

# Toleranční analýza světelné techniky v automotive

David Kovanda  
fakulta strojní  
Česká technická univerzita  
Praha, Česká republika  
david.kovanda@fs.cvut.cz

Jan Soukal  
fakulta strojní  
Česká technická univerzita  
Praha, Česká republika  
johny.soukal@gmail.com

**Abstrakt**—Článek se zabývá identifikací a analýzou tolerančních řetězců v konstrukci a výrobě předního světlomety automobilu a její vliv na výslednou fotometrii, která podléhá předpisům ECE. Hlavní naplní je vliv rozložení světelné stopy potkávací funkce ECE 112, která je tvořena indirektním reflektorovým systémem nebo direktním modulovým systémem na výrobních tolerancích.

**Klíčová slova**—toleranční analýza, automobilové osvětlení, ECE 112

## I. ÚVOD

Automobilový průmysl je velice progresivní obor, který musí reagovat na požadavky uživatelů a nové technické trendy a nabízet atraktivní řešení a držet krok s konkurencí. Spojuje téměř celou paletu strojírenských oborů, které se v dnešní době neobejdou bez mezioborové spolupráce. Přední světlomety, které procházejí za posledních pár let masivní revolucí, stále zůstávají nezbytnou a zajímavou částí, která dává automobilu ojedinelý vzhled a duši. Často bývají základním poznávacím znamením dané značky a to díky různým tvarům denní signatury. Není proto divu, že se této části vnějšího vzhledu vozu věnuje taková pozornost. Také je snaha propojovat funkce jiných dílů právě se světlomety nebo do nich tyto funkce úplně implementovat. Současný trend osvětlení směřuje k nahrazení klasických žárovek či výbojek výkonnější LED technologií. To s sebou přináší možnosti a potenciál, o kterých se při použití žárovek ani nezdálo. Nejen že se zvyšuje vyzařovaný světelný tok, a tím vyšší intenzita osvětlení vozovky, lepší homogenita, možnost nových designových prvků, jako například použití světlovodů, nastavitelná chromatičnost zdroje, ale také se může uvažovat o animaci některých funkcí, nebo dokonce o

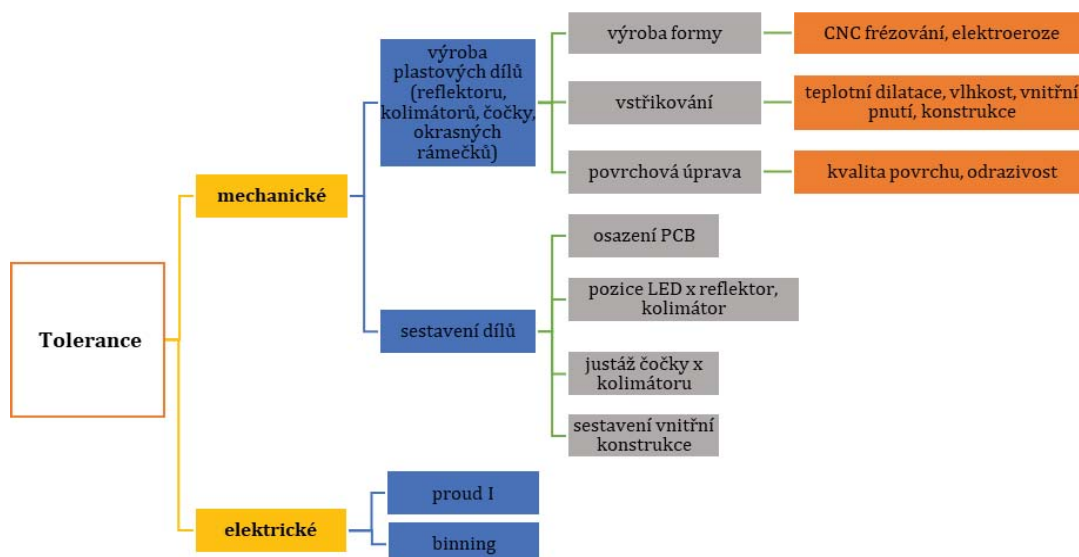
pokročilých systémech aktivních dálkových funkcí Matrix-LED s několika desítkami segmentů nebo „HD“ technologie, které mají tisíce segmentů a svým technickým řešením připomínají spíše než automobilová světla dalekohled. Cenou za tyto výhody je komplikovanost řešení oproti reflektorovým soustavám se žárovkami a jiné aspekty, které se dříve řešit nemusely.

## II. TOLERANČNÍ ŘETĚZEC

Určení tolerančního řetězce (OBRÁZEK 1) výroby automobilového světlomety je velmi široká úloha, protože zdroje chyb se skládají jak z vlastní tolerance výroby jednotlivých dílů, tak z tolerance celkové sestavy. V rámci stanovení tolerančního řetězce byly rozděleny chyby do dvou oblastí – mechanické a elektrické. Do elektrických byly zahrnuty vlivy svázané se zdrojem světla, tedy s LED technologií. Jako první jsou zde uvedeny odchylky zdroje proudu, kterým jsou LED napájeny. Velikost světelného toku LED totiž přímo závisí na velikosti proudu. Do této kategorie byl také zařazen vliv binningu, tedy rozdílných vlastností dané skupiny LED (chromatičnost, světelný tok,...).

Mechanické chyby jsou odvozeny z výrobních technologií a z technologií které vymezují, které vymezují vzájemnou polohu ve světlotetu. Výrobních technologií se používá velké množství a závisí od vyráběného dílu. Protože se jako konstrukční materiál používá plast, základní výrobní technologií je vstřikování do formy. Na samotném plastu také záleží, jakého je druhu, čistoty nebo vlhkosti. Během tohoto procesu dochází k vysokým teplotním rozdílům, se kterými souvisí teplotní rozpínatost materiálů. To zahrnuje velikost technologických parametrů během vstřikování jako například teplota taveniny, velikost tlaku, teplota a chlazení

OBRÁZEK 1- Určení tolerančního řetězce



formy. Po výstřiku na produkt působí děje, nazývané obecně smrštění, které mění jeho rozměry. Přesnost výroby formy pro vstřikování se odráží do výsledného dílu. Touto technologií se vyrábějí veškeré optické členy, jak indirektní reflektorové systémy, tak direktní systém skládající se z TIR kolimátorů a projekční čočky. Při použití indirektní reflektorové technologie se opatřují odrazné části reflektoru tenkou hliníkovou vrstvou, která se ještě překrývá ochranným průhledným lakem. Pórovitost a tloušťka tenkých vrstev ovlivňují odražené paprsky. Druhým druhem mechanických vlastností bylo zvoleno sestavení dílů do jejich vzájemné pozice avymezení vůlí. To zahrnuje jednak přesnost umístění LED na PCB osazovacími stroji a samotné ustavení PCB vůči reflektoru nebo PCB vůči držáku primární optiky (TIR kolimátorů). Oba aspekty vstupují do optických zákonů reflektoru nebo direktní optické soustavy a určují výsledné světelné rozložení potkávací funkce.

Téměř každý zdroj chyb působí na jinou část soustavy optické soustavy a má různě veliký vliv na výslednou světelnou stopu. Nelze je proto počítat. Rovněž nejde hodnotit stejným způsobem dva reflektorové systémy odlišných konstrukcí nebo stejné modulové řešení. Protože nemáme k dispozici ostrá data konstrukce, držíme se obecných předpokladů a zjednodušení. Proto se omezíme pouze na vychýlení zdroje světla vůči optickým prvků dané soustavě. V tomto jsme se pokusily shrnout veškeré technologické vlivy a určit velikost chyby.

Pro reflektorový systém budou uvažovány dvě skupiny chyb. Do první skupiny jsme zahrnuli vlivy, které budou mít za následek pohyb zdroje světla v rovně PCB. Druhá skupina ovlivní pozici LED v ose kolmé na PCB.

V úvahu bereme tyto zdroje: nepřesnosti výsledného reflektoru, teplotní roztažnost materiálů, nepřesnost osazení LED, vymezení vůle mezi reflektorem a PCB. Číselně jsme tyto vlivy vyjádřili následovně:

- celková nepřesnost reflektoru: 0,2 mm;
- teplotní zatížení materiálu: 0,2 mm;
- osazení LED: 0,05 mm;
- vůle mezi PCB a reflektorem: 0,05 mm.

Do první skupiny jsme zahrnuli vliv nepřesného osazení LED, vůli mezi PCB a reflektorem před její vymezení a nepřesnost reflektoru. Výsledná hodnota tedy je 0,3 mm. V druhé skupině uvažujeme teplotní zatížení materiálu – teplotní roztažnost. Velikost uvažované chyby druhé skupiny je 0,2 mm.

Pro projekční systém budeme uvažovat tyto zdroje nepřesnosti: vymezení vůle mezi TIR kolimátorem a PCB, nepřesnost osazení PCB a justáže projekční čočky. Číselně jsme tyto vlivy vyjádřili následovně:

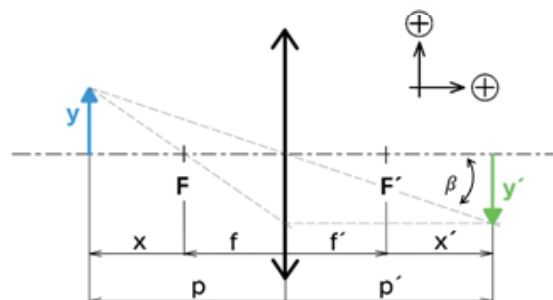
- justáž projekční čočky: 1 mm
  - osazení LED: 0,05 mm
  - vůle mezi PCB a TIR kolimátorem: 0,05 mm
- Výsledná chyba je tedy 2 mm.

### III. CITLIVOST OPTICKÉHO SYSTÉMU NA VELIKOST OHNISKOVÉ VZDÁLENOSTI

Než se pustíme do samotné simulace těchto systémů, musíme ještě zmínit, že jeden z trendů vývoje světelné

techniky je neustále vše zmenšovat a přitom zachovat nebo ještě vylepšit světelné vlastnosti osvětlovacích soustav. Mezi nejlepší taktiky, jak toho dosáhnout je zkracovat ohniskovou vzdálenost. Tato změna znamená, že můžeme optický zdroj přiblížit blíže k optickému členu a tudíž dokážeme usměrnit větší část světelného toku LED zdroje. Tento trend má ale za následek, že se soustava stane mnohem citlivější na nepřesnosti při výrobě. Tento trend se dá matematicky odvodit, viz OBRÁZEK 2.

OBRÁZEK 2- Znázornění znaménkové konvence



Zdroj: Vlastní zpracování

Protože se během návrhu světelné soustavy používá výhradně úhlový popis, uvádíme zde odvozený vzorec:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{x^2 - f'x}{-f'^2 + f'x} \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

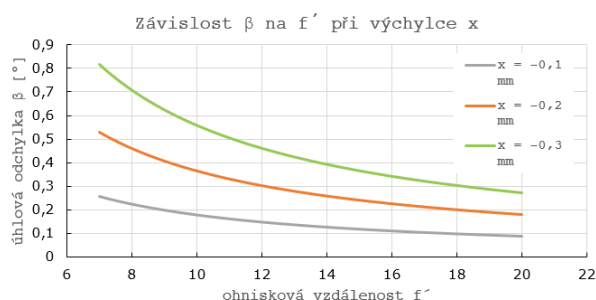
$x$ ...vzdálenost předmětu od předmětového ohniska

$f'$ ...obrazová ohnisková vzdálenost

$\alpha$ ...úhel mezi optickou osou a krajním paprskem vycházejícím z bodového zdroje světla

Úhel  $\alpha$  jsme zvolili na základě modelových soustav. Na GRAFU 1 je vidět, že se zmenšujícím ohniskem roste úhlová odchylka. Tento případ jsme provedli pro 3 modelové chyby 0,1 mm; 0,2mm a 0,3 mm.

GRAF 1- Závislost  $\beta$  na  $f'$  při výchylce  $x$



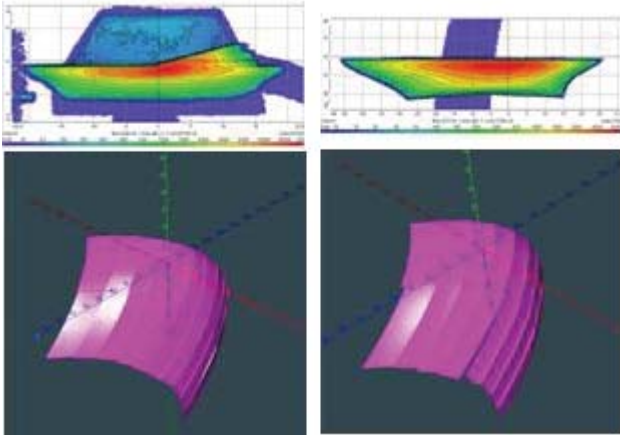
Zdroj: Vlastní zpracování

## IV. SIMULACE

### A. Reflektorový systém

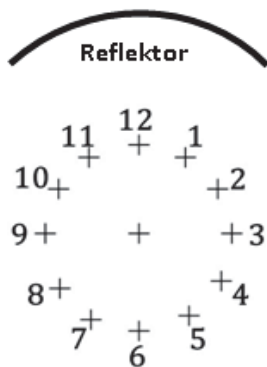
Pro simulaci byly použity dva multifokální reflektory (OBRÁZEK 3) s ohniskovými vzdálenostmi 20 mm pro reflektor tvořící spot a 18 mm pro reflektor předpolí. Postupně bylo se zdroji pohybováno do dvanácti bodů ve třech rovinách, viz OBRÁZEK 4.

OBRÁZEK 3- Světelný příspěvek jednotlivých reflektorů



Zdroj: Vlastní zpracování

OBRÁZEK 4- Označení vychýlených bodů



Zdroj: Vlastní zpracování

První rovina leží v rovině výchozího světelného zdroje – označujeme ji jako „0“. Další dvě roviny jsou s touto rovnoběžné a od ní vzdálené o 0,2 mm. Tu, která leží blíže k reflektoru, označujeme „+“ a rovinu vzdálenější „-“. Znázorněné body jsou od výchozí – středové polohy vzdáleny o 0,3 mm.

Pro každé vychýlení zdroje jsme po simulaci získali světelnou mapu. Popis jejích os je v úhlech. Na barevném měřítku pod mapou je odstupňována hodnota svítivosti jednotlivých bodů mapy. Protože potkávací funkce je realizována dvěma reflektory, součtem map z obou reflektorů získáme výslednou celkovou mapu. Na ni lze aplikovat přednastavenou analýzu předpisu ECE 112 13,2V. Podle této analýzy se vyhodnocují body a oblasti předepsané touto normou, zda plní nebo neplní předpis. Simulace byly provedeny metodou accurate s 1.mld paprsků.

Protože vyhodnocujících parametrů je 23, byly určeny 3, z nich, které bývají nejvíce problematické, viz OBRÁZEK 5. U některých parametrů je předepsána maximální hodnota svítivosti, která se nesmí překročit, u některých hodnota minimální, která nesmí být podkročena.

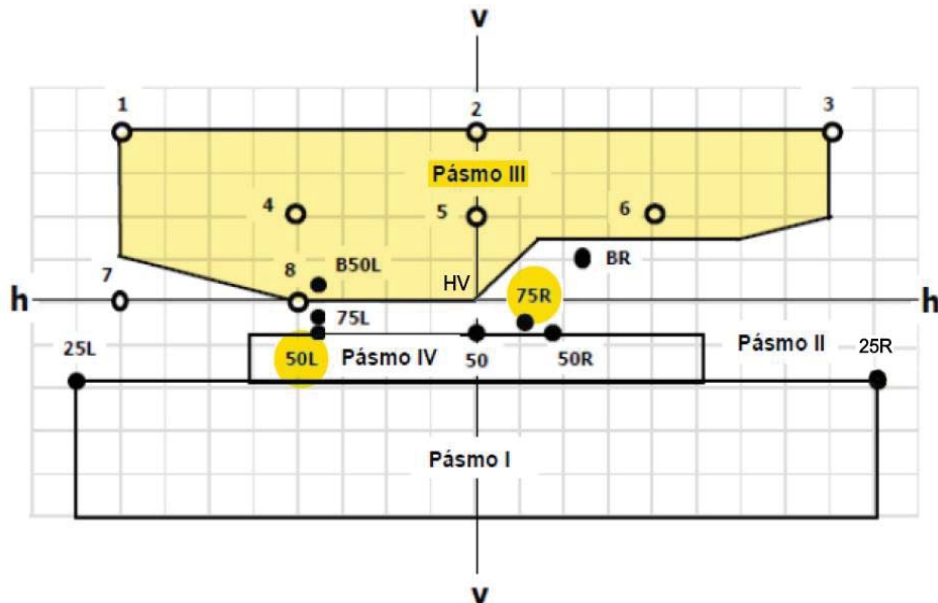
1) Vyhodnocení bodu 75R

V měřícím Bodě 75R norma předepisuje minimální hodnotu svítivosti 10100 cd. Na jednotlivá ramena paprskovitěho grafu (GRAF 2) jsou zaneseny získané hodnoty svítivosti při odpovídajícím vychýlení zdroje světla. Tyto stavy spojuje modrá křivka – pro rovinu „-“, oranžová křivka – pro rovinu „0“ a fialová křivka – pro body v rovině „+“. Černá čárkovaná čára znázorňuje výchozí stav, tedy hodnotu svítivosti pro nevychýlený světelný zdroj. Zelená vyjadřuje předepsanou minimální svítivost. Z grafu můžeme vyčíst, že pro polohy od bodu 11 do bodu 4 neplní některé z nich předpis. Svítivost klesá až na 30 % požadované hodnoty. Nejhorší případy jsou pro body v rovině „-“. Svítivost ale také pro některé body roste, a to až o 160 %.

2) Vyhodnocení bodu 50L

Bod 50L se nachází pod bodem 75L a vyjadřuje hodnotu svítivosti na levé krajině 50 m od automobilu. Je umístěn do světelného vertikálního gradientu. V této oblasti je požadováno velké osvětlení bez oslnění protijedoucích vozidel. To právě zajišťuje tento gradient svítivosti, jehož oblast největší změny musí ležet pod horizontálou (h-h). Předpis pro tento bod stanovuje maximální přípustnou hodnotu svítivosti. Křivka změřených svítivostí musí tedy

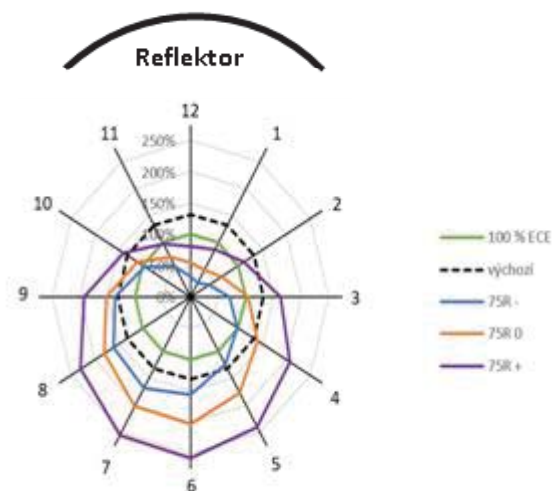
OBRÁZEK 5- Zvýraznění hodnotících parametrů na světelné mapě



Zdroj: Regulation ECE 112

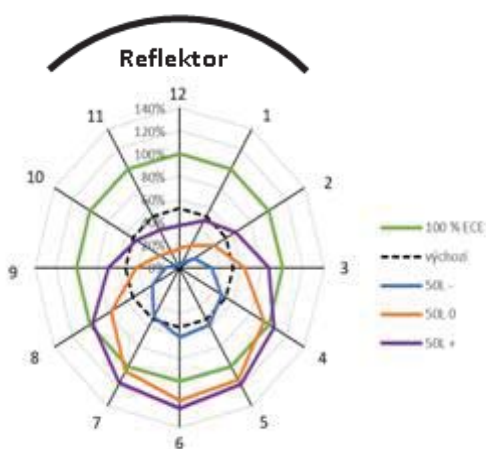
ležet uvnitř zelené křivky (GRAF 3), která vyjadřuje maximální povolenou svítivost. Černá čárkovaná křivka vyjadřuje hodnotu svítivosti nevychýleného zdroje. Z grafu je patrný nárůst svítivosti pro pozice 3 až 8 ve všech rovinách. Z toho lze usoudit, že se bude pro tyto polohy zvyšovat poloha gradientu až dojde k oslňování. Svítivosti s vychýlením do bodů 4 až 7 v rovinách „0“ a „+“ už jsou mimo předepsanou hodnotu.

GRAF 2- Paprskový graf pro bod 75R



Zdroj: Vlastní zpracování

GRAF 3- Paprskový graf pro bod 50L



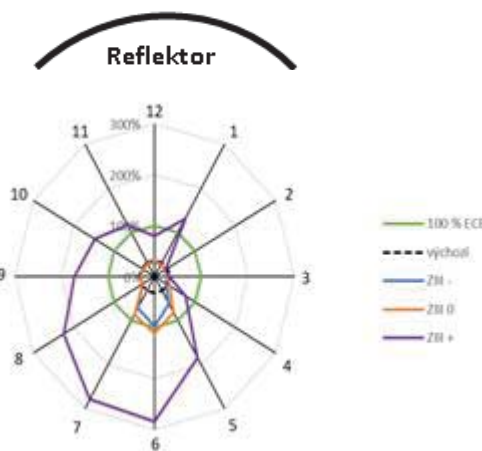
Zdroj: Vlastní zpracování

### 3) Vyhodnocení oblasti ZIII

Oblast ZIII má tvar mnohoúhelníku a nachází se nad horizontálou. Od bodu HV se její strana zvedá směrem vpravo pod úhlem  $45^\circ$ , kde je kink, a horní část je omezena úsečkou umístěnou  $4^\circ$  nad křivku h-h. ZIII obsahuje dalších 8 bodů, které se hodnotí vlastním kritériem. Mezi ně patří i HV. Od zmiňovaných bodů liší principem vyhodnocování. V žádném bodě oblasti nesmí být překročena hodnota 625 cd, aby nedošlo k oslňování. Hodnoty maximální svítivosti pro dané vychylky zdroje jsou uvedeny v GRAFU 4. Body v rovinách „-“ a „0“ splňují předpis kromě polohy zdroje v bodě 6 v rovině „0“. Zdroje umístěné v rovině „+“ ve většině případů překračují maximální přípustnou hodnotu. Největší svítivost jsme zaznamenali v bodě 6 a zvedla se o 180 % proti normě. Mezi polohami 4 až 9 bylo místo největší

svítivosti v těsné blízkosti bodu HV. U ostatních případů se toto místo vyskytovalo spíše kolem dalších částí spodního ohraničení oblasti ZIII. Pro zdroje v této rovině tedy dochází k výraznějšímu zvedání světelné stopy, než je tomu u ostatních dvou rovin.

GRAF 4- Paprskovitý graf pro oblast ZIII



Zdroj: Vlastní zpracování

### 4) Shrnutí

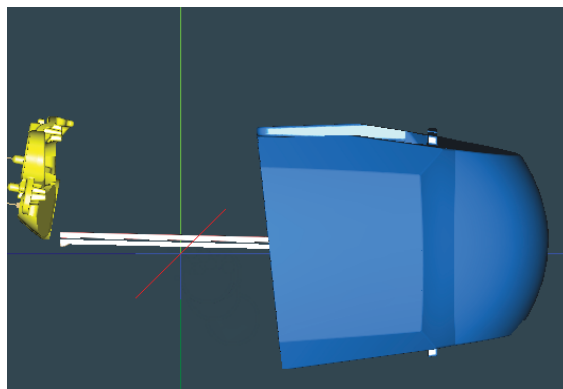
Vychýlení zdroje světla ze své výpočtové polohy deformuje rozložení osvětlení. Z provedených simulací je patrné, že každý vyhodnocovaný bod předpisem pro potkávací funkci je jinak citlivý na tyto vychýlení. Lze ale vypořádat určité trendy. První z nich bereme z pohledu vychýlení zdroje světla od výchozí polohy v rámci této roviny. Pro body v polohách 3 až 9 obecně dochází ke zvyšování svítivosti. Protože vyhodnocované body 75R, 50L a HV leží v oblasti blízké světelného rozrání, dochází obecně k vertikálnímu posunu světelné stopy.

Druhý pohled srovnává stejné body z jednotlivých rovin. Obecně lze z provedených simulací vyvodit, že změna polohy zdroje světla směrem od reflektoru (rovina „-“) snižuje svítivost ve sledovaném bodě. Naopak posunem zdroje světla směrem k reflektoru (rovina „+“) dochází ke zvyšování svítivosti. U některých bodů se zvyšuje rychleji, u některých pomaleji.

### B. Projekční optický systém

Pro simulaci byla použita optická koncepce Bi – modul,

OBRÁZEK 6- Bi-modul



Zdroj: Vlastní zpracování

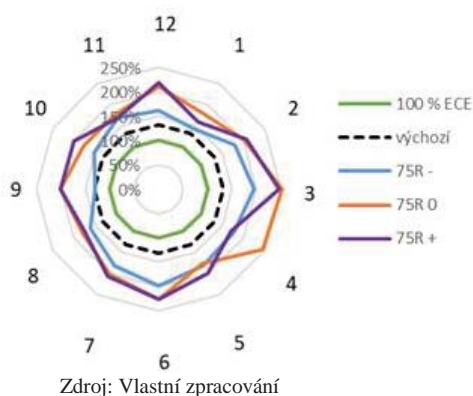


kteřý má v sobě implementované dvě světelné funkce, viz OBRÁZEK 6.

Jedna je dálková funkce a druhá je potkávací funkce. Simulovat se bude ale pouze optická soustava, která se stará o potkávací funkci. Tato soustava se skládá z 9 LED zdrojů, které jsou umístěna v ohniscích TIR kolimátorů, které přes projekční čočku tvoří stopu světelné funkce. V tomto konceptu se pro tvarování ostrého rozhraní a tvaru kinku použita kovová clonka. Stejně jako u reflektorového systému budeme pohybovat se zdroji ve dvanácti bodech a ve 3 rovinách, které jsou kolmé na osu šíření světla.

### 1) Vyhodnocení bodu 75R

GRAF 5- Paprskový graf bodu 75R



Z GRAFU 5 můžeme vyčíst, že pro všechny polohy jsou minimální požadavky na bod 75R splněny, spíše se defocusem a decentralizací významně zvětšují a to až 200% ECE.

### 2) Vyhodnocení bodu 50L

GRAF 6- Paprskový graf bodu 50L



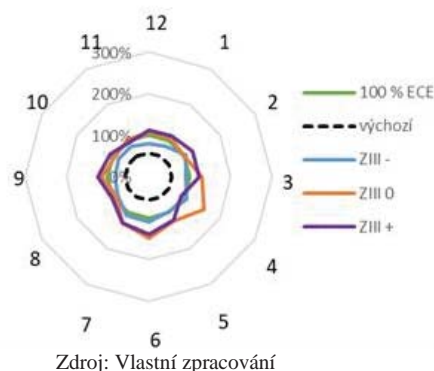
Fotometrický bod 50L už tak dobře nevyhází. Z GRAFU 6 lze vyčíst, že ve všech rovinách jsme mimo zelenou křivku, tudíž nesplňujeme fotometrické maximum, které je povolené. Z toho vyplývá, že se všech vychýlených polohách, se zvýšila pozice gradientu a dochází k oslňování protijedoucích vozidel a tudíž by se světlo stal nelegální.

### 3) Vyhodnocení oblasti ZIII

Z GRAFU 7 lze vyčíst, že se ve všech rovinách se zvětšil příspěvek od nominálního stavu svítivosti téměř o 100% a tudíž se nachází mimo dovolenou oblast zelené křivky, která

označuje 100% ECE, což je maximální povolená svítivost. V tomto případě dochází k přímému oslňení zpětných zrcátek jedoucích vozidel a taktéž oslňení protijedoucích vozidel.

GRAF 7- Paprskový graf oblasti ZIII



### 4) Shrnutí

Z provedených simulací, lze vyvodit, že projekční systém, je oproti reflektorovému systému mnohem citlivější a že mnohem více deformuje celkové rozložení světelné stopy. Tento fakt je způsoben složitostí optického systému, který se oproti reflektoru, který se skládá pouze z LED zdroje a samotného reflektoru. Nýbrž projekční systém se skládá z 9 LED zdrojů, 9 TIR kolimátorů, kovové clonky a projekční čočky. Právě poloha kovové clonky je v tomto systému klíčová, protože vytváří ostré rozhraní a odclouňuje krajní paprsky, které míří do oblasti nad HV tudíž do oblasti ZIII, které způsobuje oslňování protijedoucích vozidel. Při vychýlení LED zdrojů v TIR kolimátoru dochází k vychýlování světelného kužele a následně způsobuje překročení povolených hodnot nad HV rozhraním.

## V. ZÁVĚR

Cílem textu bylo seznámit vliv konstrukčních a výrobních tolerancí předních světlometů na podobu výsledné světelné stopy potkávací funkce, která je předepsána předpisem ECE 112. V textu jsou vyhodnoceny dva optické systémy. První řešení realizováno pomocí reflektorů, které jsou osvětleny LED zdrojem a druhé řešení je direktní řešení, které je realizováno TIR kolimátory a projekční čočkou. Z provedených simulací je zřetelné, že tolerance, které vznikají při výrobě, zasahují do výsledné stopy a mají vliv na legalitu celé potkávací funkce. Proto je nutné při konstrukci optických ploch dbát v úvahu i všechny tolerance, které v systému vznikají.

## VI. PODĚKOVÁNÍ

Autoři článku chtějí poděkovat Studentské grantové soutěži SGS20/055/OHK2/1T/12.

## ZDROJE

[1] SOUKAL, JAN. Toleranční analýza potkávací funkce předního světlometu automobile, 2020, Diplomová práce . ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Šárka Němcová



**Selected article from**

**Tento dokument byl publikován ve sborníku**

**Nové metody a postupy v oblasti přístrojové  
techniky, automatického řízení a informatiky 2020  
New Methods and Practices in the Instrumentation,  
Automatic Control and Informatics 2020  
14. 9. – 16. 9. 2020, Zámek Lobeč**

**ISBN 978-80-01-06776-5**

Web page of the original document:

<http://iat.fs.cvut.cz/nmp/2020.pdf>

Obsah čísla/individual articles:

<http://iat.fs.cvut.cz/nmp/2020/>

Ústav přístrojové a řídicí techniky, FS ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6