**Magdalena Domaszka**

# SYMULACJA UKŁADU OPTYCZNEGO PROJEKTORA DLP ZE ŹRÓDŁEM LED

*Praca dotyczy modelowania i symulacji układu optycznego projektora multimedialnego DLP. W układzie wykorzystano nowoczesny element MEMS oraz diodę LED jako źródło światła. Przeprowadzono symulację ray-tracing oraz analizę detektora. Model układu został zaimplementowany w programie do symulacji optycznych Zemax.*

***Słowa kluczowe:*** *projektor DLP, Zemax, MEMS, ray-tracing.*

## WSTĘP

Projektory multimedialne obecnie są urządzeniami zaawansowanymi technologicznie, powszechnie wykorzystywanymi podczas wyświetlania projekcji ekranowych, w kinach czy reklamie.

Historia projektorów sięga roku 1420, kiedy Joannes de Fontana namalował obraz przedstawiający kobietę z lampą. Świeca umieszczona w lampie oświetlała obraz namalowany na szkle, który wyświetlany był na ścianie w znacznym powiększeniu. W 1659 roku pojawiła się Laterna Magica , czyli magiczna lampa. Jej prosty mechanizm pozwalał na przesuwanie slajdów i tworzenie prostych animacji. Z kolei w 1837 roku Michael Faraday wynalazł światło wapienne. Dzięki jego wynalazkowi uzyskano w teatrach światło o wysokiej jasności. Rozwój mechanicznych latarni trwał do roku 1890. Edison przedstawił prototyp projektora cylindrycznego, na którym wyświetlono pierwszy ruchomy film pt. *Monkeyshines*.

Przełomowym wynalazkiem okazał się kinematograf wynaleziony w 1885 roku we Francji przez braci Lumière. Pozwalał on na oglądanie filmu jednocześnie przez wielu widzów. W 1897 roku opracowano technologię CRT (ang. *Cathode-Ray Tube*), ale dopiero w 1951 stworzono projektor, w którym obraz odtwarzano w tej technologii. Obraz powstawał za pośrednictwem trzech lamp kineskopowych o trzech podstawowych kolorach, padających na powierzchnię fosforyczną. Do tej pory rozwiązanie to wymaga precyzyjnego ustawienia i zsynchronizowania strumieni świetlnych ze wszystkich lamp, jednak efektem jest obraz doskonałej jakości. Projektory CRT wyróżnia różnorodność odcieni czerni i szarości, głębia obrazu, kontrast i gradacja poziomów czerni, które powodują, że projektory te stosowane są w zaawansowanych rozwiązaniach, gdzie mogą być montowane na stałe m.in. kina.

Niestety, technologia ta ma też wady, do których należy zaliczyć wagę i rozmiary urządzenia, duży pobór mocy, niewielką jasność obrazu, co ogranicza ich zastosowanie do całkowicie zaciemnionych pomieszczeń. Eksploatacja urządzenia zmusza do systematycznego regulowania lamp. Projektory CRL od kilku lat tracą popularność na rzecz zaawansowanych rozwiązań DLP [1, 9].

Technologia DLP (ang. *Digital Light Processing*) została opracowana przez firmę Texas Instruments, bazującą na technologii MEMS (*Microelectromechanical System*), która określa zintegrowane struktury elektromechaniczne, których przynajmniej jeden wymiar znajduje się w skali mikro. Chociaż technologia ta powstała już w 1987 roku, to projektor zaprezentowano dopiero w 1996 roku.

Projektory multimedialne DLP wykorzystują chip DMD (ang. *Digital Micromirror Device*), składający się z milionów mikroluster, które mogą odchylać się pod określonymi kątami na specjalnych zawiasach w kierunku źródła światła (ON) lub w przeciwnym (OFF), tworząc jasny albo ciemny piksel na powierzchni projekcyjnej. Dzięki temu zapis cyfrowy jest bezpośrednio prezentowany w postaci obrazu świetlnego [2, 4].

Stosowane obecnie w projektorach diody LED wypierają używane dotąd lampy halogenowe. Ponadto w porównaniu z technologią CRT, dzięki diodom LED możliwe jest uzyskanie większej sprawności energetycznej, większego kontrastu obrazu i głębszej czerni.

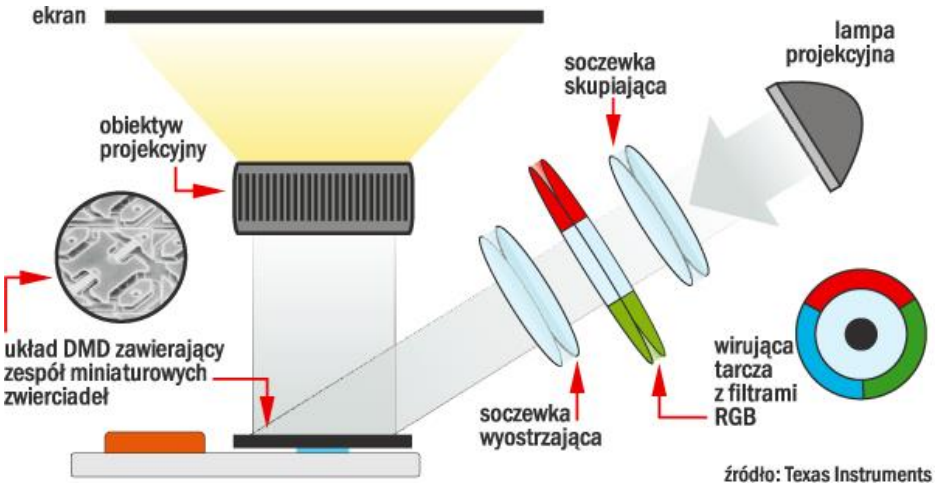
W pracy przedstawiono autorski model układu optycznego projektora multimedialnego DLP LED z nowoczesnym elementem MEMS dedykowany dla programu Zemax. Model zaimplementowano w programie do symulacji optycznych Zemax. Przeprowadzono symulację *ray-tracing* oraz analizę detektora.

W rozdziale 1 opisano typowy projektor DLP typu LED, a w rozdziale 2 przedstawiono schemat modelu rozważanego projektora, w rozdziale 3 zaś omówiono *ray-tracing* modelu w programie Zemax. W rozdziale 4 z kolei pokazano analizę detektora, a w 5 – analizę rzeczywistego obrazu rozważanego modelu projektora multimedialnego.

## 1. PROJEKTOR DLP LED

Schemat typowego projektora DLP przedstawiono na rysunku 1.

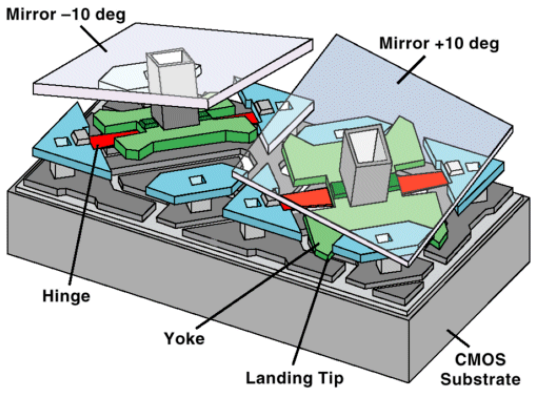
Kluczowym elementem projektora DLP jest chip DMD, składający się z 2 milionów mikrozwierciadeł o powierzchni kilku mikrometrów kwadratowych, sterowanych za pomocą elektromechanicznych przełączników MEMS. Układ DMD to innowacyjna kombinacja układu mechatronicznego i optoelektronicznego. Na podłożu krzemowym DMD zintegrowano układy CMOS, które odpowiadają za sterowanie mikrozwierciadłami. Struktury te składają się z adresowanych komórek pamięciowych, których przeciwsobne wyjścia sterują elektrodami przechylającymi mikrozwierciadła.




**Rys. 1.** Schemat typowego projektora DLP [6]

***Fig. 1.*** *Scheme of a typical DLP projector*

Mikrozwierciadła przechylane są na jarzmach przymocowanych do skrętnych zawiasów w kierunku źródła światła +10° (tryb ON) albo w przeciwnym -10° (tryb OFF), tworząc w ten sposób jasny albo czarny piksel na powierzchni projekcyjnej. Dzięki temu zapis cyfrowy jest bezpośrednio prezentowany w postaci obrazu świetlnego [3, 5]. Rozwiązanie to pokazano na rysunku 2.




**Rys. 2.** Mikrolustro chipu DMD [8]

***Fig. 2.*** *Single DMD pixel*

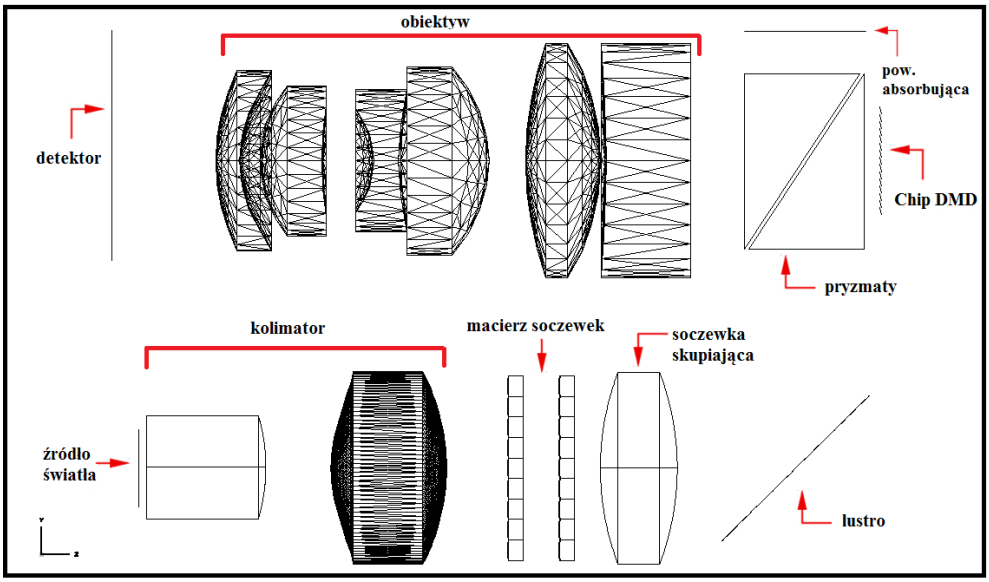
Każde zwierciadło może być wysterowane przez ośmiobitową wartość cyfrową, tzn. może przyjmować $2^8$= 256 kombinacji (256 pozycji kątowych zwierciadła odpowiadających za skalę szarości odbijanego promieniowania świetlnego).

Dodając do tego otrzymanie obrazu pełnoekranowego, składającego się zatem z trzech podstawowych barw, można uzyskać $256^3$ = 16,7 mln barw. Trójukładowe projektory są w stanie odwzorować więc 35 trylionów kolorów [3, 7].

W pierwszej generacji projektorów DLP jako źródła światła stosowano lampy halogenowe zawierające włókna żarowe, ale obecnie odchodzi się od tego rozwiązania na rzecz diod LED. Stosowane obecnie w projektorach diody LED mają trwałość ok. 10 000 godzin, co w praktyce oznacza, że nie wymagają wymiany. Przeciętna moc diody wynosi 10–12 mW, co odpowiada mocy lampy 200–300 W dla uzyskania jasności ok. 2000 ANSI lumenów. Dzięki zastosowaniu diod LED uzyskano urządzenia o znacznie mniejszych wymiarach i wadze bez konieczności stosowania wydajnych systemów chłodzących, jak w przypadku lamp halogenowych. Warto też podkreślić, że diody LED, w przeciwieństwie do wcześniej wspomnianych lamp, nie stanowią zagrożenia dla środowiska naturalnego, ponieważ nie zawierają rtęci [7].

## 2. SCHEMAT MODELU

Schemat projektora DLP zaimplementowanego w programie Zemax przedstawiono na rysunku 3.




**Rys. 3.** Schemat układu optycznego projektora DLP zaimplementowanego w programie Zemax

***Fig. 3.*** *Optical scheme of the DLP projector implemented in the Zemax*

Strumień światła ze źródła w postaci diody LED pada na kolimator, który przetwarza je w skolimowaną wiązkę. Następnie skolimowana wiązka światła LED pada na tandem mikrozwierciadeł, gdzie następuje mieszanie się strumienia świetlnego w przekroju poprzecznym wiązki. Ma to na celu uzyskanie możliwie jednorodnego rozkładu natężenia światła padającego na powierzchnię układu DMD.

Zastosowanie podwójnego układu macierzy pozwala zminimalizować straty światła wynikające z bardzo małych wymiarów piksela i w dużym stopniu wyeliminować efekt nakładania się na siebie sąsiednich pikseli na obrazie projekcyjnym. Następnie strumień przechodzi przez soczewkę skupiającą i odbija się od lustra, padając na pryzmaty.

W pierwszym pryzmacie zachodzi zjawisko wewnętrznego załamania światła i odbicie od układu DMD.

Drugi pryzmat zakrzywia tor padania obrazu z układu DMD wprost na obiektyw.

## 3. *RAY-TRACING* W PROGRAMIE ZEMAX

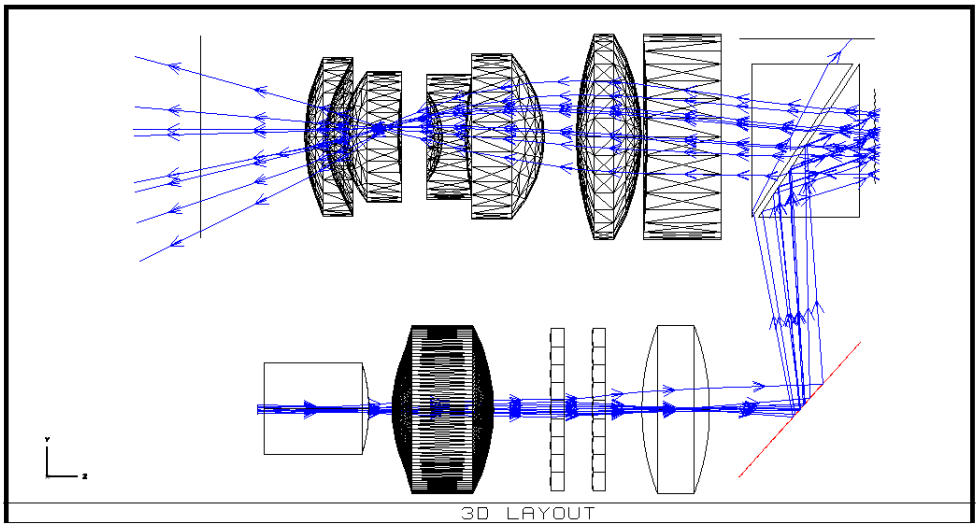
W programie Zemax zbudowano układ optyczny i wykonano optymalizację położenia poszczególnych elementów układu pod kątem efektywności świetlnej. Każdy z poszczególnych elementów układu optycznego został zamodelowany bezpośrednio w edytorze powierzchni.

Pierwszym krokiem było stworzenie kolimatora, który przetwarza promień na wiązkę równoległych promieni.

Następny element stanowi tandem mikrosoczewek, który przetwarza światło w taki sposób, by uzyskać uśredniony rozkład natężenia światła.

Kolejnymi elementami są soczewka skupiająca i lustro, których zadaniem jest skierowanie światła na pryzmaty, gdzie tor optyczny zostaje zakrzywiony, a wiązka pada i odbija się od układu DMD, przechodzi przez obiektyw gaussowski i na końcu trafia na detektor.

Wynikiem implementacji elementów składowych rozważanego modelu w programie Zemax jest zoptymalizowany układ optyczny do wyświetlania obrazów cyfrowych na płaskiej powierzchni projekcyjnej z użyciem obiektywu Gaussowskiego, przedstawiony poniżej (rys. 4).




**Rys. 4.** Analiza *ray-tracing* układu optycznego projektora DLP z obiektywem Gaussowskim, zamodelowanego w programie Zemax

***Fig. 4.*** *Ray-tracing of the optical system of DLP projector with lens Gaussian modeled in Zemax*

Parametry źródła w postaci diody LED zestawiono w tabeli 1.

**Tabela 1.** Parametry źródła

***Table 1.*** *Source parameters*

| Object Type | Tilt About X | Tilt About Y | Tilt About Z | Material | # Layout Rays | # Analysis Rays | Power(Lumens) | Wavenumber | Color # |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 Source IE.. | 0.000000 | 0.000000 | 0.000000 | - | 100 | 100000 | 0.820000 | 0 | 0 |

Z otrzymanej analizy *ray-tracing* (rys. 4 i 5) dla biegu 100 tys. promieni wynika, że strumień energetyczny wynosi ok. 0,173 W, co stanowi 21,1% wartości początkowej wynoszącej 0,82 W. Wartość jest ta większa niż dla standardowych mikroprojektorów i wynika z większych gabarytów zaprojektowanego modelu.

Run time: 3.562 min.

Lost energy (thresholds): 4.196250E-007

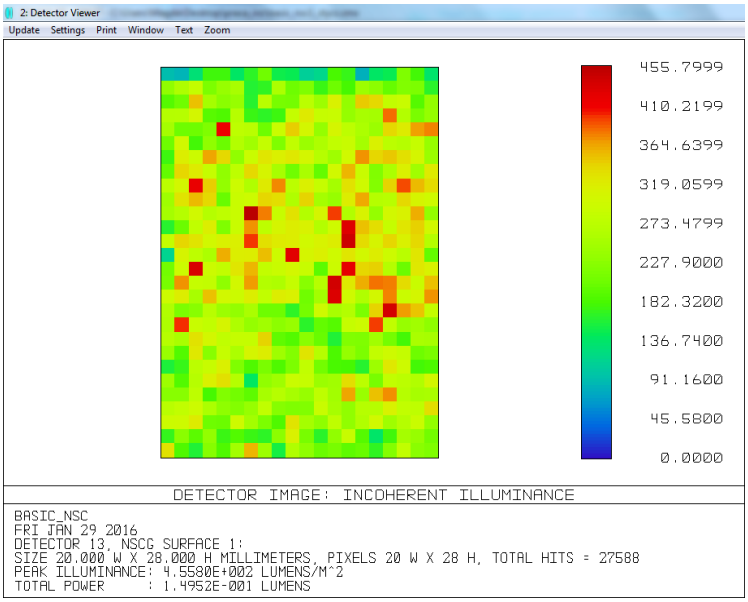
Lost energy (errors): 1.731094E-001

**Rys. 5.** Wynik symulacji *ray-tracing* dla detektora

***Fig. 5.*** *Result of the ray-tracing simulation for detector*

## 4. ANALIZA DETEKTORA

Ostatnim elementem rozważanego układu jest detektor, dla którego wykonano analizę promieni świetlnych. W analizie przyjęto bieg 100 tys. promieni świetlnych, o mocy 0,82 W, zgodnie z wartością rzeczywistej diody LED użytej w układzie. Na rysunku 7 przedstawiono okno analizy detektora.




**Rys. 6.** Okno analizy detektora

***Fig. 6.*** *Window of the detector analysis*

Strumień energetyczny wyniósł 0,1705 W, co stanowi 21% całkowitego wypromieniowanego promienia świetlnego. Standardowe wartości strumienia oscylują w granicach 13% dla mikroprojektorów. Rozbieżność ta wynika z większych gabarytów zaprojektowanego projektora (100 x 110 x 194 mm). Dla porównania standardowe wymiary wynoszą 50 x 120 x 120 mm.

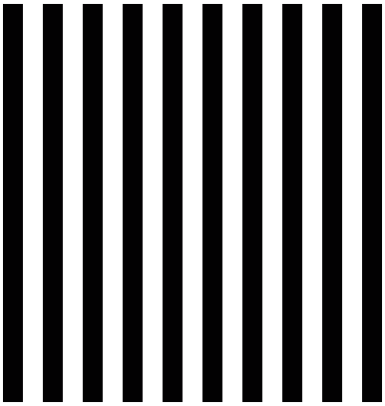
## 5. ANALIZA RZECZYWISTEGO OBRAZU PRZEZ UKŁAD PROJEKCYJNY

Program Zemax umożliwia także przeprowadzenie symulacji rzutowania bitmapy. Zaimplementowany obraz przechodzi przez optyczny układ projekcyjny, a jego wynikiem jest symulacja projekcji obrazu.

Na rysunkach 7–8 przedstawiono bitmapy, stanowiące odpowiednio obraz wejściowy i obraz wyjściowy.

Układ optyczny symulujący rzutowanie obrazu składał się z układu DMD, pryzmatów oraz obiektywu Gaussowskiego.

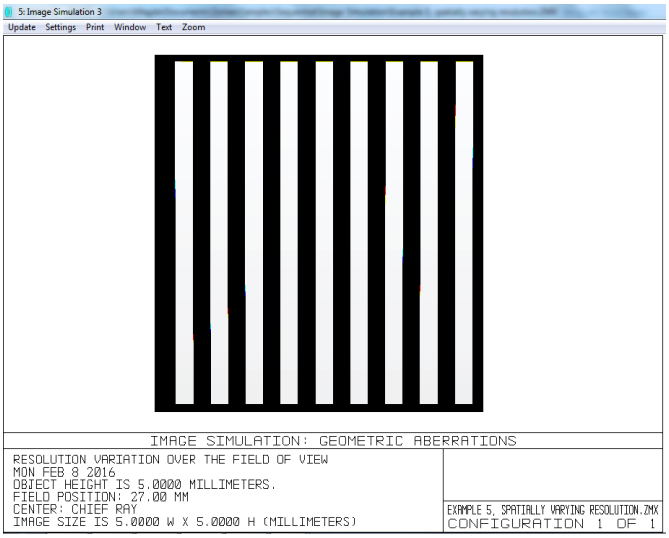
Na rysunku 7 przedstawiono bitmapę, którą wykorzystano w symulacji.



**Rys. 7.** Obraz wejściowy

***Fig. 7.*** *The input image*

Celem analizy było porównanie odwzorowania obrazu wejściowego i wyjściowego, które można zastosować przy naświetlaniu polimerów.




**Rys. 8.** Obraz wyjściowy

***Fig. 8.*** *The output image*

Z przeprowadzonej analizy wynika, że środkowe paski są równolegle. Natomiast w paskach po zewnętrznych stronach obrazu można zauważyć zniekształcenia, które można zminimalizować poprzez zamianę soczewek sferycznych na asferyczne oraz zmiejszenie stosunku średnicy elementów optycznych do średnicy wiązki promieni.

## PODSUMOWANIE

W niniejszej symulacji wykorzystano zestaw elementów niezbędnych do uzyskania jednorodnego naświetlenia detektora, przy jak najmniejszych stratach mocy świetlnej generowanej przez diodę LED. Przeznaczeniem opracowanego modelu projektora była głowica naświetlająca światłem UVA.

Wykorzystanie nowoczesnych diod LED UVA (ultrafiolet) umożliwia budowę głowic do naświetlania polimerów stosowanych np. przy produkcji płytek drukowanych.

Układy DMD umożliwiają odwzorowanie obrazów z bardzo dużym kontrastem, a tym samym wysoką jakością rzutowanego obrazu na detektorze.

Obserwuje się większą sprawność projektora (21%) w porównaniu do typowych sprawności mikroprojektorów (13%), wynikającą z większych gabarytów projektora.

Dzięki symulacji rzutowania bitmapy przetestowano układ pod kątem aberracji geometrycznej i porównano uzyskany wynik z zasymulowanym obrazem.

Symulacja *ray-tracing* pozwala na uzyskanie wyników strat energetycznych układu oraz biegu promieni świetlnych. Natomiast analiza detektora umożliwia uzyskanie rozkładu natężenia promieniowania na powierzchni projekcyjnej.

Jak można zauważyć, zastosowanie programu Zemax pozwala na kompleksową analizę układów optycznych na poziomie projektowania.

## LITERATURA

1. Compton K., *Image Performance in CRT Displays*, SPIE Press, P.O Box 10, 2003.
2. Dudley D., Duncan W., Slaughter J., *Emerging digital micromirror device (DMD) applications*, Proc. SPIE 4985, 2003, s. 14–29.
3. Esteve D., Alderman J., Cane C., Ciurtois B., Glesner M. et al., *Basic research for microsystems integration*, CEPADUES-EDITIONS, Toulouse, France, 1997.
4. Ray-Choudhury P., *MEMS and MOEMS Technology and Applications*, SPIE Press, P.O Box 10, 2000, s. 20–31.
5. Yi Lu, B.S., M.S., *Micro/Nano Fabrication of Polymeric Materials by DMD-based Micro-Stereolithography and Photothermal Imprinting*, The University of Texas at Austin, 2006, s. 10–11.

   Źródła internetowe

6. http://www.pcformat.pl/Swietlne-obrazy.

7. http://www.pcworld.pl/artykuly/318687_2/Technologie.w.pigulce.html.
8. http://www.science-vision.at/english/dataprojectors.html.
9. http://www.swiatobrazu.pl/historia-projektorow-na-infografice-od-roku-1420-do-dzisiaj-29400.html.

# THE SIMULATION OF OPTICAL SYSTEM OF DLP PROJECTOR WITH LED SOURCE

*Summary*

*This elaboration is about modeling and simulation of the optical projector DLP. The system use a modern MEMS element and LED as a light source. Ray-tracing simulation and analysis of the detector was carried. Model of optical system was implemented in Zemax- program to optical simulations.*

***Keywords:*** *projector Zemax, MEMS, ray-tracing.*