Influence of light sources used in a street lighting for building and operating costs of lighting systems

Abstract. The paper deals with the design of an optimal variant of a public lighting system. Calculations are processed on a model road in urban areas. Completely new lighting system is proposed on 30-years operational period. The objective is to evaluate the benefits of the application of LED in a confrontation with conventional discharge light sources from technical and economic point of view. The decisive criterion is the economic NPV of the expenditure with regard to the amount of cost entering into the calculation.

Keywords: Design of public lighting systems, economics operation of the lighting systems, usage of LEDs

Úvod

Článek je zaměřen na srovnání celkových výdajů na výstavbu a provoz osvětlovací soustavy veřejného osvětlení (VO) s různými světelnými zdroji. Osvětlovací soustava je navržena v závislosti na světelných zdrojích instalovaných ve svítidlech. Výpočty a návrhy osvětlovací soustavy jsou prováděny na modelové pozemní komunikaci délky 1 km v městské zástavbě, kde je počítáno s výstavbou zcela nové osvětlovací soustavy. Dopravní komunikace je začleněna do skupiny světelných situací B1, (dle ČSN CEN/TR 13-201-1) a požadavků třídy osvětlení ME4b, dle ČSN EN 13-201-2. Pro návrh osvětlovací soustavy byly vybrány svítidla téhož výrobce jedné výrobní řady, kvůli možnosti objektivního hodnocení. Svítidla byla v modelových případech osazena vysokotlakými sodíkovými výbojkami, halogenidovými výbojkami a LED diodovými moduly. V článku je srovnání, jak se promítá do počtu budovaných světelných míst na jednotkovém úseku pozemní komunikace osazení osvětlovací soustavy svítidly s vypuklým (GB) a plochým difuzorem (FG). V případě svítidel s LED je porovnán provoz LED modulů s udržováním konstantního světelného toku po dobu života (CLO) a bez něj. Ekonomické výpočty zahrnují výdaje na výstavbu, provoz, pravidelnou údržbu a opravy po dobu provozování 30 let.

Výstavba veřejného osvětlení

Vybudování nové osvětlovací soustavy je výhodnější než rekonstrukce, která může postihovat pouze obměnu samotných svítidel. Životnost svítidel je počítána minimálně na 10 let. Výměna svítidel na stávající osvětlovací soustavě je poměrně častá a optimalizuje výdaje spojené s provozem. Dojde ke zlepšení světelně technických parametrů, ačkoliv ne v plném rozsahu. Je-li soustava již nevyhovující a technicky zastaralá, je lepší přistoupit k celkové rekonstrukci osvětlovací soustavy. To v sobě obnáší jak výměnu svítidel, stožárů včetně příslušenství (betonové základy, patky, zemniče, svorkovnice), tak i výměnu elektrifikační sítě s nově dimenzovanými rozvaděči a spínacími místy.

Střední délka životnosti žárově zinkovaných stožárů veřejného osvětlení je 30 let. V případě dodatečné povrchové úpravy vetknuté části stožáru se životnost stožáru zvýší na 45 let.

Nová výstavba celé soustavy umožní optimální rozmístění světelných míst dle projektu zohledňující použití nových svítidel s vyšší účinností a zároveň umožní přizpůsobení aktuálním potřebám komunikace. Značná počáteční investice je vynahrazena nižšími budoucími provozními výdaji. Komplexní rekonstrukcí se docílí většího snížení instalovaného příkonu soustavy než pouhou výměnou svítidel.

Při výběru vhodného svítidla je třeba brát v potaz parametry, které ovlivní do budoucna vynakládané finanční prostředky na provoz celé soustavy. V první řadě je důležité určit charakter osvětlovaného prostoru a podle toho zvolit svítidla s patřičnou charakteristikou rozložení svítivosti. Pro osvětlování běžných komunikací se použijí svítidla se širokou charakteristikou rozložení svítivosti ve směru podélném s osou komunikace a úzkou ve směru příčném [1]. Účinnost a rozložení vyzařovaného světelného toku ovlivňuje především reflektor svítidla. Optické části moderních svítidel bývají zhotoveny z eloxovaného nebo plátovaného hliníku. Optický systém svítidla bývá uzavřen tvarovaným difuzorem (popř. refraktorem) z polykarbonátu (PC) nebo polymethylmetakrylátu (PMMA). Může být uzavřen i tvrzeným sklem, plochým nebo vypouklým. K zajištění osvětlení stejné kvantity je zapotřebí o cca 5÷35% větší počet svítidel s plochým sklem [1] nebo je nutné je osadit světelným zdrojem o vyšším světelném toku (a tedy i příkonu) ve srovnání se svítidlem opatřeným vypouklým krytem. Tato skutečnost navyšuje investici jak na začátku, tak během celé etapy provozování světelné soustavy. Výhodnější je použití tvarovaných vypouklých difuzorů z PC nebo PMMA. Výhodou PC je vysoká mechanická odolnost. PMMA je barevně stále po dobu života svítidla. Pro minimalizaci výdajů na údržbu svítidel je důležitý vysoký stupeň IP optické části. Tím je zaručena dlouhodobá stálost světelných parametrů. Některá svítidla umožňují polohování světelného zdroje v reflektoru, popřípadě reflektoru vůči světelnému zdroji a tím ovlivňují fotometrii svítidla. Standardně se provádí polohování celého svítidla. Efektivně se tak využije distribuovaný světelný tok ze svítidla. Polohování svítidla umožňuje jeho montáž na dřík stožáru, čímž odpadá nutnost používání výložníků pro zajištění osvětlenosti v celé šíři pozemní komunikace.

Výchozí podmínky návrhu soustavy VO

Osvětlovací soustava je navrhována pro modelovou průtažnou směrově nerozdělenou komunikaci (obr. 1) o šířce $B=8\text{ m}$, povrch tvoří tmavý asfalt. Osvětlovací soustava je jednostranná se stožáry o jmenovité výšce $H=8\text{ m}$ bez výložníků. Vzdálenost stožárů od krajnice $C=1\text{ m}$. Rozteč stožárů L je závislá na fotometrických vlastnostech zvolených svítidel, dále typu a příkonu světelných zdrojů instalovaných ve svítidlech.

Jak je uvedeno v literatuře [2] pro jednostrannou osvětlovací soustavu se cloněnými svítidly platí pro závěsnou výšku vztah $H \geq B$. Přesah světelného středu přes krajnici a má splňovat rovnost $a \leq \frac{1}{4}H$. V případě instalace svítidel bez výložníků ($t=0$), je přesah světelného středu přes krajnici záporný.

Obrázek 1 – Návrh osvětlovací soustavy

Osvětlovací soustava je plánována do městské zástavby (vysoký jas okolí) s hustotou provozu ≥ 7000 automobilů denně a rychlostí omezenou na $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Těmto podmínkám vyhovuje třída osvětlení *ME4b* [3]. Parametry třídy osvětlení *ME4b* uvádí [4].

Návrh osvětlovací soustavy

Návrh osvětlovací soustavy je proveden se svítidly *Philips Iridium² medium*, osazována výbojovými zdroji a *Philips Iridium² LED medium*. Tyto modely svítidel jsou vyráběny pouze s krytem optické části z rovného skla. Svítidla modelové řady *Iridium* téhož výrobce jsou nabízena s vypouklým difuzorem ze skla nebo polykarbonátu. Výpočty jsou prováděny se svítidly jednoho výrobce z důvodu objektivního posouzení. Vybraný výrobce nabízí svítidla shodné modelové řady jak pro výbojové světelné zdroje, tak i pro LED moduly. Svítidla opatřena krytem optické části svítidla z rovného skla dosahují oproti svítidlům s vypouklým difuzorem menšího činitele oslnění *TI*, což je v zastavěných oblastech přínosné. Mají však menší vyzařovací úhel, což má za následek zkrácení rozteče mezi stožáry a následné prodražení výstavby z důvodu nárůstu počtu světelných míst.

Vybraná svítidla jsou určena jak pro montáž na výložník, tak pro montáž na dřík stožáru a jsou vybavena polohovacím mechanismem v rozmezí sklonu $\pm 15^\circ$. Krytí optické části *IP66* a vysoká optická účinnost umožňuje v návrhu počítat s vyšším udržovacím činitelem *Z* (*MF* - *maintenance factor*). Pro komunikaci zadaných parametrů a třídy osvětlení *ME4b* se obvykle používají vysokotlaké sodíkové výbojky s příkonem 100 W.

Vybraná svítidla pro výpočet

Výpočty jsou prováděny se svítidly osazená vysokotlakými sodíkovými výbojkami (HPS) 100 W a 150 W, kompaktními halogenidovými výbojkami s keramickými hořáky (CMH) 90 W. Svítidla s LED jsou ve srovnávacích výpočtech osazena moduly 85 W a 61 W s konstantním světelným tokem (CLO – Constant Light Output) po dobu života a standardními LED moduly 67 W. Parametry světelných zdrojů uvádí tabulka 1.

Do srovnání jsou zahrnuta svítidla s rovným a vypouklým sklem pro výbojové světelné zdroje. Svítidla osazená LED moduly mají optickou část kryto rovným sklem. Vybraná svítidla pro návrh osvětlovací soustavy jsou uvedena v tabulce 3.

Světelný zdroj	ϕ [klm]	T_c [K]	R_a [-]	$T_{50\%}$ [h]
HPS 150W	18,0	2 000	25	36 000
HPS 100W	10,7	2 000	25	36 000
CMH 90W	10,4	2 800	66	30 000
LED ECO99-CLO 85W	10,4	4 000	76	70 000
LED ECO71-CLO 61W	7,4	4 000	76	70 000
LED GRN88 67W	9,2	4 000	76	100 000

Tabulka 1 – Parametry světelných zdrojů

Světelné technické výpočty

U svítidel s LED s dobou života 70 000 h až 100 000 h (asi 17 - 25 roků provozování) se s výměnou samostatného LED modulu neuvažuje. Celé svítidlo je po této době zastaralé a opotřebované, proto se počítá s výměnou celého svítidla. I když někteří výrobci výměnu LED modulu umožňují. Doba života svítidel (pro výbojové zdroje) je optimální 10 – 20 let, u LED svítidel je to doba života světelného zdroje. V návrhu soustavy je počítáno s výměnou svítidel po 15 letech.

Výpočty osvětlovacích soustav s vybranými svítidly jsou provedeny s využitím software DIALux. Veškeré světelné-technické veličiny pro jednotlivá svítidla, které vstupují do výpočtu, jsou brány ze souborů Eulumdat. Veškerá data poskytovaná výrobcem svítidel jsou aktuální k 16. 1. 2015.

Pro správný výpočet osvětlenosti pozemní komunikace je nutné stanovit udržovací činitel dané osvětlovací soustavy. Udržovací činitel *MF* (viz rovnice 1) zahrnuje činitel stárnutí světelného zdroje (*LLMF*), činitel funkční spolehlivosti světelných zdrojů (*LSF*) a činitel znečištění svítidel (*LMF*).

Pro veřejné osvětlení je dle normy hodnota udržovacího činitele $MF \geq 0,6$. Nízký *MF* vede při návrhu osvětlovací soustavy k předimenzování, aby byly zajištěny minimální světelné podmínky na pozemní komunikaci. Souhrnný přehled jednotlivých činitelů pro výpočet udržovacího činitele pro osvětlovací soustavy s různými světelnými zdroji uvádí tabulka 2.

$$(1) \quad MF = LLMF \cdot LSF \cdot LMF$$

U venkovního osvětlení činitel znečištění úzce souvisí se stupněm krytí (*IP*) svítidla, resp. jeho optické části. Pro dvouletý cyklus čištění a při středním znečištění ovzduší je pro svítidla se stupněm krytí optické části *IP6X* dle CIE 136:2000 činitel znečištění $LMF=0,89$.

Svítidla s vysokým stupněm krytí mají vysokou hodnotu činitele znečištění, a tudíž i udržovacího činitele. Proto nedochází při návrhu k předimenzování a následnému přesvětlování komunikace převážně v počátečním stádiu provozu. Z toho důvodu je pak i provoz soustavy se svítidly s vysokým *IP* hospodárnější.

Světelný zdroj	LLMF	LSF	LMF	MF
HPS	0,90	0,96	0,89	0,77
CMH	0,87	0,99		0,77
LED-CLO	0,99	1,00		0,88
LED-standard	0,75	1,00		0,67

Tabulka 2 – Činitelé vybraných druhů světelných zdrojů

LED svítidla s CLO technologií, která mají *LLMF* roven přibližně jedné, umožňují dimenzovat osvětlovací soustavu s většími roztečemi mezi stožáry. Použití svítidel s LED-CLO výrazně zmenšuje investice na výstavbu soustavy oproti svítidlům vybavená běžnými LED moduly, které mají vysoký *LLMF*.

Vypočítané hodnoty

V tabulce 3 jsou uvedeny výpočty rozteče stožárů L pro vybraná svítidla s různými světelnými zdroji. Počet svítidel je určen na 1 km pozemní komunikace.

Typ svítidla a difuzoru		Světelný zdroj	P [W]	L [m]	N [ks /1km]
SGP 352 1xSON-TPP 150W EB FX1 P1HV2	FG	HPS 150W	164	35	29
SGP 352 1xSON-TPP 100W EB FX1 P1HV2	FG	HPS 100W	112	26	38
SGP 352 1xCPO 90W EB FX1 P3HV2	FG	CMH 90W	99	27	37
SGS 254 GB 1xSON-TPP 150W CP P2	GB	HPS 150W	164	42	24
SGS 253 GB 1xSON-TPP 100W CR P3	GB	HPS 100W	112	32	31
SGS 253 GB 1xCPO 90W EB OC P3	GB	CMH 90W	99	28	36
BGP352 T15 1xECO99-3S/740 DW	FG	LED-CLO 85W	85	41	24
BGP352 T15 1xECO71-3S/740 DW	FG	LED-CLO 61W	61	31	32
BGP352 T15 1xGRN88-3S/740 DW	FG	LED 67W	67	28	35
FG=rovné sklo (flat glass) GB=vypouklé sklo (glass bowl)					

Tabulka 3 – Parametry použitých svítidel

Vstupy pro ekonomické výpočty

Doba provozování veřejného osvětlení ročně je počítána na 4000 h, což odpovídá průměru v ČR. Do výpočtu energií vstupují jen variabilní náklady. Je počítáno s cenou 2,10 Kč za 1 kWh. Ve výpočtech je zahrnuta tvorba fondu oprav. Roční příspěvek do fondu oprav je 3% z pořizovací ceny osvětlovací soustavy.

Úkony údržby byly stanoveny na základě stupně krytí svítidel a užitých světelných zdrojů dle standardů CIE. S čištěním svítidel se počítá každé 2 roky a s výměnou výbojových zdrojů plošně každé 4 roky. V případě svítidel se světelnými diodami se s hromadnou výměnou LED modulů nepočítá. Střední doba života led modulů nepřekročí plánovanou dobu provozu svítidel 15 let. Provoz celé osvětlovací soustavy je počítán na dobu 30 let.

Provozní měrné výdaje

Provozní výdaje jsou vztaženy k době provozování 1 rok a s určitou pravidelností se opakují po celý život provozovaného zařízení. Jsou to roční výdaje na spotřebovanou elektrickou energii C_E , roční výdaje na výměnu světelných zdrojů (zprůměrováno) C_Z , roční výdaje na čištění svítidel (zprůměrováno) C_M .

$$(2) \quad C_E = N \cdot P_c \cdot t_r \cdot C_{el}$$

kde: N je počet svítidel soustavy (v úseku 1km) [ks], P_c je příkon světelného zdroje včetně ztrát v předřadníku [kW], t_r je roční doba provozu soustavy [h], C_{el} je cena elektrické energie, 1kWh [Kč].

$$(3) \quad C_Z = \frac{N}{T_V} \cdot (C_{zd} + C_v)$$

Kde: T_V je perioda skupinové výměny zdrojů [rok], C_{zd} je cena světelného zdroje [Kč], C_v je cena práce za výměnu světelného zdroje [Kč]

$$(4) \quad C_M = \frac{N}{T_m} \cdot C_m$$

Kde: C_m jsou výdaje na čištění svítidla (včetně práce) [Kč], T_m je perioda čištění svítidel [rok]

Celkové roční výdaje na provoz soustavy C_C se vypočítají z rovnice (5)

$$(5) \quad C_C = C_E + C_Z + C_M + C_O$$

Kde: C_O jsou roční výdaje do fondu oprav osvětlovací soustavy [Kč].

Výpočet NPV

Celková doba provozování osvětlovací soustavy je 30 let. Rozhodujícím ekonomickým kritériem je NPV (výdajů). Diskontní sazba pro výpočet NPV je 2%. Výpočet je upraven o inflaci. Je počítáno s roční mírou inflace 3%.

$$(6) \quad NPV = \sum_{t=0}^T CF_t \cdot (1+r)^{-t}$$

Kde: T je doba provozování / života [rok], t je dané časové období, CF_t je Cash Flow daného období upravené o inflaci [Kč] a r je diskont.

Cash Flow daného období upravené o inflaci je vypočítáno z následující rovnice.

$$(7) \quad CF_t = \text{Příjmy}_t - \text{Výdaje}_t ; \text{Příjmy}_t = 0$$

Provoz soustav VO, které jsou majetkem obcí, je hrazen z veřejných financí. Provozování VO je neplacená služba veřejnosti, na kterou neexistuje právní nárok. Služba je poskytována všem občanům bezplatně a nelze očekávat z provozování této služby příjem. Pro provozovatele (obec) je důležité vynakládat za provoz a údržbu VO finanční prostředky s maximální efektivitou.

$$(8) \quad CF_t = CF_0 \cdot (1+i)^t$$

Kde: CF_t je Cash Flow daného období [Kč], i je roční míra inflace.

Dosažením rovnice (8) do rovnice (6) dostaneme výsledný vzorec (9) pro výpočet NPV jako sumu diskontovaných CF jednotlivých období upravených o roční míru inflace.

$$(9) \quad NPV = \sum_{t=0}^T CF_t \cdot \left(\frac{1+i}{1+r} \right)^t = \min$$

Výsledek

Po provedených světelně technických výpočtech se svítidly osazenými různými světelnými zdroji bylo provedeno porovnání investičních a provozních výdajů. Výdaje pro jednotlivé navrhované varianty osvětlovacích soustav jsou shrnuty v tabulce 4.

Průměrné rozdělení výdajů na vybudování soustavy veřejného osvětlení uvádí graf 1. Nejvyšší podíl na celkové vyšší pořizovacích výdajů osvětlovací soustavy VO mají výkopové zemní a stavební práce. Proto počet budovaných

světelných míst výrazně ovlivňuje počáteční investici a tudíž i výši výdajového NPV.

Graf 1 – Rozdělení dílčích výdajů na výstavbu osvětlovací soustavy

Navrhovaná varianta	Investice na výstavbu soustavy	Průměrné roční provozní výdaje	Elektrická energie – variabilní složka	Průměrné výdaje na světelné místo	NPV (doba provozování 30 let)
HPS 100W	1957,6	45,8	29,2	1,5	3683,6
HPS 150W	1811,2	45,8	33,1	1,9	3547,5
CMH 90W	2096,9	46,9	29,9	1,3	3938,3
HPS 100W (FG)	2104,2	55,3	35,8	1,5	4193,1
HPS 150W (FG)	1915,9	56,3	40,0	1,9	4001,2
CMH 90W (FG)	2118,8	59,2	30,8	1,6	4320,0
LED ECO99 (CLO)	2081,3	34,5	17,1	1,4	3716,9
LED ECO71 (CLO)	2338,9	38,1	16,4	1,2	4236,3
LED GRN88	2435,5	43,1	19,7	1,2	4558,6

Výdaje uváděny v tisících CZK / rok (vztaheno na 1 km)
Tabulka 4 – Přehled výdajů osvětlovacích soustav osazených svítidly s vybranými světelnými zdroji

Graf 2 – Srovnání dílčích výdajů všech navrhovaných soustav

Z grafu 3 je patrné, že nejvhodnější technicko-ekonomické řešení je použití svítidel s vypouklým difuzorem, v případě výbojových zdrojů a pro případ svítidel s LED je jednoznačně výhodnější užití LED modulů s CLO technologií o vyšším příkonu.

Podle grafu 3 vyplývá, že nejnižší NPV výdajů má varianta s HPS 150 W. To je zapříčiněno nejnižšími investičními výdaji na pořízení soustavy. Při pohledu na dílčí výdaje (graf 2) jsou varianty s HPS 150 W energeticky nejnáročnější.

V grafu 3 jsou zobrazeny celkové kumulované výdaje během třicetileté doby provozování.

Graf 3 – Srovnání kumulativního součtu NPV všech navrhovaných osvětlovacích soustav za dobu provozování 30 let

Graf 4 – Srovnání dílčích výdajů variant osvětlovacích soustav vhodných pro realizaci

Graf 5 – Srovnání kumulativního součtu NPV osvětlovacích soustav vhodných k realizaci za dobu provozování 30 let

V detailnějším pohledu z grafu 4 a grafu 5 vyplývá, že nejvhodnější technicko-ekonomické řešení pro zajištění normou stanovených parametrů na modelové pozemní komunikaci je použití svítidel osazených HPS 100 W nebo LED (CLO) moduly 85 W.

Závěr

Nejoptimálnější variantou osvětlovací soustavy pro osvětlení pozemní komunikace v městské zástavbě začleněnou do třídy osvětlení ME4b je soustava osazena svítidly s LED moduly 85 W s technologií CLO – Constant Light Output. Oproti soustavě se svítidly osazenými vysokotlakými sodíkovými výbojkami 100 W má vyšší počáteční investici na výstavbu, ale její provoz je méně nákladný. Světelný tok vysokotlaké výbojky 100 W a LED 85 W je srovnatelný (tabulka 1). U soustavy s LED 85 W je zapotřebí vybudovat méně světelných míst (tabulka 2) a v průběhu provozování odpadá plošná výměna světelných zdrojů.

Navrhovaná soustava se svítidly osazená LED moduly s příkonem 85 W má o 5% vyšší investiční výdaje na výstavbu ve srovnání se soustavou osazenou svítidly pro vysokotlaké sodíkové výbojky 100 W. Celkové průměrné roční provozní výdaje osvětlovací soustavy s LED svítidly jsou o 20% nižší oproti výbojkovým svítidlům. Výdaje na spotřebovanou elektrickou energii za rok jsou u osvětlovací soustavy s LED o 30% nižší než u soustavy s vysokotlakými sodíkovými výbojkami.

Rozdíl výše investičních výdajů na pořízení navrhované osvětlovací soustavy VO se svítidly pro HPS 100 W a LED (CLO) 85 W svítidly činí 120 000 Kč na 1 km budované osvětlovací soustavy. V případě průměrných ročních výdajů na provoz soustavy VO je rozdíl přibližně 12 000 Kč. Předpokládaná doba provozování osvětlovací soustavy je třicet let. Relativní spotřeba energie v tomto časovém horizontu dosáhne částky 360 000 Kč. NPV po dobu provozování (30 let) je u obou zmiňovaných variant přibližně shodné.

Výhodou LED oproti sodíkovým výbojkám je vyšší index podání barev R_a a vyšší teplota chromatičnosti T_c (tabulka 1). Vyšší index podání barev je vhodný především do městských oblastí, center, kde přispívá spolu s vyšší teplotou chromatičnosti k lepší zrakové pohodě účastníků silničního provozu.

Vyšší investice na pořízení osvětlení soustavy s LED 85W (CLO) a nižší provozní výdaje se vyrovnají osvětlovací soustavě osazené vysokotlakými sodíkovými výbojkami 100 W po 12 letech provozu. Po 12 letech provozu je osvětlovací systém osazen LED svítidly více ekonomicky efektivnější. Zlepšení komfortu účastníkům silničního provozu vlivem vyššího indexu podání barev je okamžitým přínosem LED osvětlovací soustavy.

REFERENCES

- [1] Sokanský, K. a kolektiv. Metodické pokyny pro obnovu, provoz a údržbu veřejného osvětlení. Ostrava: VŠB-TU, 2008
- [2] Habel, J. Světelná technika. Praha: ČVUT, 1981
- [3] ČSN CEN/TR 13 201-1 Osvětlení pozemních komunikací - Část 1: Výběr třídy osvětlení.
- [4] ČSN EN 13 201-2 Osvětlení pozemních komunikací - Část 2: Požadavky
- [5] Šuchmann, K. Ekonomie osvětlovacích soustav. Kurs osvětlovací techniky IX - základy osvětlování I. díl. Ostrava: ČSO RS, 1994

Authors: Ing. Theodor Terrich, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Technická 2, 166 27 Praha-Dejvice, Czech Republic, e-mail: territhe@fel.cvut.cz