierzchni szkła a także większą odporność mechaniczną niż soczewki PMMA.
- Wykonane z wykorzystaniem polimetakrylanu metylu (PMMA). Soczewki takie charakteryzują się podobnymi właściwościami optycznymi jak szkło. Warto jedynie zwrócić uwagę na wyraźny spadek transmisji dla długości fal większych niż 1000 nm. Do zalet tego materiału można zaliczyć ich niską wagę oraz niewielki koszt produkcji z wykorzystaniem różnych form wtryskowych lub obróbki mechanicznej, co umożliwia wykorzystanie tego materiału w produkcji masowej. Materiał ten charakteryzuje się wysokim współczynnikiem transmisji dla światła widzialnego; posiada współczynnik załamania światła wynoszący 1,49 co jest wartością bardzo zbliżoną do szkła.

2. Nieobrazujące układy optyczne

Historia wykorzystania soczewek Fresnela w celach energetycznych sięga roku 1951, w którym to czasie Miller, Mcleod oraz Sherwood opracowali pierwszą na świecie plastikową precyzyjną soczewkę. Od tego momentu rozpoczął się dynamiczny rozwój tej technologii m.in. w dziedzinie systemów energetycznych. Obecnie soczewki Fresnela wykorzystywane są w wielu miejscach i procesach. Aktualnie na świecie dominującą pozycję co do liczby zajmują soczewki płaskie. Jedną z podstawowych cech takich soczewek jest płaska powierzchnia jednej ze ścian, przez co nie zachodzi na niej zjawisko załamania oraz (w praktyce znikomo) odbicia promieniowania słonecznego. Powierzchnią „roboczą”, która w odpowiedni sposób załamawyla promieniowanie słoneczne była powierzchnia - wyposażona w pierścienie (karby) o odpowiednim kształcie. W energetyce, gdzie funkcją celu jest maksymalizacja uzysku energetycznego, a jakość obrazu z układu optycznego nie ma znaczenia, badania zostały skierowane ku opracowaniu nowej technologii koncentracji. W roku 1965 odkryto, że zakrzywienie pierwszej powierzchni tak aby i ona stanowiła powierzchnię roboczą w procesie załamania światła zwiększa możliwy do uzyskania stopień koncentracji promieniowania słonecznego oraz umożliwia skrócenie ogniskowej układu. Aktualnie systemy takie dzieli się pod kątem stopnia koncentracji (C) i tak, dla $C \leq 10$ stopień koncentracji uznaje się jako niski; dla $10 < C \leq 100$ średni oraz dla $C > 100$ wysoki. Główną metodą wyznaczającą kształt takiej soczewki jest metoda opracowana przez Welforda i Winstona już w roku 1978 - „edge-ray principle”. Metoda ta uzależnia kształt soczewki od przebiegu przezeń promieni granicznych, przy czym warunkiem jest aby wszystkie promienie ze źródła trafiły we wcześniej zdefiniowany punkt lub powierzchnię (w naszym przypadku absorber). Jeżeli promienie graniczne trafiają w cel przyjąć można, że wszystkie promienie pośrednie, znajdujące się pomiędzy promieniami granicznymi również trafiają. Jeżeli by tak nie było to oznaczałoby to, że jeden z promieni pośrednich stał się nowym promieniem granicznym a wtedy koniecznym byłaby korekta kształtu układu optycznego.

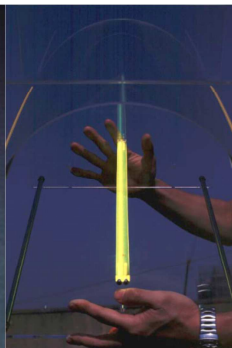
3. Aktualny stan wiedzy i techniki

W ostatnich latach powstały liczne prace badawcze pod kątem optymalizacji budowy wypukłych soczewek Fresnela o kształcie kopuły (z ang. dome shaped) oraz liniowych (z ang. linear convex shaped). Były również próby komercjalizacji tych technologii ale na chwilę obecną bez większych sukcesów. Przykłady nieobrazujących układów optycznych przedstawione są na rysunkach 3 i 4.



Rys. 3. Soczewka Fresnela o kształcie kopuły, $C=500$, na podstawie [3]

Fig. 3. Dome shaped Fresnel lens, $C=500$, based on [3]



Rys. 4. Liniowo wypukła soczewka Fresnela, na podstawie [4]

Fig.4. Linear convex shaped Fresnel Lens, based on [4]



W Katedrze Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego Wydziału Energetyki i Paliw odbywają się prace badawcze nad wdrożeniem układu nadążnego o kształcie sferycznym. Aktualnie trwają prace nad układem hydraulicznym oraz optycznym. Z racji, iż soczewka o kształcie sferycznym obarczona jest aberracją sferyczną, tj. ogniska równoległej wiązki światła rozkładają się na osi optycznej a nie w jednym punkcie, kształt układu optycznego powinien być skorygowany poprzez odpowiednie (asferyczne) krzywizny pierścieni znajdujących się na drugiej, wewnętrznej płaszczyźnie urządzenia nadążnego.

4. Hemisferyczna soczewka Fresnela

Zakładając, że zewnętrzna jak i wewnętrzna powierzchnia soczewki Fresnela ma krzywiznę sferyczną o promieniu zewnętrznym $R=212$ mm i grubości ścianki $t=8$ mm, oraz przy założeniu, że promienie winny skupiać się w geometrycznym środku układu ($f=R$) koniecznym jest odpowiednie ukształtowanie pierścieni (karbów) w materiale w celu osiągnięcia zamierzonego efektu. Mając na uwadze, iż układ ma kształt sferyczny koniecznym jest wzięcie pod uwagę efektu załamania światła już na pierwszej (zewnętrznej) powierzchni, granicy ośrodków powietrze–materiał. Drugie zjawisko załamania zachodzi na drugiej, wewnętrznej, odpowiednio ukształtowanej (karbowanej) powierzchni, na granicy ośrodków materiał–powietrze. Materiałem w rozpatrywanym przykładzie jest PMMA o współczynniku załamania $n=1,49$. Dla uproszczenia geometrii założono stałą wysokość pierścienia (w), przy czym zmienia się dla dwóch zakresów i wynosi odpowiednio dla liczby pierścieni (p):

$$p <1-100>; w=1\text{mm},$$

$$p <101-150>; w = 2\text{mm}.$$

Mając na uwadze powyższe założenia, możliwym jest geometryczne wyznaczenie położenia wierzchołka pierścienia - punktu x w kartezjańskim układzie współrzędnych, jak na Rys. 5. W punkcie x zachodzi drugie zjawisko załamania promienia słonecznego. Każdemu punktowi x przypisać możemy jeden odpowiadający mu punkt x' , w którym to punkcie zachodzi pierwsze zjawisko załamania. W rezultacie obu tych procesów równoległa wiązka promieniowania słonecznego winna skoncentrować się w jednym punkcie, ognisku soczewki. Korzystając z prawa Snell'a wiemy, że:

$$\sin \alpha = n \sin \beta \quad (1)$$

oraz

$$n \sin(\alpha - \beta + \delta) = \sin(\delta + \epsilon) \quad (2)$$

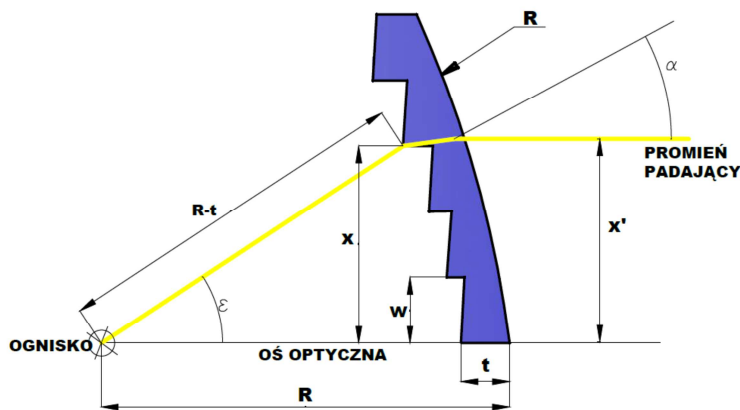
gdzie: α – kąt padania promienia słonecznego na płaszczyznę zewnętrzną,
 β – kąt załamania na zewnętrznej płaszczyźnie,
 δ – kąt odchylenia płaszczyzny pierścienia od osi pionowej,
 $\alpha - \beta + \delta$ – kąt padania promienia na wewnętrznej płaszczyźnie,
 $\delta + \epsilon$ – kąt załamania na wewnętrznej płaszczyźnie.

Ponadto możliwym jest określenie wartości kątów α i ϵ z funkcji geometrycznych:

$$\sin \alpha = \frac{x'}{R} \quad (3)$$

oraz

$$\sin \epsilon = \frac{x}{R-t} \quad (4)$$



Rys. 5. Poglądowy przekrój soczewki. Brak poprawnej skali

Fig. 5. Cross-section of the lens. Not to scale

W celu wyznaczenia odpowiednich wartości kątów δ dla każdego z pierścieni tak aby przechodzący przez niego promień został skupiony w naszym ognisku $f=R$ musimy rozwiązać następujące równanie:

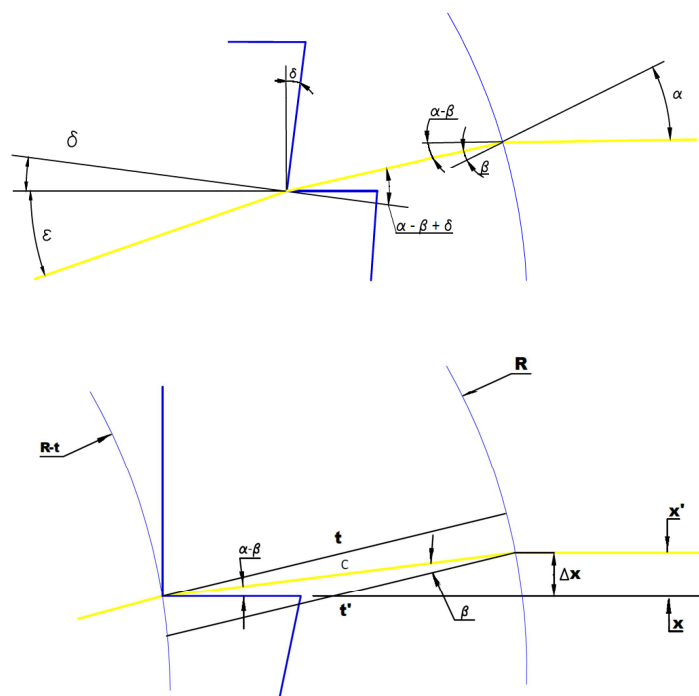
$$\tan \delta(x, x') = -\frac{n \sin \kappa(x') - \sin \epsilon(x)}{n \cos \kappa(x') - \cos \epsilon(x)} \quad (5)$$

Jak widać wartość kąta δ występuje w funkcji x oraz x' . Jak wykazano w równaniu (5) wartości x dla wybranych punktów soczewki, tj. dla wierzchołków pierścieni są znane. Koniecznym zatem jest wyznaczenie odpowiadających im współrzędnych punktów x' . Upraszczając geometrię możemy założyć, że:

$$\frac{t}{c} \approx \cos \beta \quad (6)$$

$$\frac{x' - x}{c} = \sin(\alpha - \beta) \quad (7)$$

gdzie: c – długość drogi promienia w soczewce, co przedstawia Rys. 6.



Rys. 6. Poglądowy przekrój soczewki. Brak poprawnej skali. Na podstawie: [5]

Fig. 6. Cross-section of the lens. Not to scale. Based on: [5]

Można zatem wyznaczyć funkcję:

$$x(x') = x' - t \frac{\sin \kappa(x')}{\cos \beta(x')} \quad (8)$$

gdzie:

$$\kappa(x') = \alpha(x') - \beta(x') \quad (9)$$

Z wykorzystaniem opracowanego na potrzeby projektu programu jesteśmy w stanie wyznaczyć odpowiednie wartości kątów δ dla każdego z pierścieni p .

5. Wyniki

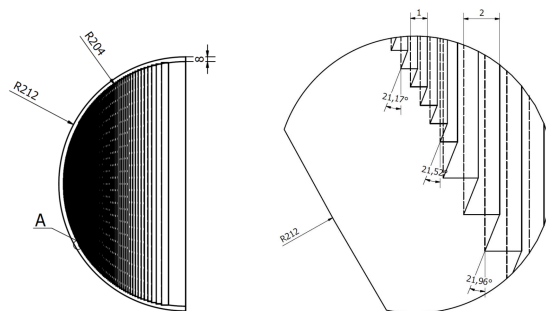
W oparciu o powyższe założenia wyznaczono geometrię układu oraz zobrażowano go w programie graficznym. W kolejnym kroku dokonano analizy powstałego modelu soczewki w środowisku typu RayTracing (posługującym się metodą śledzenia promienia) w celu walidacji poprawności położenia ogniska oraz określenia stopnia koncentracji.

Na Rys. 7 dostrzegalna jest również różnica pomiędzy obszarem z $w=1\text{mm}$ oraz $w=2\text{mm}$. Jak widać na Rys. 8 wartość kąta δ jest zmienna i przyrasta wraz kolejnymi pierścieniami. Trend ten ulega zmianie na $p=113$ pierścieniu, gdzie δ osiąga maksimum $22,6075^\circ$.

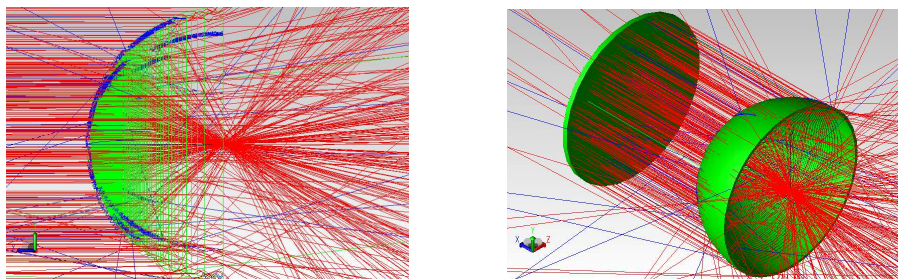
Rysunek 9 przedstawia wyniki analizy w programie typu RayTracing. Widoczne jest, że ognisko soczewki znajduje się wewnątrz hemisfery. Świadczy to o poprawności wykonania modelu oraz przyjętych założeń. Dostrzegalne są również promienie, które nie padają w ognisku. Są to promienie, które z racji założenia stałej wartości w nie padają poprawnie na wewnętrzną płaszczyznę załamania a przez to nie posiadają odpowiedniej wartości kąta ε . W dalszej części pracy nad tym zagadnieniem dokonane zostanie zmodyfikowany algorytm, tak aby zmianie uległa geometria układu wprowadzając wartość w jako zmienną



Rys. 7. Rzut izometryczny na soczewkę Fresnela
Fig. 7. Hemispherical shaped Fresnel Lens – isometric view



Rys. 8. Zwymiarowana soczewka Fresnela wraz z detalem
Fig. 8. Fresnel lens with detailed view



Rys. 9. Obraz soczewki Fresnela w środowiku typu RayTracing

Fig. 9. RayTracing analysis

w zależności od p , zmianie także ulegać będą wartości kąta nachylenia pierścienia (κ , zob. równanie (9)), tak aby ograniczyć nieefektywną powierzchnię soczewki czyli wszystkie powierzchnie równoległe do promieni padających.

Niniejsza praca jest częścią innowacyjnego projektu KIC InnoEnergy o akronimie „BioEcoMatic” oraz jest finansowana z tego właśnie projektu. Ponadto mgr inż. Paweł Wajss jest doktorantem Wydziału Energetyki i Paliw a jego prace współfinansowane są w ramach uczestnictwa w programie stypendialnym Doctus koordynowanego i zarządzanego przez Małopolskie Centrum Przedsiębiorczości.

Literatura

- [1] Renewable Power Generation Costs in 2012: An Overview, Report published Jan. 2013, IRENA The International Renewable Energy Agency.
- [2] C. Zamfirescu and I. Dincer How much exergy one can obtain from incident solar radiation? JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 105, 044911 (2009).
- [3] Akisawa A, Sato T, Miyazaki T, Kashiwagi T, Hiramatsu M. High concentration non-imaging Fresnel lens design with flat upper surface. In: Proceedings of the SPIE, vol. 6649. 2007. p. 1–8.
- [4] Leutz R, Suzuki A, Akisawa A, Kashiwagi T. Shaped nonimaging Fresnel lenses. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics 2000;2(2):112–6.
- [5] Erisman F., Design of a plastic aspheric Fresnel lens with a spherical shape, Opt. Eng. 36(4) 988–991 (April 1997).

CONCENTRATION OF DIRECT SOLAR RADIATION IN THE SUN TRACKERS USING NONIMAGING OPTICS.

Summary

This article provides an introduction to the topic of non-imaging optics used in the sun trackers; gives a review of the current state of the art in this field and presents the specific case study of the spherical shaped Fresnel lens. The first part defines law of refraction of the solar radiation occurring in the optical systems used in ia. energy industry; in the second part analysis of

already commercialized optical systems based on non-imaging Fresnel lens is carried out; and in the third and final, section the design methodology for the spherical shaped Fresnel lens to avoid spherical aberration, dedicated to the sun trackers, is presented. The fixed values of height of the notches w are assumed, 1 mm for the notches p from 1 to 100 and 2mm for the notches p from 101 to 150. The final geometry of the lens is based on calculating solutions to Snell's law along the lens surfaces wherein refraction is occurring in two points simultaneously: outer and inner lens surfaces. Finally, analysis of the modeled lens in ray tracing environment has been carried out. Its results confirm correct calculation of lens geometry. As assumed the focal point has been observed in the center of hemisphere $f=R$.

Keywords: Fresnel, lens, energy systems, solar technologies

Przesłano do redakcji: 14.02.2016 r.

Przyjęto do druku: 1.06.2016 r.

DOI: 10.7862/rb.2016.136