ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektroenergetiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh chytrého osvětlení pro parkoviště

Bc. Jiří Timofiejev **2021**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	**Bc. Jiří TIMOFIEJEV**
Osobní číslo:	**E19N0074P**
Studijní program:	**N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Elektroenergetika**
Téma práce:	**Návrh chytrého osvětlení pro parkoviště**
Zadávající katedra:	**Katedra elektroenergetiky**

Zásady pro vypracování

1. Popište zásady osvětlování parkovišť z hlediska legislativního prostředí.
2. Vysvětlete principy a vlastnosti chytrého a dynamického veřejného osvětlení a možnosti jejich využití z pohledu současného stavu infrastruktury v ČR.
3. Analyzujte současný stav vývoje multifunkčních sloupů veřejného osvětlení s LED zdroji umožňující nabíjení elektromobilů a uveďte příklad jejich využití ve světě.
4. Ve vhodném softwaru navrhněte regulační schéma a model chytrého osvětlení parkoviště s možností nabíjení elektromobilů.
5. Analyzujte výhody a nevýhody chytrého osvětlení z pohledu ekonomiky a energetiky.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Normy ČSN EN kategorie: 13201-1(4)
2. IEEE Xplore Digital Library. Dostupné z: https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp
3. ŠAFAŘÍK, M., a kol. Veřejné osvětlení pro 21. století: Příručka pro města a obce, 2017. Dostupné z: https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/prirucka-vo-21.-stoleti-efekt-2017-porsenna.pdf
4. ŠAFAŘÍK, M., a kol. Jak na chytré osvětlení: Příručka pro obce a města, 2017. Dostupné z: https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/svetelne_znecisteni/SFILE/NNO_Prirucka_obce_20180911.pdf

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lenka Raková, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**

L.S.

Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 9. října 2020

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá chytrým a dynamický osvětlením. V diplomové práci je popsána charakteristika světla a jeho základní pojmy. Dále je zde popsána legislativa veřejného osvětlení, jaké třídy osvětlení rozeznáváme a co se v nich měří a požaduje. Potom následuje kapitola o osvětlovacích soustavách veřejného osvětlení, jaké komponenty obsahuje, systémy a strategie řízení veřejného osvětlení a nakonec popis dynamického systému veřejného osvětlení a jeho možného využití v České republice. Navazuje kapitola o chytrých, multifunkčních sloupech, jejich popis a využití. Dále pak kapitola o elektromobilech, popis baterií a způsoby jejich nabíjení. Nakonec tato diplomová práce obsahuje tři vypracované modely v programu Simulink, který je součástí programu MATLAB, kde na konci je ekonomické a energetické zhodnocení jednoho modelu.

Klíčová slova

Světlo, světelné veličiny, legislativa veřejného osvětlení, osvětlovací soustava, dynamický systém, multifunkční chytré sloupy, elektrická vozidla

Abstract

This master thesis deals with smart and dynamic street lighting. This thesis describes the characteristics of light and its parameters. Furthermore, the legislation of street lighting is described, what classes of street lighting are recognized and what is measured and required in them. This is followed by a chapter on street lighting systems, what components they contain, street lighting control systems and strategies and finally a description of dynamic street lighting systems and their possible usage in the Czech Republic. This is followed by a chapter on smart, multifunctional poles, their description and usage. Then there is a chapter on electric vehicles, a description of batteries and how to charge them. Finally, this thesis contains three models developed in Simulink, which is part of MATLAB, where at the end there is an economic and energy evaluation of one model.

Key words

Light, luminous quantities, street lighting legislation, lighting system, dynamic system, multifunctional smart poles, electric vehicles

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 27.5.2021 Bc. Jiří Timofiejev

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí mé diplomové práce Ing. Lence Rakové, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky, za skvělý osobitý přístup a metodické vedení práce.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK 10
ÚVOD 12
1 CHARAKTERISTIKA SVĚTLA A ZÁKLADNÍ TERMINOLOGIE 13
1.1 OSVĚTLENÍ A SVĚTLO 13
1.2 SVĚTELNĚ TECHNICKÉ VELIČINY A POJMY 15
2 LEGISLATIVA VEŘEJNÉHO OSVĚTLENÍ 23
2.1 VÝBĚR TŘÍDY OSVĚTLENÍ POZEMNÍ KOMUNIKACE 23
2.2 MĚŘENÍ A POŽADAVKY 24
2.3 UKAZATEL ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI 27
3 OSVĚTLOVACÍ SOUSTAVA VEŘEJNÉHO OSVĚTLENÍ 29
3.1 KOMPONENTY OSVĚTLOVACÍ SOUSTAVY 29
3.1.1 Optické systémy 29
3.1.2 Nosné konstrukce 31
3.1.3 Elektrické připojení 32
3.2 SYSTÉMY ŘÍZENÍ VEŘEJNÉHO OSVĚTLENÍ 33
3.2.1 Autonomní řízení 33
3.2.2 Centrální řízení 34
3.2.3 Dynamické řízení 34
3.3 STRATEGIE ŘÍZENÍ VEŘEJNÉHO OSVĚTLENÍ 35
3.3.1 Astronomické hodiny 35
3.3.2 Využití denního světla 35
3.3.3 Detekce dopravy 36
3.3.4 Stmívání 37
3.3.5 Zhodnocení strategií řízení veřejného osvětlení 37
3.4 DYNAMICKÝ SYSTÉM V PRAXI 38
3.5 DYNAMICKÝ SYSTÉM A JEHO VYUŽITÍ V ČESKÉ REPUBLICE 38
4 MULTIFUNKČNÍ CHYTRÉ SLOUPY 41
4.1 INTERNET VĚCÍ 41
4.2 CHYTRÝ SLOUP 42
4.3 VYUŽITÍ MULTIFUNKČNÍCH SLOUPŮ VE SVĚTĚ 47
5 ELEKTRICKÁ VOZIDLA 50
5.1 ELEKTROMOBIL A JEHO HISTORIE 50
5.2 BATERIE ELEKTROMOBILU 51
5.3 NABÍJENÍ ELEKTROMOBILŮ 54

6 NÁVRH CHYTRÉHO OSVĚTLENÍ PARKOVIŠTĚ 57
6.1 VÝBĚR POČTU NABÍJECÍCH MÍST 58
6.2 NÁVRH OSVĚTLENÍ PARKOVIŠTĚ MULTIFUNKČNÍMI SLOUPY 59
6.3 ZÁKLADNÍ MODEL CHYTRÉHO OSVĚTLENÍ PARKOVIŠTĚ 64
6.4 NÁVRH ŘÍDÍCÍHO SYSTÉMU NABÍJENÍ ELEKTROMOBILŮ A PROVOZU PARKOVIŠTĚ 66
6.4.1 Návrh regulátoru obsazenosti parkovacího místa 69
6.4.2 Návrh regulátoru nabíjení baterie 70
6.4.3 Návrh regulátoru OS parkoviště a řízení výkonu 71
6.4.4 Návrh kontrolních a informačních panelů se světelnou signalizací 72
6.5 FINÁLNÍ ZÁKLADNÍ MODEL 74
7 VÝSLEDKY SIMULACÍ NAVRŽENÉHO MODELU 77
7.1 PRVNÍ SIMULACE – VEŘEJNÉ OSVĚTLENÍ 77
7.1.1 Porucha na sloupu 79
7.2 DRUHÁ SIMULACE – OMEZENÝ VÝKON 80
7.3 TŘETÍ SIMULACE – ŘÍZENÍ VÝKONU 82
8 ENERGETICKÉ A EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ 83
ZÁVĚR 87
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ 89
SEZNAM PŘÍLOH 1
PŘÍLOHY 2

Seznam symbolů a zkratek

λ ..... Vlnová délka (m)

f ..... Frekvence (Hz)

c_0 ..... Rychlost šíření světla

Φ ..... Světelný tok (lm)

Ω ..... Prostorový úhel (sr)

I ..... Svítivost (cd)

L ..... Jas (cd/m^2)

η ..... Měrný výkon (lm/W)

Tc ..... Teplota chromatičnosti (K)

R_a ..... Index podání barev

$ULOR$ ..... Horní účinnost světla (%)

E ..... Osvětlenost (lx)

$\bar{L}$, ... Průměrný jas (cd/m^2)

$\bar{E}$ ..... Průměrná osvětlenost (lx)

U_i ..... Podélná rovnoměrnost jasu povrchu jízdního pásu pozemní komunikace

C, M, P ..... Třídy osvětlení

D_P ..... Měrný příkon (W/lx.m^2)

P ..... Výkon (W)

FEL ZČU ..... Fakulta elektrotechnická Západočeské univerzity v Plzni

IoT ..... Internet věcí

VO ..... Veřejné osvětlení

LED ..... Light emitting diode

EV PARK ..... Počet elektromobilů na parkovišti

$CREV$ ..... Teoretický rozvoj elektromobility

AllCar ..... Celkový počet předpokládaných vozů

PARK ..... Počet parkovacích míst na parkovišti

EV CHAR ..... Počet míst s nabíjecí stanicí

U ..... Elektrické napětí (V)

I ..... Elektrický proud (A)

SOC ..... State of charge (%)

P_C ..... Celkový výkon svítidel (kW)

E ..... Roční spotřeba elektrické energie (kWh)

S_R ..... Roční spotřeba veřejného osvětlení (Kč)

N_C ..... Celkové investiční náklady (Kč)

c_{mon} ..... Cena montáže (Kč)

c_{sv} ..... Cena svítidel (Kč)

c_e ..... Cena elektrické energie (Kč)

t_c ..... Roční doba využití (h)

Úvod

Jednou z nejdůležitějších služeb, které město může na svých veřejných místech poskytovat, je veřejné osvětlení a to je také dnes již neodmyslitelnou částí života. Pokud je osvětlovací soustava navržena správně, světlo nám dává pocit bezpečí a pohody. Chrání majetek a do jisté míry se podílí na bezpečnosti obyvatel na pozemních komunikacích a jejich okolí.

Pojem elektromobilita se dostává do okolního života v posledních letech stále více. Každý rok vycházejí stále nové plány o budoucnosti elektromobilů a jejich plánovaném množství v porovnání s celkovým počtem osobních automobilů. Hlavní předmět této práce je tedy zkombinovat obě již zmíněné věci dohromady a vytvořit ve vhodném softwaru regulační schéma chytrého osvětlení pro vybrané parkoviště, které obsahuje jak veřejné osvětlení, tak nabíjecí stanice pro elektromobily.

Většinou, například kvůli nedostatku financí, nedochází k renovaci osvětlovacích soustav za nové, chytré a tak výměny starých svítidel za nová, lepší LED svítidla, jestliže jejich majitelé nemají potřebu. Na druhou stranu, elektromobilů bude přibývat stále více a tak je nutnost instalovat více a více nabíjecích stanic. Zkombinování těchto dvou věcí dohromady ale dává chytrým, dynamickým osvětlovacím soustavám novou možnost užití.

1 Charakteristika světla a základní terminologie

1.1 Osvětlení a světlo

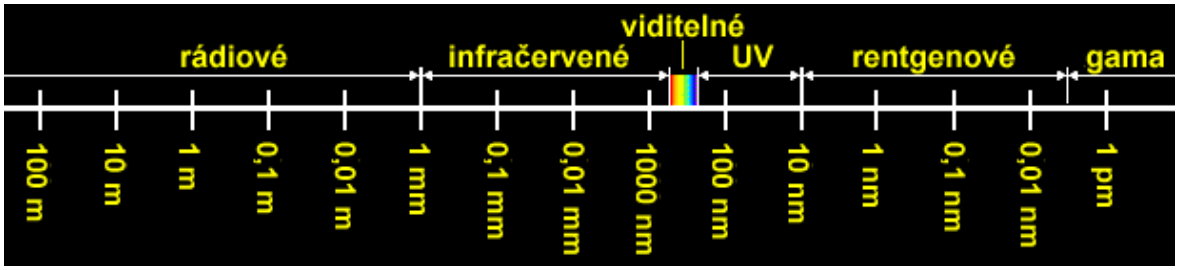
Světlo je definované jako viditelná část spektra elektromagnetického záření. Je to přenos (šíření) elektromagnetických vln nebo hmotných částí. Z toho vyplývá jeho duální charakter.

Spektrum světelného záření se skládá z elektromagnetického vlnění o různých kmitočtech. Vlnění může být formulováno pomocí frekvence f udávané v Hertzích (Hz), anebo pomocí převrácené hodnoty kmitočtu, značené jako vlnová délka λ udávané v nanometrech (nm). Vlnová délka je dána vztahem (1).

$$\lambda = c_0 . \nu^{-1} \ (m; \frac{m}{s}, Hz) \tag{1}$$

Kde c_0 je rychlost šíření světla ve vakuu, jeho hodnota je přibližně 3.10^9 m/s.

Optické záření se pohybuje v rozmezí od 1 nm do přibližně 1 mm, to je také vidět na Obrázku 1.[1], [2]

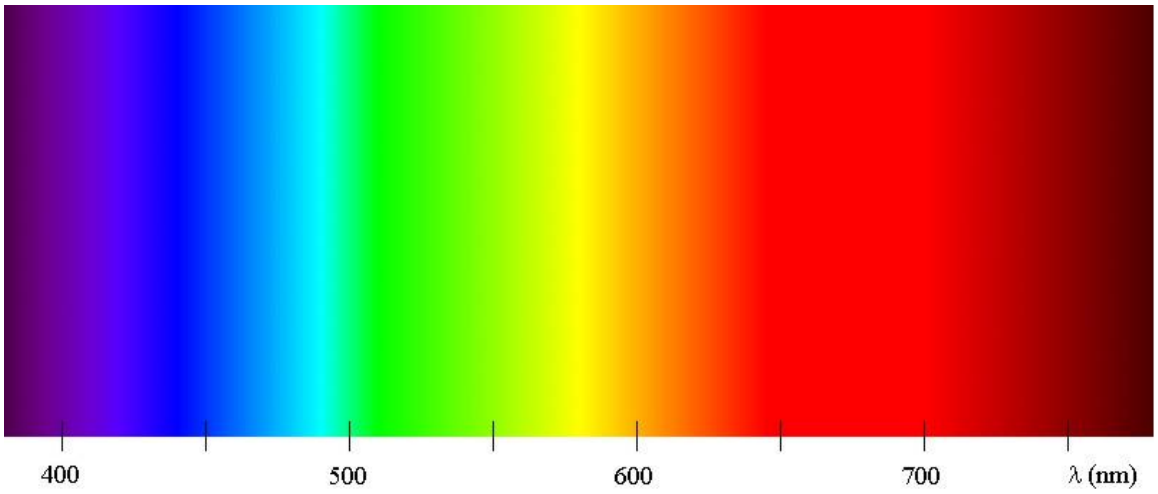


Obrázek 1: Elektromagnetické záření [8]

Světlo je vyhodnoceno zrakovým orgánem. Zrakový orgán postřehne optické záření, následně proběhne zpracování signálu v centru mozku, a to celé způsobuje zrakový vjem. Jednoduše se dá říci, že světlo slouží k rozpoznávání a orientaci v okolním prostředí. Záření, které oko postřehne, nazýváme viditelné spektrum záření. Působí na biologické, fyziologické i psychické funkce organismu. Zrak je jeden z nejdůležitějších smyslů a oko patří mezi nejdůležitější a nejcitlivější smyslové orgány člověka. Díky tomuto smyslu vnímáme téměř 80 % všech získaných informací z okolí. Lidské oko je za denního světla nejvíce citlivé na záření o vlnové délce 555 nm, pro noční vidění je to pak 505 nm. Dále je pak důležitá tzv. zraková pohoda. Je to příjemný psychický a fyzický stav, při

kterém plní zrakový orgán optimálně svou funkci a budí v člověku pocit pohody. [1], [2], [8]

Z Obrázku 2 je vidět jakou část optického záření nazýváme viditelným spektrem. Světlo tedy nezpůsobuje jen zrakový vjem, ale také barevný počitek. Viditelné spektrum je v rozmezí 380 až 760 nm. Tato hodnota není zcela přesná, je pouze průměrná, záleží na mnoha faktorech, například na spektrální citlivosti oka pozorovatele. Zleva je ohraničeno ultrafialovým zářením (UV - ultraviolet), zprava je ohraničeno infračerveným zářením (IR – infrared).



Obrázek 2: Barevné spektrum [9]

To znamená, že barevné spektrum začíná fialovou barvou s nejmenší vlnovou délkou a končí červenou barvou s největší vlnovou délkou. Lidské oko je schopno rozeznat až 128 barevných tónů. Tabulka 1 udává hrubé rozdělení barev podle jejich vlnové délky. [1], [2], [9]

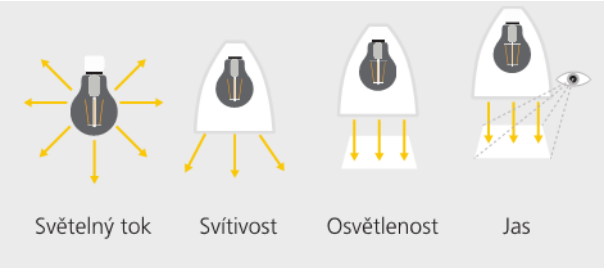
Tabulka 1: Tabulka rozdělení barev [6]

vlnová délka *λ* (nm)	**Barevný tón**
625 - 800	červená
590 - 625	oranžová
565 - 590	žlutá
520 - 565	zelená
500 -520	tyrkysová
430 - 500	modrá
400 - 430	fialová

Při špatném osvětlení se projevuje námaha zraku, která způsobí zvýšení únavy organismu, zrakovou nepohodu, vyšší vypětí člověka a může se promítat i do rizika vzniku oslnění, přehlédnutí jakéhokoliv předmětu či chodce, atd. V krajním případě by díky všem těmto rizikům mohlo dojít na pozemních komunikacích až k vážné nehodě. [1], [2], [6]

1.2 Světelně technické veličiny a pojmy

K zhodnocení světla se používají dva typy veličin: radiometrické a fotometrické veličiny. Radiometrické veličiny slouží k popisu energie přenesené pomocí záření. Jsou sice fyzikálně velmi objektivní, ale ve světelné technice nejsou nejdůležitější, protože nevypovídají o schopnosti vjemu oka. Na to slouží právě fotometrické veličiny, viz Obrázek 3.



Obrázek 3: Definice veličin [3]

Fotometrické veličiny jsou pro světelnou techniku důležitější, protože dle nich se hodnotí kvalita osvětlení v daném prostoru, což je velice podstatné pro bezpečnost a k zajištění vhodného světelného prostředí pro vykonávání určité zrakové činnosti pro danou aplikační oblast. Také je důležité zhodnotit zrakový výkon, tedy kvalitu příjmu a zpracování informací. Základní světelné veličiny a pojmy ze světelné techniky lze definovat následovně dle [1], [2], [3]:

- ***Světelný tok Φ***

Část zářivého toku, která je schopna vytvořit zrakový počitek. Dá se také říci, že je to celkové množství vyzařovaného světelného záření jednoho světelného zdroje viditelného lidským okem. Světelný tok odpovídá množství světla, které lidské oko může skutečně zaznamenat, protože citlivost oka se liší podle různých vlnových délek a u každého jedince je individuální. Jednotkou světelného toku je lumen (lm).

- ***Prostorový úhel* Ω**

Velikost plochy *dA* vyťaté obecnou kuželovou plochou na povrchu jednotkové koule, u které je její střed totožný s vrcholem uvažované kuželové plochy. Největší hodnoty dosahuje pro plochu, která je rovna povrchu celé koule, tj. plnému prostorovému úhlu $\Omega_{max} = 4\pi$ sr. Nemusí se ale jednat o výpočet jen kulové plochy, ale často také dochází k výpočtu plochy obdélníkové. Jednotkou prostorového úhlu je steradián (sr).

- ***Svítivost I***

Svítivost představuje prostorové rozložení světla a udává intenzitu světelného toku vztaženou na prostorový úhel. U pozemních komunikací musí prostorové rozložení světelného toku zajistit, aby komunikace a účastníci silničního provozu byli dostatečně osvětleni, za to vyzařování do horního poloprostoru je častokrát nežádoucí s ohledem na riziko vzniku rušivého osvětlení. Svítivost se udává v kandelách (cd) a platí, že 1 cd = 1 lm / 1 sr. [1], [2], [3], [7], [19]

- ***Osvětlenost, nebo také intenzita osvětlení***

Osvětlenost představuje množství světla, které dopadá na daný povrch. U venkovního osvětlení dosahuje jmenovitá řada hodnot od 2 do 2 000 lx. Používá se pro hodnocení osvětlenosti komunikace nižších tříd a pro konfliktní místa. Obvykle je požadována minimální osvětlenost ve složitější dopravní situaci (například oblasti s dohlednou vzdáleností menší než 60 m, nebo kde jsou mezi účastníky silničního provozu také chodci a cyklisté) 7,5 až 50 lx. Jednotkou osvětlenosti je lux (lx).

- ***Jas L***

Jas představuje množství světla (plošnou i prostorovou hustotu světelného toku) u osvětlených povrchů nebo předmětů, které vnímá lidské oko. Používá se pro hodnocení komunikací, které jsou určené pro motorovou dopravu. Obvykle je požadován minimální jas u střední až rychlostní komunikace 0,3 až 2 cd/m^2. Tento jas obvykle spadá do mezopického vidění (soumračné vidění, jedná se o smíšené vidění oběma fotoreceptory sítnice čípky a tyčinkami), které spojuje fotopické vidění (vidění za denního světla pomocí čípků) a skotopické vidění (noční vidění oka adaptovaného na tmu, při kterém se využívají tyčinky). V tomto rozpětí je reakční doba člověka na vizuální podněty podmíněna jak

jasem, tak i barevnými kontrasty. Z toho tedy plyne, že pro lidské vnímání, a tedy i pro bezpečnost dopravy, je důležitý jas osvětlené oblasti i podání barev světelného zdroje.

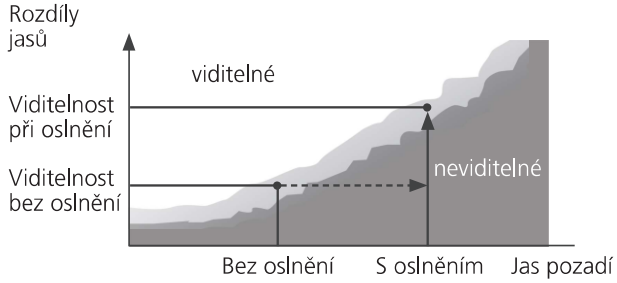
- ***Měrný výkon η***

Měrný výkon světelného zdroje udává účinnost, se kterou světelný zdroj přemění elektrickou energii na světelnou. Používá se pro vzájemné porovnávání účinnosti jednotlivých světelných zdrojů. Jednotkou měrného výkonu je lumen na watt (lm/W). [1], [2], [3], [19]

- ***Oslnění***

Nepříjemný vizuální efekt způsobený nerovnoměrným rozložením jasu nebo vysokými kontrasty v zorném poli, které nutí oko k rychlému přizpůsobení. Máme dva druhy oslnění: omezující neboli fyziologické, které je způsobené rozptýlením světla v optickém prostředí oka a tak dojde ke snížení kontrastní citlivosti, a rušivé neboli psychologické, které je spojené se subjektivním pocitem nepohodlí.

Omezující oslnění nastává pro každého jedince jindy, záleží na citlivosti zrakového orgánu. Přesto ho ale lze hodnotit objektivně. Vychází se z faktu, že lidské oko je schopno rozeznat rozdíly jasu v určitém osvětleném prostředí až po určitý práh. Tento práh se dá porovnat se situací ve stejném osvětleném prostřední, když se do něj přidá zdroj oslnění. Tímto porovnáním lze odvodit tzv. prahový přírůstek. Na Obrázku 4 je zobrazen graf prahového přírůstku.



Obrázek 4: Graf přírůstku oslnění [3]

Rušivé oslnění je zcela subjektivní a neexistuje ujednocený způsob jak ho ohodnotit. I přes to byla vypracována devítibodová DeBoerova škála (kde 1 znamená nesnesitelné a 9 značí postřehnutelné), která je v oblasti veřejného či venkovního osvětlení nejpoužívanější.

Omezující oslnění snižuje schopnost člověka vnímat jemné kontrasty a tak může dojít ke zhoršení zrakového vnímání řidiče v dopravním provozu. Řidič pak není schopen rozeznat důležité objekty, ovládat světlomety nebo správně vyhodnotit kritickou situaci v dopravě. Oslnění se tedy stává nebezpečným i pro ostatní uživatele pozemních komunikací. [1], [2], [3], [11], [19]

Bylo vypracováno několik klasifikací rušivého a omezujícího oslnění. Třídy svítivosti udávají požadavky na omezující oslnění, zahrnují úrovně G1 a G6 a jsou více popsány v normě ČSN EN 13201-2 a v Tabulce 2:

Tabulka 2: Třídy svítivosti [5]

Třída	Maximální svítivost (cd/klm)			Jiné požadavky
	v úhlu 70° a větším	v úhlu 80° a větším	v úhlu 90° a větším	
G1		200	50	žádné
G2		150	30	
G3		100	20	
G4	500	100	10	SVÍTIVOST nad 95° má být 0
G5	350	100	1	
G6	350	100	0	

Tabulka 3 uvádí třídy indexu oslnění. Z ní je dále možno vybrat třídu, která umožní splnit odpovídající požadavky na snížení rušivého osvětlení. Index oslnění se vypočítá ze vzorce (2):

$$Index\ oslnění = I.A^{-0,1}\ (cd/m; C, m^2), \tag{2}$$

kde I je nejvyšší hodnota svítivosti v úhlu 85 °, který se měří od svislice zdola v libovolném směru a A je průmět plochy svítících částí svítidla do roviny kolmé ke směru I. [1], [2], [3], [5], [19]

Tabulka 3: Třídy indexu oslnění [5]

Třídy	Max hodnota indexu oslnění (cd/m)
D0	-
D1	7000
D2	5500
D3	4000
D4	2000
D5	1000
D6	500

- ***Teplota chromatičnosti Tc***

Tento parametr udává, kdy je teplota barvy žádaného světelného zdroje rovna teplotě černého zářiče při totožné chromatičnosti záření. S nižší teplotou dochází k potlačování modré složky a naopak s rostoucí teplotou dochází k potlačování červené složky. Je to jeden ze základních ukazatelů kvality světelného zdroje. Níže na Obrázku 5 je vidět rozsah teploty chromatičnosti.

Obrázek 5: Teploty chromatičnosti některých světelných zdrojů [10]

Teplota chromatičnosti užívaná pro osvětlení veřejných komunikací se zpravidla pohybuje v odstínech žluté, neutrální bílé a modrobílé a odpovídá tak teplotě chromatičnosti v rozmezí 2 500 až 5 000 K. V různých částech Evropy lidé upřednostňují jiné teploty chromatičnosti pro venkovní i vnitřní prostory. Například studené bílé světlo (namodralá bílá) je více oblíbené v jižních státech, zatímco ve střední a severní Evropě převládá daleko více teplé bílé světlo. [1], [2], [3], [10], [19]

Je nutné mít na paměti, že teplota chromatičnosti světelného zdroje ovlivňuje nejen energetickou účinnost celé osvětlovací soustavy, ale může mít dokonce fyziologické účinky na lidi a zvířata. Bílé světlo podporuje vnímání lidského oka mnohem účinněji než žluté. Zdá se být tedy mnohem jasnější a z tohoto důvodu preferováno v místech složitějších dopravních situací s výskytem různých účastníků silničního provozu (například cyklistů, automobilů, chodců atd.). Oproti tomu teplé bílé světlo může být více využíváno v rezidenčních oblastech.

- ***Index podání barev R_a***

Světelné zdroje se stejnou teplotou chromatičnosti mohou mít různě kvalitní světlo z pohledu toho, jak jsou schopny produkovat barvy. Konkrétní podání barev nezávisí na teplotě chromatičnosti světelného zdroje, ale závisí na spektrálním složení světla, tzn. v jakých barvách (rozsahu vlnových délek) a v jaké intenzitě světelný zdroj vyzařuje světelný tok. Světelné zdroje vyzařující ve všech vlnových délkách (například žárovky nebo některé typy LED) poskytují nejlepší reprodukci barev. Světelné zdroje vyzařující pouze vybrané vlnové délky (například výbojky a některé typy LED) reprodukují barvy hůře.

Například pro chodce je velice důležité, aby byli schopni rozeznat obličeje ostatních, což vyžaduje také schopnost vnímat barevný kontrast. Lidé se cítí bezpečněji, dokáží-li rozeznat rysy obličeje jiné osoby na vzdálenost čtyř metrů (detailnější vysvětlení je uvedeno dále v textu u tříd osvětlení pozemních komunikací). Pro rozeznání rysů obličeje jsou vhodné osvětlovací soustavy s indexem podání barev 80 a více. Podání barev se vyjadřuje indexem podání barev R_a, maximální hodnota je 100. [1], [2], [3], [19]

- ***Barevná stálost***

U LED zdrojů je jednou z negativních vlastností možný výskyt barevné nestálosti během doby životnosti. Se stárnutím LED zdrojů se může měnit teplota chromatičnosti, což je zapříčiněno například opotřebení materiálu, kontaminací nebo následkem opotřebení systému. Další příčiny se dále zkoumají a patří mezi ně například vysoká provozní teplota, vyšší provozní proudy nebo degradace optických materiálů následkem UV záření.

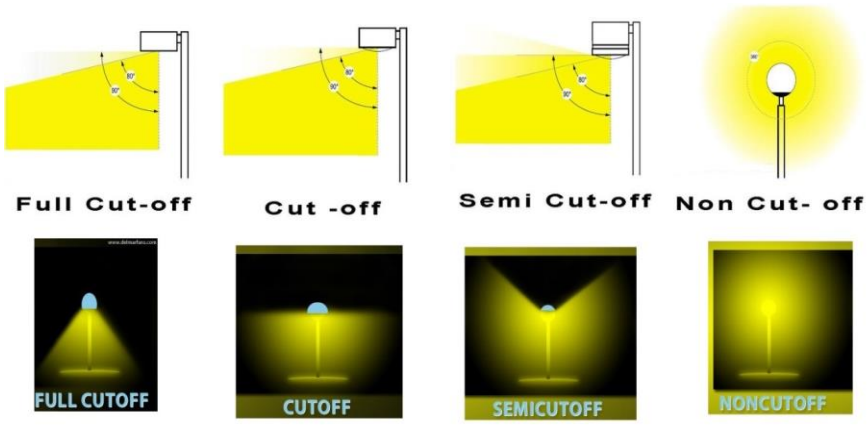
- ***Světelné znečištění***

Umělé osvětlení může mít na lidi a zvířata negativní účinky. Světelným znečištěním rozumíme nežádoucí osvětlení venkovních oblastí. Lidé ve městech či v blízké oblasti měst mohou osvětlení vnímat pouze jako pouhé osvětlení noční oblohy, ovšem umělé veřejné osvětlení v rezidenčních oblastech může negativně ovlivnit také spánkový cyklus lidí. Zvěř zase používá přirozené denní osvětlení jako navigační systém a pro orientaci, kde jim znovu může umělé osvětlení uškodit. Může je zmást nebo vyděsit. Mnoho zvířat také vnímá jiný rozsah vlnových délek.

Jedním ze způsobů k omezení světelného znečištění je použití vhodných svítidel, které jsou zaměřena pouze na potřebný osvětlovaný prostor. Vyzařované světlo od svítidla směrem vzhůru (do horního poloprostoru) je počítáno pomocí horní účinnosti světla (ULOR) (3):

$$ULOR = \frac{světelný\ tok\ vyzařovaný\ směrem\ vzhůru}{celkový\ světelný\ tok}\ (\%; lm, lm) \qquad (3)$$

Tabulka 2 udává maximální svítivost pro daný úhel. Třídy svítivosti mají právě jinou požadovanou horní účinnost světla. Záleží na místních podmínkách a potřebách. Svítidla podle vertikálního rozložení světla se nazývají: plně cloněná svítidla (full cut-off), cloněná svítidla (cut-off), částečně cloněná svítidla (semi-cut-off) a necloněná svítidla (non-cut-off). Jejich rozdělení i s vyzařovaným světelným tokem směrem vzhůru lze vidět na Obrázku 6. [1], [2], [3], [19]



Obrázek 6: Rozdělení svítidel [12], [13]

Dalším způsobem k omezení světelného znečištění je inteligentní systém řízení, tzv. Smart Lighting. Správným řízením osvětlovací soustavy je možno vhodně nastavit intenzitu osvětlení vzhledem na aktuální denní a roční období a dle aktuálních klimatických podmínek. [1], [2], [3], [12], [13], [19]

2 Legislativa veřejného osvětlení

Hlavní cíl veřejného osvětlení je zlepšit a zajistit bezpečnost na pozemních komunikacích po setmění. Kvalitní soustavy veřejného osvětlení umožňují uživatelům pozemních komunikací rozeznávat překážky, osoby a zdroje možného nebezpečí v blízkosti pozemní komunikace, nebo přímo na ní. Díky kvalitnímu systému osvětlení mohou všichni účastníci provozu rychle a pozorně reagovat na dané situace, což také sníží vážné dopravní nehody, ke kterým po setmění dochází. Kvalitativní kritéria pro osvětlení definuje soubor evropských norem ČSN EN 13201:2016 nazývané Osvětlení pozemních komunikací. Jednotlivé normy jsou [3], [4], [5], [19]:

- ČSN CEN/TR 13201-1 Osvětlení pozemních komunikací – Část 1: Výběr tříd osvětlení
- ČSN EN 13201-2 Osvětlení pozemních komunikací – Část 2: Požadavky
- ČSN EN 13201-3 Osvětlení pozemních komunikací – Část 3: Výpočet
- ČSN EN 13201-4 Osvětlení pozemních komunikací – Část 4: Metody měření
- ČSN EN 13201-5 Osvětlení pozemních komunikací – Část 5: Ukazatelé energetické náročnosti

2.1 Výběr třídy osvětlení pozemní komunikace

Norma ČSN EN 13201 a její části definuje soustavu parametrů, které jsou určeny pro podrobný popis všech typických situací, ke kterým může na pozemních komunikacích dojít. Umožňuje stanovit kvantitativní a kvalitativní požadavky pro osvětlení podle konkrétních podmínek. Třídy osvětlení se rozlišují podle určitých parametrů, kterými jsou geometrické upořádání oblasti, vzhled okolního prostředí, skladba dopravního proudu, intenzita dopravy a návrhová rychlost.

Některé parametry se mohou v ročních obdobích nebo i během nočních hodin měnit a tak v průběhu provozu se postupem času mění hodnota průměrného jasu a osvětlenosti. Jednotlivé úseky pozemní komunikace mohou tedy náležet do různých tříd osvětlení. Proto pro normu a výběr třídy osvětlení jsou důležité intenzita dopravy, skladba dopravního proudu, aktuální odrazné vlastnosti vozovky skutečný stav povrchu vozovky (světlá, tmavá, mokrá, zasněžená, solená, suchá) a vliv také může mít i jasnost okolí. [3], [4], [5], [19]

2.2 Měření a požadavky

V druhé části normy ČSN EN 13201 se uvádějí specifikace pro jednotlivé třídy osvětlení, které určují soubor fotometrických požadavků podle typu pozemní komunikace a podle jednotlivých uživatelů pozemní komunikace, jejich požadavků a potřeb. Podle třídy se hodnotí jas L, osvětlenost E, jejich průměrné hodnoty, které se značí čarou nad písmenem **(**$\bar{L}$, $\bar{E}$**)** a celková U_0 a podélná rovnoměrnost U_i jasu povrchu jízdního pásu pozemní komunikace. Jejich hodnoty se pak dle normy dělí na minimální, udržované, minimální udržované a maximální. Parkoviště patří do třídy osvětlení C, tedy konfliktní oblast. Níže jsou uvedeny základní specifikace a požadavky jak pro konfliktní oblasti, tak i pro ostatní třídy osvětlení definované ve zmíněné normě. [3], [4], [5], [19]

- ***Třídy osvětlení pro konfliktní oblasti – C***

Tyto třídy jsou určeny pro konfliktní oblasti podzemních komunikací, kde se doprava skládá převážně z motorových vozidel. Konfliktní oblasti jsou takové oblasti, kde se proudy vozidel vzájemně kříží, nebo kde ústí do oblasti se zvýšeným výskytem chodců, cyklistů nebo dalších uživatelů pozemních komunikací. Jsou to oblasti, kde dochází ke změně geometrie pozemní komunikace, jako například snížení počtu jízdních pruhů nebo zúžení jízdního pruhu nebo pásu. Je u nich zvýšená pravděpodobnost srážky mezi vozidly, mezi vozidly a chodci a dalšími uživateli pozemních komunikací, anebo mezi vozidly a pevnými objekty. Pro návrh tříd osvětlení C je doporučené hodnotící kritérium jas. Pokud jsou pozorovací vzdálenosti krátké, anebo za při dalších faktorech, kdy nelze jako hodnotící kritérium použít jas, lze pro část nebo celou konfliktní oblast použít osvětlenost jako hodnotící kritérium. Vztah mezi jasem a průměrnou horizontální osvětleností je závislý na odrazných vlastnostech povrchu vozovky. Pozemní komunikace třídy C nemají povinná kritéria pro minimální oslnění, ale jsou specifikovány limitní hodnoty maximálních přípustných hodnot. Přehled hodnot požadovaných veličin pro konfliktní oblast je uveden v Tabulce 4. [3], [4], [5], [19]

Tabulka 4: Požadované hodnoty veličin třídy osvětlení C [5]

Třída	Vodorovná osvětlenost		Maximální hodnota oslnění (%)
	minimální udržovaná hodnota $\bar{E}$ (lx)	minimální hodnota U_i (-)	
C0	50	0,4	15
C1	30	0,4	15
C2	20	0,4	15
C3	15	0,4	20
C4	10	0,4	20
C5	7,5	0,4	20

Pro stanovení třídy osvětlení C se nejdříve stanoví součet váhových hodnot (V_{ws}) jednotlivých parametrů (V_w), číslo třídy osvětlení je dáno vztahem (4):

$$C = 6 - V_{ws}\,(-) \tag{4}$$

Výsledným číslem se určí třída osvětlení v intervalu hodnot od 1 do 5. Tabulka parametrů pro výběr třídy C udává Příloha A.

- ***Třídy osvětlení pro motorovou dopravu – M***

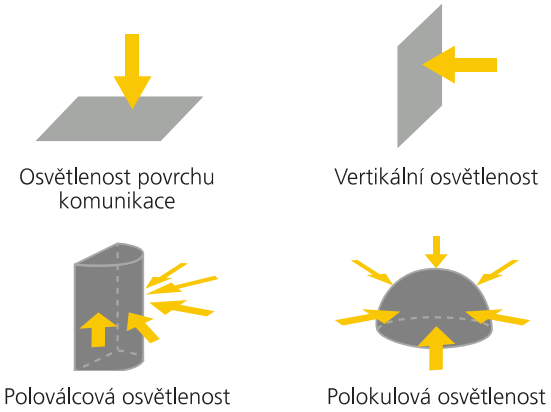
Tyto třídy osvětlení jsou určeny pro řidiče motorových vozidel na dopravních pozemních komunikacích. V některých zemích jsou to také pozemní komunikace v oblastech pro bydlení se střední až vysokou povolenou rychlostí. Pro nově projektované pozemní komunikace se využívá výhledová intenzita dopravy po 10 let. Ke splnění normy je potřeba dodržet minimální průměrnou hodnotu jasu povrchu vozovky, minimální celkovou rovnoměrnost jasu povrchu vozovky (oddělené minimální hodnoty pro mokrý a suchý povrch), minimální rovnoměrnost jasu jízdních pruhů a maximální úroveň oslnění a je potřeba zajistit dostatečné osvětlení bezprostředního okolí komunikace. Pro stanovení třídy osvětlení M se nejdříve stanoví součet váhových hodnot (V_{ws}) jednotlivých parametrů (V_w), číslo třídy osvětlení je dáno vztahem (5):

$$M = 6 - V_{ws}\,(-) \tag{5}$$

Výsledným číslem se určí třída osvětlení v intervalu hodnot od 1 do 6.

- ***Třídy osvětlení pro chodce a pomalou dopravu – P***

Tyto třídy jsou určeny pro chodce a cyklisty pohybující se po chodnících a cyklostezkách a pro řidiče motorových vozidel pohybujících se nízkou rychlostí po komunikacích v obytných oblastech, pro osvětlení krajnic, parkovacích pruhů a dalších dopravních prostorů, které leží podél nebo odděleně od dopravní pozemní komunikace. Zrakové úkoly a požadavky řidičů a chodců se v mnoho faktorech liší. Kritéria pro pozemní komunikace třídy P zahrnují minimální a průměrnou udržovanou osvětlenost v oblasti komunikace. V případě že je potřeba rozeznávání obličeje, je nutné brát v úvahu další kritéria pro vertikální a poloválcovou osvětlenost. Zobrazení těchto osvětleností je na Obrázku 7. [3], [4], [5], [19]



Obrázek 7: Zobrazení osvětleností [19]

Pro stanovení třídy osvětlení P se nejdříve stanoví součet váhových hodnot (V_{ws}) jednotlivých parametrů (V_w), číslo třídy osvětlení je dáno vztahem (6):

$$P = 6 - V_{ws}\,(-) \tag{6}$$

Výsledným číslem se určí třída osvětlení v intervalu hodnot od 1 do 6.

- ***Další části normy***

Norma ČSN EN 13201-3 popisuje matematické postupy a metody, které by se měly využívat pro výpočet funkčních požadavků v normě ČSN EN 13201-2.

Norma ČSN EN 13201-3 popisuje vhodné metody pro měření. Celkem jsou popsány čtyři základní typy situací, ve kterých by mělo měření proběhnout, a to [3], [4], [5], [19]:

- ve fázi konečného testování, aby bylo možné ověřit dodržení požadavků normy a návrhu,
- v předem určených intervalech během doby života soustavy veřejného osvětlení ke kvantifikování degradace a rozhodnutí o možné výměně,
- nepřetržitě nebo v předem určených intervalech k možné úpravě světelného toku svítidel v případě, že pozemní komunikace využívá adaptivní osvětlení (například když se osvětlenost nebo jas řídí podle objemu dopravy, času, počasí nebo jiných faktorů).

2.3 Ukazatel energetické náročnosti

V normě ČSN EN 13201-5 jsou popsány dva způsoby energetické náročnosti a měly by se použít oba při posuzování energetické náročnosti.

- ***Měrný příkon (PDI – Power Density Indicator)***

Měrný příkon se značí D_P a měří se ve wattech na lux a metr čtvereční (W/lx.m^2). Měrný příkon charakterizuje energetickou náročnost dané instalace veřejného osvětlení a také umožní porovnání různých druhů návrhů v rámci jednoho samotného projektu systému veřejného osvětlení. Geometrické uspořádání a podmínky se liší, a proto mohou být hodnoty měrného příkonu využity k porovnání různých druhů návrhů právě jen u stejné instalace. K výpočtu měrného příkonu pro jakoukoliv danou oblast je potřeba celkový instalovaný příkon soustavy *P* (celé instalace nebo její části), který zahrnuje příkony všech světelných míst a výkon ostatních zařízení, které nejsou součástí osvětlovacích bodů, ale jsou nezbytné pro jejich provoz. Dále je potřeba udržovaná průměrná horizontální osvětlenost $\bar{E}$ každé podoblasti (vozovka a její pruhy, přechod, chodník atd.) Travnaté pásy a oblasti okolního osvětlení jsou vyloučené. Osvětlenost lze odvodit ze stanovení tříd veřejného osvětlení. Výsledný vztah pro výpočet měrného příkonu lze definovat pomocí rovnice (7). [3], [5], [19]

$$D_P = \frac{P}{\sum_{i=1}^{n}(\bar{E}_i . A_i)} \left(\frac{W}{lx \cdot m^2}; W, lx, m^2\right), \tag{7}$$

kde $\bar{E}_i$ je udržovaná průměrná hodnota horizontální osvětlenosti podoblasti, A_i je plocha podoblasti *i* a *n* představuje počet podoblastí, které se mají osvětlit.

- ***Roční spotřeba energie (AECI – Annual Energy Consumption Indicator)***

Roční spotřeba energie je označována jako D_E a měří se ve watthodinách na metr čtvereční (Wh/m^2). Jelikož se třída osvětlení zpravidla mění během ročních období i během noci, měrný výkon by se měl tedy počítat pro každou třídu zvlášť. K porovnání rozdílu energetické spotřeby mezi dvěma různými návrhy s počítáním na celý roční provoz je potřeba provést výpočet roční spotřeby. Proto je nutné rok rozdělit do jednotlivých provozních období s různými hodnotami celkového instalovaného příkonu soustavy. Roční spotřebu energie lze vypočítat dle vztahu (8). [3], [5], [19]

$$D_E = \frac{\sum_{j=1}^{m}(P_j . t_j)}{A} \left(\frac{Wh}{m^2}; Wh, m^2\right), \tag{8}$$

kde P_j značí příkon celé soustavy během j-tého období, t_j je doba trvání j-tého období pří příkonu P_j, A označuje plochu oblasti osvětlené stejným světelným uspořádáním a m je počet období s různými hodnotami P_j.

Celková doba trvání t_j by měla pokrývat celý rok. Mělo by se zahrnout do výpočtu také období, kdy osvětlení není zapnuto (tedy během dne), protože i tehdy dochází ke spotřebě energie. Další informace jsou popsány v přílohách normy ČSN EN 13201-5.

3 Osvětlovací soustava veřejného osvětlení

Tato kapitola se zabývá osvětlovacími soustavami veřejného osvětlení, jejich popisem, složením, jejich aktuální podobou a jaká je možná budoucnost chytrého řízení osvětlovacích soustav, tzv. Smart Lighting. Na světě již pár takových chytrých systémů je, dokonce je jeden i v České republice.

3.1 Komponenty osvětlovací soustavy

Komponenty osvětlovacích soustav veřejného osvětlení lze rozdělit do tří základních kategorií, a to:

- Optické systémy – svítidla, světelné zdroje a předřadník
- Nosné konstrukce – stožáry a jejich základy, výložníky atd.
- Elektrické připojení – dodávka elektrické energie, zařízení pro ovládání a měření

3.1.1 Optické systémy

- ***Světelný zdroj***

Všechny druhy světelných zdrojů využívaných ve veřejném osvětlení přeměňují elektrickou energii na viditelné světlo. Mezi základní parametry patří světelný tok Φ (lm), měrný výkon η (lm/W), elektrický příkon P (W), index podání barev Ra (–), doba života t (h) a teplota chromatičnosti T_c (K). Podle způsobu vzniku světla se světelné zdroje dělí na teplotní (ty se ovšem již v současnosti veřejném osvětlení již nevyužívají), výbojové a polovodičové. Jmenovitě jsou to vysokotlaké rtuťové výbojky, halogenidové výbojky, nízkotlaké a vysokotlaké sodíkové výbojky a světelné diody (LED). Tabulka 5 na další straně udává porovnání charakteristických vlastností jednotlivých světelných zdrojů.

Už dlouhá desetiletí ve veřejném osvětlení dominují vysokotlaké výbojky. Zdroje LED však v posledních letech umožňují nahradit všechny ostatní typy světelných zdrojů. Vysokotlaké sodíkové výbojky ovšem nadále zůstávají vhodnou volbou pro určitá místa, například na dálnicích. Jsou vysoce energeticky účinné, ale poskytují velice nízké podání barev (tj. nízkou rozlišitelnost barev), to ale u mnoha aplikačních oblastí venkovního osvětlení nebývá překážkou. [1], [2], [3], [19]

Tabulka 5: Světelné zdroje [2]

Parametr	**Světelný zdroj**					
	Rtuťová výbojka	Kompaktní zářivka	Halogenidová výbojka	Nízkotlaká sodíková výbojka	Vysokotlaká sodíková výbojka	Světelná dioda LED
Světelný tok Φ (lm)	1900 – 22 000	2 900 - 6 500	4 700 - 25 000	1 800 - 32 000	4 000 - 33 000	100 - 70 000
Příkon P (W)	50 - 400	36 - 80	35 - 250	18 - 180	50 - 250	1 - 450
Měrný výkon η (lm/W)	37 - 57	50 - 80	80 - 100	100 - 175	75 - 130	100 - 150
Doba života (h)	až 12 000	až 20 000	až 18 000	až 20 000	až 28 000	až 100 000
Index podání barev Ra (-)	39 - 56	80 - 90	80 - 90	0	20 - 25	65 - 90
Teplota chromatičnosti T_c (K)	3 500 - 4 200	2 700 - 6 500	3 000 - 4 000	1 800	2 000	2 600 - 8 500
Výhody		nízké investiční náklady, dobré podání barev	velmi dobré podání barev	vysoký měrný výkon	dlouhá doba života, vysoký měrný výkon	vysoký měrný výkon, velmi dobré podání barev, dlouhá doba života
Nevýhody	nízký měrný výkon, kratší doba života, horší podání barev	teplotní závislost světelného toku, horší usměrnění světelného toku, kratší doba života	vyšší investiční náklady, kratší doba života	index podání barev nulový, velký rozměr svítících částí	nízký index podání barev	teplotní závislost technických parametrů, vysoká ceny
Využití	Obslužné komuni-kace	Obslužné komunikace, rezidenční oblasti, pěší zóny	pozemní komunikace s převažujícími chodci, přechody pro chodce	osvětlování výpadových dálnic a silnic	všechny typy komunikací mimo s převažujícími chodci	všechny typy pozemních komunikací

- ***Svítidlo***

Kompletní přístroj skládající se z krytu a z ostatních částí požadovaných pro montáž a funkčnost a to včetně světelných zdrojů, částí pro ovládání, předřadníků, elektrického vedení atd. LED světelné zdroje jsou obvykle zabudovány ve speciálně navržených plochých svítidlech a tak optimálně využijí své optické vlastnosti. Ostatní typy LED svítidel, které jsou vyrobené po vzoru klasických svítidel, nahrazují obvykle klasická svítidla. V takových svítidlech ovšem nejsou optimálně využity optické vlastnosti a ani systém odvodu tepla. I tak to ale může být využito tam, kde kompletní renovace osvětlovací soustavy není vhodná. Pro výrobce svítidel je zkušební norma IEC 6098-2-3, která poskytuje obecná doporučení pro svítidla a jejich kryty. Měly by být odolné proti korozi, nebo by měly být chráněné vhodným korozivzdorným provedením. Obsahují optické prvky jako čočky, reflektory a refraktory, které zajistí požadované rozložení světla, zajistí patřičnou míru oslnění a světelného znečištění. [1], [2], [3], [19]

- ***Reflektory***

Reflektory slouží k nasměrování světla a přizpůsobení světelného toku. Zrcadla reflektoru mnohonásobně odráží světla a tak přispívají k relativně rovnoměrnému jasu na danou osvětlovanou plochu. Reflektory tedy také pomáhají snížit světelné znečištění a oslnění.

- ***Refraktory***

Refraktory, nebo také prismatické čočky. Směřují světlo ze zdroje i z reflektoru a k tomu poskytují další ochranu proti poškození.

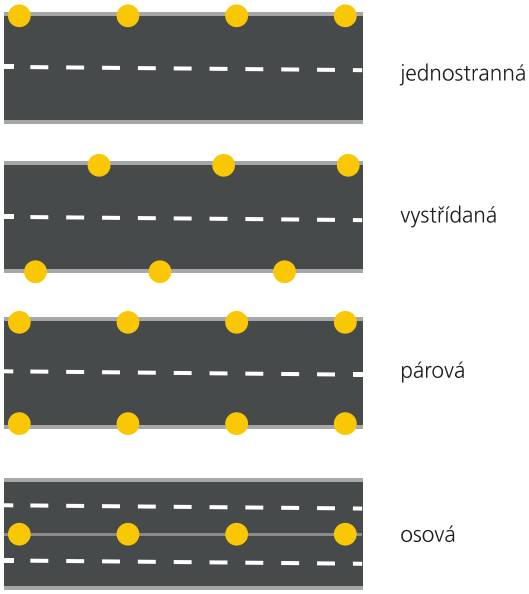
- ***Čočky***

Používají se k nasměrování světla a jsou připevněny přímo ke světelným diodám. Výše uvedené definice optických prvků svítidel jsou převzaty z literatury [1], [2], [3], [19]

3.1.2 Nosné konstrukce

Stožáry musí splňovat normu ČSN EN 12767. Podle ní existují tři kategorie podpěrných konstrukcí: s vysokou absorpcí energie (HE), s nízkou absorpcí energie (LE) a bez absorpce energie (NE). Absorpcí energie rozumíme snížení rychlosti vozidla po nárazu.

Na Obrázku 8 jsou uvedena nejběžnější uspořádání soustav veřejného osvětlení. O přesném umístění stožárů a montážní výšce se rozhoduje v procesu projektování a obyčejně se provádí za pomoci specializovaného softwaru. Cílem není jen udržení minimálního jasu, ale také udržení rovnoměrnosti jasu, která závisí na rozložení svítivosti svítidel. [1], [2], [3], [19]

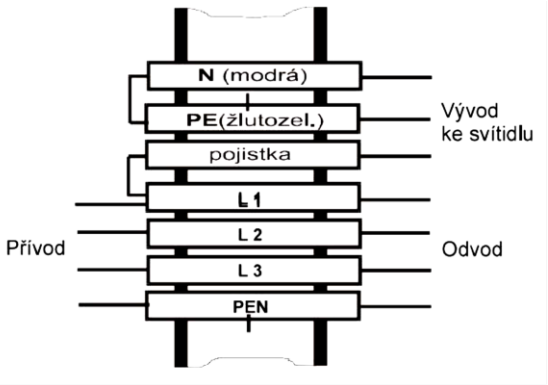


Obrázek 8: Uspořádání soustav veřejného osvětlení [3]

3.1.3 Elektrické připojení

Zařízení veřejného osvětlení a elektrické přípojky musí splňovat požadavky z norem především z řady ČSN 33 2000-1 až ČSN 33 2000-7-741. Elektrická část stožáru musí obsahovat elektrickou výzbroj odpovídající jmenovitému příkonu. Jištění se provádí pomocí pojistek 6 A nebo 10 A dle požadovaného jmenovitého příkonu. Na stožáry lze připojit i další zařízení, která se napojují z rozvodů veřejného osvětlení, jako zařízení pro řízení a regulaci dopravy, světelné dopravní značky, atd.

Elektrické přípojky ve veřejném osvětlení se provádí paprskovým rozvodem a nové jsou provedeny třífázově, 4-vodičově. Dále jsou přípojky připojeny do sítě TN-C s jmenovitým napětím 230/400 V a v místě, kde je odbočení z rozvodu NN musí být elektrická přípojka jištěna. Schéma napájení a barevné značení je vidět na Obrázku 9.



Obrázek 9: Schéma napájení stožáru [1]

Měděné kabely v soustavě TN-C mají minimální průřez 4 x 10 mm^2. Kabely se ukládají v kabelových chráničkách nebo kabelových žlabech. Chráničky se následně zasypají zeminou bez suti a kameniva s velikostí alespoň 10 cm. Zemnící vodič by měl být připojen ke kovovým stožárům, k instalačním trubkám i k dalším zemnícím tyčím namontovaným do stožárových základů. K ochraně před úrazem elektrickým proudem se využívá automatického odpojení od zdroje a ochranným pospojováním, odpojovací doba od zdroje je 5 s. Jako ochrana před atmosférickým přepětím se využívají svodiče přepětí umístěné v rozváděči. U veřejného osvětlení se hodnotí kvalita elektrického napětí, jelikož jeho kolísání a pokles může způsobit blikání a vést tak k flikru. Odpor vedení a kabelů veřejného osvětlení způsobuje pokles napětí. Povolený úbytek napětí mezi rozvaděčem a nejvzdálenějším bodem je 3 %. [1], [2], [3], [19]

3.2 Systémy řízení veřejného osvětlení

Výhodou aktivního řízení osvětlovacích soustav jsou značné energetické úspory, je potřeba ale zvážit také větší technologickou a konstrukční náročnost a vyšší finanční náklady. Existují tři druhy řídících systémů osvětlení: autonomní, centralizované a dynamické řízení.

3.2.1 Autonomní řízení

U autonomního řízení jsou svítidla předem naprogramovaná na provoz v určitém čase. Je to nejsnadnější a nejlevnější řešení, protože nevyžaduje žádné další systémy řízení. Možnosti naprogramování jsou ale omezené a není tedy možné řízení upravit pro dobu víkendů nebo dovolené. Další nevýhodou je špatná přesnost vnitřních hodnot a jakákoliv modernizace systému vyžaduje změny v každém svítidle zvlášť. Je zde možnost využití senzoru okolního osvětlení do každého svítidla, to ale nicméně vede k dalším výdajům.

3.2.2 Centrální řízení

Při centrálním řízení osvětlovací soustavy vyšle centrální řídící systém všem svítidlům v rámci jedné skupiny signál, obvykle přes elektrické vedení. Je to snadné a levné nastavení, umožňuje navíc jistou pružnost při nastavení osvětlení dle různých potřeb. Například dle čidla centrálního řízení je možno rozhodnout, kdy je potřeba světlo zapnout a následně poslat signál s pokynem na řídící středisko, přičemž se řídí nejen časovým nastavením, ale zohledňuje také počasí. Taková čidla by se ale měla pravidelně čistit za účelem dosáhnutí nejvyšší účinnosti a funkčnosti. Další možností je stmívání podle denní doby, které vypne nebo omezí světlo na určitých místech v určitou dobu. Takové řešení zajistí celkem zásadní snížení nákladů na energie a sníží se tak i světelné znečištění, na druhou stranu může dojít ke zhoršení navigace účastníků silničního provozu. Tok informací je zde pouze jednosměrný. To tedy znamená, že centrální jednotka poskytne signál určitým skupinám světel, ale informace o místních podmínkách od jednotlivých svítidel už se k němu nazpátek nedostanou. Centrální i dynamické systémy vyžadují zavedení různých úrovní systémů ICT (informační a komunikační technologie). Ty poskytují další možnost energetických úspor, zároveň ale vyžadují zapojení dalších zdrojů a odborných znalostí. S větší komplexitou vzniká vyšší riziko systémových selhání a zadavatelé i projektanti by si měli uvědomit, zda je možné zajistit v krátké časové lhůtě odbornou podporu. [3], [19]

3.2.3 Dynamické řízení

Toto řízení zajistí největší rozsah řízení. Svítidla je možné ovládat jednotlivě i v rámci skupin a navíc může centrální systém shromažďovat informace o stavu svítidel (poruchy, provozní nebo okolní teplota, okolní světlo, doprava a přítomnost chodců, spotřeba energie). Změny lze provést softwarově u centrálního řídícího serveru, není tedy nutné změny provádět na hardwaru. Jak bylo již řečeno, taková pružnost s sebou nese mnohem vyšší náklady a větší počet součástek, které zvyšují riziko selhání. Jsou proto potřeba vyškolené osoby, které takový systém obsluhují. Svítidla by měla být funkční i v případě obdržení chybného nebo dokonce žádného příkazu. Současné inteligentní řídící systémy jsou řízené centrálním řídícím systémem, což často bývá server v kanceláři úřadů. Tento server sleduje velký počet svítidel a zasílá příkazy do jednotlivých svítidel, svítidla obvykle přijímají příkazy prostřednictvím lokálních sítí.

Dva technologické koncepty jsou zapotřebí pro volbu systému řízení – komunikační technologie, tedy jakým způsobem se informace přenáší a komunikační protokol, tedy jak se informace kódují. V soustavě veřejného osvětlení existují dvě vrstvy komunikace: centrum vydávající příkazy a místní sítě, které posílají informace jednotlivým svítidlům, kde informace lze přenést pomocí kabelu nebo bezdrátově.

Komunikace pomocí kabelů je obvykle vedena přes obvyklý Ethernet, který představuje tradiční technologie. Tímto způsobem by se teoreticky daly kabely použít k propojení svítidel a místní sítě, to by ale vedlo k další kabeláži a tedy k dalším výdajům. Místo toho se využívá komunikace pomocí elektrického vedení (PLC), kde se k výměně informací modulují signály elektrického vedení. Bezdrátové signály mezi sítí a svítidly lze udělat smíšené a zajistit tak nepřerušení spojení mezi jednotlivými uzly. Lze využít protokoly DALI, ZiGBee nebo 6LoWPAN. [3], [19]

3.3 Strategie řízení veřejného osvětlení

Bylo vyvinuto mnoho různých strategií veřejného osvětlení a každá má svoje výhody a nevýhody. Některé strategie se dokonce dají kombinovat s jinými.

3.3.1 Astronomické hodiny

Mají přesné informace o době, kdy zapadá a vychází slunce v jakékoliv zeměpisné poloze. Astronomické hodiny jsou schopny s časovým předstihem vypočítat tyto informace pro dlouhé časové rozpětí, na druhou stranu nemusí zohledňovat některé zeměpisné aspekty jako vysoké kopce nebo hory, které zamezují výhledu na slunce. Umožňují nastavit jednoduché vypnutí a zapnutí pro specifické časy a také nastavit dobu s nízkým provozem. Osvětlení tak zůstává aktivní, ale s nižší nastavenou provozní intenzitou. Hlavní výhoda je, že nevyžadují žádné složité komunikační systémy. [3], [19]

3.3.2 Využití denního světla

Zde se využívají fotočidla k zachycení denního světla. Když úroveň denního světla poklesne nebo se zvýší, dostane se tak mimo prahové hodnoty, fotočidla zareagují a řídící systém osvětlovací soustavy upraví intenzitu umělého osvětlení podle potřeby, tak aby byly splněny požadavky dle normy. Tento způsob je vhodný zvlášť pro stmívání při dlouhém soumraku nebo při nepříznivém počasí. K zajištění jejich řádné funkce je třeba fotočidla pravidelně čistit. Také je důležité rozhodnout, jestli se každé svítidlo bude řídit

vlastním fotočidlem, nebo se bude jedním fotočidlem řídit skupina svítidel. V prvním případě systém nabízí větší pružnost, ale vyžaduje nákup většího množství svítidel a čidel, které je nutné pravidelně čistit. Druhé řešení nabízí méně složitý systém, ale nedokáže zohlednit všechny místní nepříznivé podmínky a představuje pro systém možnost poruchy. Fotočidla se mohou stát součástí velké infrastruktury ICT, lze tak díky nim pozorovat hodnoty osvětlenosti na pozemních komunikacích v reálném čase a odhalit a řešit možné problémy nedostatečného osvětlení.

3.3.3 Detekce dopravy

Na mnoha pozemních komunikacích, zejména v noci, je dopravní provoz velice nízký. Nejběžnějšími technologiemi k detekci dopravy jsou pohybová čidla. Jednotlivé typy detektorů zahrnují:

- ***Ultrazvukové detektory pohybu***

Zachycují změnu zvukových vln odrážejících se zpět od pohybujícího se předmětu. Tyto čidla nevyžadují přímý výhled, jsou levné a dokáží zachytit předměty bez ohledu na materiál a silnější vítr na ně nemá takřka žádný vliv. Nevýhodou je jejich nízký rozsah detekce a vysoké teploty a vlhkost na ně mohou mít negativní dopad.

- ***Mikrovlnné detektory pohybu***

Tyto detektory zachycují změny v mikrovlnách, které se odráží od pohybujícího se předmětu, podobně jako fungují radary. Dokáží zachytit i velmi malé pohyby a neovlivňuje je okolní teplota. Nevýhodou jsou jejich vysoké náklady a mohou způsobit falešné zachycení pohybu. [3], [19]

- ***Infračervená čidla***

Detekují teplo osoby nebo předmětu v jejich okolí. Jsou to čistě pasivní čidla, nevysílají zvuk ani žádné záření. Nevýhodou je možná falešná aktivace způsobená teplým vzduchem, horkými předměty nebo deštěm.

- ***Zpracování obrazu***

Využívají se zde videokamery jako inteligentní čidla. Využívají inteligentní algoritmy, pokryjí větší oblast než ostatní systémy a existuje zde malá pravděpodobnost falešné

detekce. Nevýhodou je potřeba kvalitního a složitého softwaru a tím pádem i vyšší náklady a vyšší spotřeba elektrické energie.

Systémy lze kombinovat a kompenzovat tak svoje nevýhody. V případě zjištění pomocí čidel nedostatečného osvětlení, tak by soustava osvětlení měla splnit požadavky pro určitou třídu komunikace. To znamená, že regulační člen by neměl nastavovat pouze konkrétní čidlo, ale i více sousedních svítidel, aby nedošlo k oslnění účastníků silničního provozu.

3.3.4 Stmívání

Může se stát, že za určitých podmínek (doprava, počasí a okolní světlo) je umožněno (dovoleno), že svítidla se světelnými zdroji nemusí být provozována po celou dobu na plný výkon. Astronomické hodiny, čidlo dopravy nebo čidlo denního světla ve správné kombinaci se stmíváním mohou zajistit obrovské energetické úspory, u některých projektů dokonce až 85 %. Navíc dochází díky postupnému (plynulému) snižování a zvyšování intenzity osvětlení k eliminaci rušivého oslnění obyvatel. Pro stmívání se nejlépe hodí LED svítidla, probíhá totiž u nich stmívání plynule a téměř bez jakýchkoliv technických komplikací, to bohužel u ostatních druhů světelných zdrojů ve veřejném osvětlení nejde. Buď u nich stmívání není možné, nebo dochází ke změnám (kolísání) barev vyzařovaného světla, nebo je jejich rozsah stmívání omezený. [3]

3.3.5 Zhodnocení strategií řízení veřejného osvětlení

S dynamickým inteligentním osvětlením přichází potřeba se rychle zorientovat v řadě nových oborů a vyžadují pečlivé zvážení potenciálních překážek a omezení, které by bránily úspěšnému zavedení těchto technologií. Zákony, normy a předpisy často neberou v úvahu nejnovější rozvoj v technologii a je třeba, aby systémy řízení splňovaly všechny právní požadavky. Dalším problémem je odpovědnost, tedy pokud systém selže, tak musí být jasné, čí je to chyba. Zavedení dynamického řízení veřejného osvětlení může vyžadovat značně složitý systém a účastník, který implementaci provádí, by měl zajistit potřebnou podporu a údržbu. Zejména je to důležité, pokud jsou jednotlivé součástky od různých výrobců. U svítidel by měl také být naprogramován výchozí stav pro případ, že dostanou chybný signál, nebo nedostanou žádný signál. Takový stav by měl představovat základní řízení dle denní doby, aby byly splněny požadavky i bez dynamických prvků.

V případě selhání systému by zodpovědné osoby měly během krátké časové lhůty nastavit část nebo celou soustavu do výchozího stavu bez nutného zásahu externích odborníků.

3.4 Dynamický systém v praxi

I přes těžkou, náročnou a nákladnou implementaci dynamického systému řízení veřejného osvětlení se již takový systém testuje i využívá. Za zmínku jistě stojí hlavní město Walesu, Cardiff. Společnost Interact vybudovalo v roce 2018 v Cardiffu 14 000 propojených LED svítidel a snížila tak spotřebu energie o 60 %. Další takové projekty, ovšem v menším rozsahu, jsou chytré osvětlení pro Sabugal, Jakartu nebo Siegburg. Jako další zmínkou je pak město Aurich v Německu, kterému se ještě s propojením s dalšími možnostmi firmy Interact podařilo ušetřit 250 000 euro ročně. V Essenu mají 15 chytrých sloupů, kde pár sloupů mají navíc od chytrého osvětlení ještě nabíječku na elektromobil, o tom ale později v práci. V České republice je nainstalované chytré osvětlení v Dolních Břežanech, které vybudovalo na konci roku 2018 firma BYZANCE IT Solutions s. r. o. z ČVUT. Zde byl kladen důraz na vytvoření „chytré“ lampy, která ale bude vypadat jako klasické pouliční světlo (vzhled bez antén nebo přistavěných skříněk). Veškerá elektronika je tedy schovaná uvnitř lampy. Celkový výsledek je zobrazen na Obrázku 10. Dále pak stojí za zmínku společnost OMEXOM GA Energo a její program Smart City Polygon, kde mimo jiné je použito chytré veřejné osvětlení v areálu společnosti. [3], [14], [15], [16], [17]

Obrázek 10: „Chytrá“ pouliční lampa [16]

3.5 Dynamický systém a jeho využití v České republice

Součástí této práce by mělo být i zhodnocení distribuční sítě z pohledu chytrého a dynamického systému veřejného osvětlení, respektive je-li distribuční síť připravená na rozvoj elektromobility a v souladu s ním i na implementaci nabíjecích stanic pro

elektromobily, které jsou právě součástí dynamického veřejného osvětlení. Zkráceně se dá říci, že ano, ale je důležité si rozebrat k tomu patřičné kroky a potřeby.

Jelikož se technologie nabíjení a nabíjecích stanic stále rozvíjí, je potřeba důkladně a často sledovat potřebné informace. Každý z distributorů elektrické energie se podílí na měření zpětného vlivu elektromobilů do sítě. Například společnost E.ON Distribuce, a.s. v roce 2017 po jeden měsíc monitorovala pomalé i rychlé dobíjení elektromobilů pomocí jejich nabíjecího stojanu v Jihlavě. Byl zapojený přímo u distribučního transformátoru, po dobu měření nedošlo k vychýlení fázových napětí z povolené tolerance. Objevil se zde ovšem problém s dodržováním účiníku při nabíjení stejnosměrným proudem, to může způsobit problém zejména v nabíjecích stanicích připojených do sítě vysokého napětí. Pro větší porozumění má E.ON další měřící bod, a to nabíjecí stanici v Toužimi.

Jedním z klíčových parametrů, co se týče nabíjení elektromobilů z pohledu distribuční sítě, je řízení výkonu (tzv. Load Management). Způsoby řízení výkonu lze rozdělit:

- ***Proprietární***

Způsob řízení výkonu pro jednotlivce a jednotlivé zařízení. Patří sem například Wallbox, což je domácí nástěnná nabíječka, která pomocí svého firmware po připojení na internet umožňuje nastavit maximální limity odběru.

- ***Lokální energetická řešení***

V případě většího množství dobíjecích bodů. Využívá se centrální jednotka, nebo systém master-slave. Dále pak může být lokálním řešením stacionární uložiště elektřiny, typicky baterie, které se nabíjí v případě malého či žádného odběru nabíječek a naopak při velké zátěži energii poskytuje nazpět do elektrizační soustavy.

- ***Centrální systémové řízení***

Centrální systémové řízení je potřeba při dynamickém řízení nabíjecích stanic, kdy je potřeba měnit maximální výkon nebo odběr v závislosti na čase a energetické situaci. V prozatímní situaci v České republice jsou potřeba a využívají se zatím jen proprietární a lokální energetická řešení, s přibývající mírou dobíjení bude potřeba centrální systémové řízení.

Elektromobilita se v České republice rozvíjí relativně pomalu, to ale není úplně špatně. Díky tomu lze dál měřit, rozvíjet potřebné systémy pro řízení a přizpůsobovat distribuční síť podle potřeb zátěže. Z pohledu distribuční sítě momentálně „domácí“ ani veřejné nabíjení nepředstavuje žádné riziko kromě ultrarychlých dobíjecích stanic, které jsou dnes právě typicky vyvažovány pomocí lokálního uložiště elektrické energie. Zůstává tedy spíše otázka, jestli pro plánovaný rozvoj elektromobility v ČR bude vyráběn dostatek elektrické energie a zda bude ve všech částech elektrizační soustavy v ČR (zejména v DS) dostatečná kapacita stávajících přenosových a hlavně distribučních vedení a transformátorů Což je nutné hodnotit jednotlivě a dle plánované instalace dynamického veřejného osvětlení s nabíjecími stanicemi pro všechny uvažované konkrétní lokality ES v ČR. Pokud by nebyl rozvoj a implementace multifunkčních sloupů s možností nabíjení elektromobilů do veřejného osvětlení řádně analyzován, tak by mohlo dojít např. ke vzniku nesymetrie, přetížení stávajícího kabelového vedení, přetížení distribučních transformátorů, atd. Navíc, pokud by u usměrňovače (střídače) nabíječky elektromobilu byl navržen chybně LC filtr, tak by se mohly v DS vyskytnout i vyšší harmonické. Toto vše lze eliminovat právě řádně vypracovanou analýzou dopadu využití multifunkčních sloupů z hlediska nabíjení elektromobilů pro danou konkrétní územní oblast aplikace a správně navrženým řídícím systémem veřejného osvětlení a zejména řízením nabíjení elektromobilů z těchto multifunkčních sloupů.

Elektromobilita nejen, že nejspíš nezpůsobí v síti problémy, naopak při vzrůstajícím počtu decentralizovaných a obnovitelných zdrojů energie se uvažuje, že může dokonce přinést určitou formu stabilizace frekvence a napětí v ES. Pokud se rychlé nabíjení pojme správně, mohou se problematické výkyvy elektrické energie dodávané z větrných a fotovoltaických elektráren využít pro rychlonabíjení elektromobilů. Baterie elektromobilů také mohou fungovat jako zdroj energie, tedy mohou dodávat elektrickou energii v případě nouze zpět do distribuční sítě a sloužit částečně jako podpůrný lokální zdroj elektřiny. V budoucím vývoji tedy bude kladen důraz na centrální systémové řízení výkonu a na příslušné školení operátorů distribučních sítí a jejich inteligentní systém řízení sítě. [42], [43] [44], [45]

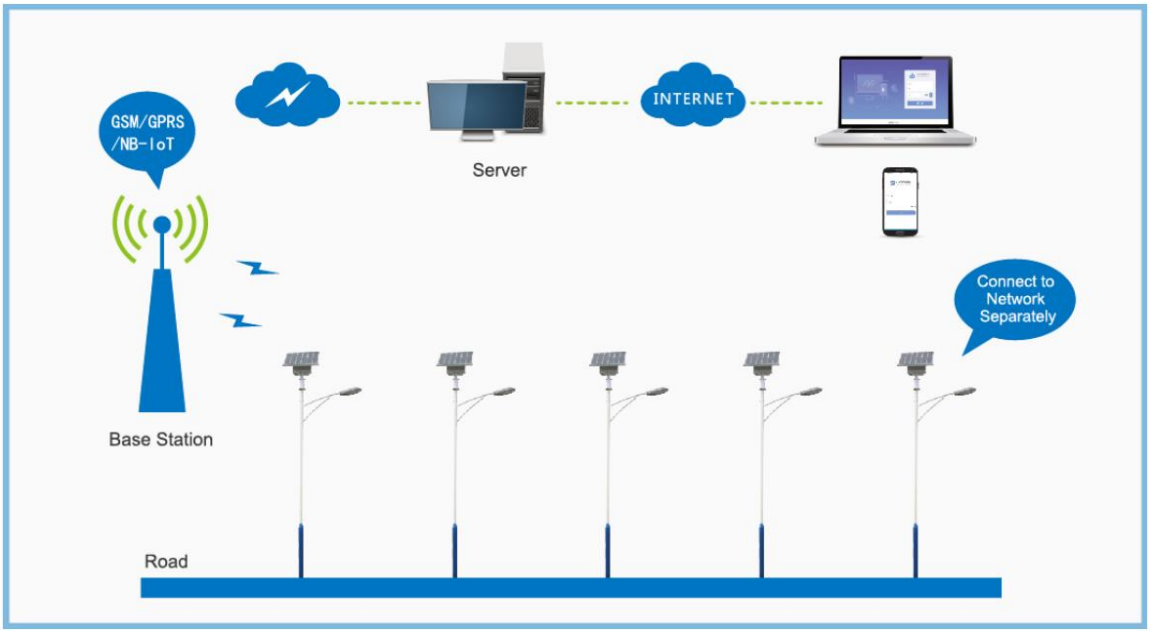
4 Multifunkční chytré sloupy

Velkým trendem a nutností v poslední době s vyhlídkou do budoucna je zajisté používání stále více obnovitelných zdrojů energie kvůli důrazu na životní prostředí. Chytré sloupy patří k prvním krokům k vytvoření Smart City (tzn. chytrého města). Přechod do nového desetiletí způsobí převrat v našem každodenním zacházení s energií.

Důvodem využívání chytrých sloupů je jejich multifunkčnost. Tyto chytré sloupy mohou obsahovat například Wi-Fi modul, LED světlo, silniční radary a kamery, detektory pohybu a mnoho dalších komponentů. Dalším důležitým faktorem je možnost provozování chytrých sloupů pomocí obnovitelných zdrojů energie, tedy využití slunce za pomoci fotovoltaických panelů, využití větru nebo jejich kombinací. Samozřejmě že chytrý sloup může být napájen i elektrizační soustavou, ale i malá výpomoc obnovitelných zdrojů energie ušetří planetu od uhlíkové stopy, i kdyby jen nepatrně. Dá se do nich umístit také baterie, která se může pomocí obnovitelných zdrojů energie dobíjet a následně posloužit jako zdroj elektřiny pro celý chytrý sloup. [18], [23]

4.1 Internet věcí

Chytrý sloup využívá Internet věcí (- anglicky Internet of Things, nebo také IoT). Obrázek 11 popisuje internet věcí ve veřejném osvětlení.



Obrázek 11: Internet věcí ve veřejném osvětlení [24]

Internet věcí popisuje síť fyzických objektů – „věcí“ – které jsou obsazeny senzory, softwarem a jinými technologiemi za účelem propojení a výměny dat s ostatními přístroji a

systémy přes internet, a tak vytvořit inteligentní, nebo také chytrý systém. V praxi ve veřejném osvětlení to znamená propojení těchto modulů v chytrém sloupu a pomocí internetu dálkově manipulovat s osvětlovací soustavou VO a řídit její provoz dle dané aktuální situace.

Definice internetu věcí se vytvořila k sjednocení několika technologií, real-time (tzn. v reálném čase) analytiky, strojové učení, senzory komodit a vestavěné systémy. Všechny vestavěné systémy, jako bezdrátová síť senzorů, ovládací systémy, automatizace (například bytů nebo celé budovy) a jiné, se podílejí na umožnění činnosti internetu věcí. Na spotřebitelském trhu se nejvíce spojuje s pojmem internet věcí koncept Smart Home (tj. chytrého domu), což také znamená přístroje a spotřebiče (osvětlení, termostaty, zabezpečovací systémy a další), které jsou součásti jednoho nebo více dálkově ovládaných systémů a mohou být ovládané pomocí zařízení sdruženým s daným systémem, jako je chytrý telefon nebo reproduktory s umělou inteligencí. Tato inovace ale nese svá vlastní rizika. Jsou zde obavy z ohrožení bezpečnosti a ztráty soukromí. Právě proto jsou vytvářeny normy, aby zamezily vzniku těchto negativních jevů. [18], [20], [23]

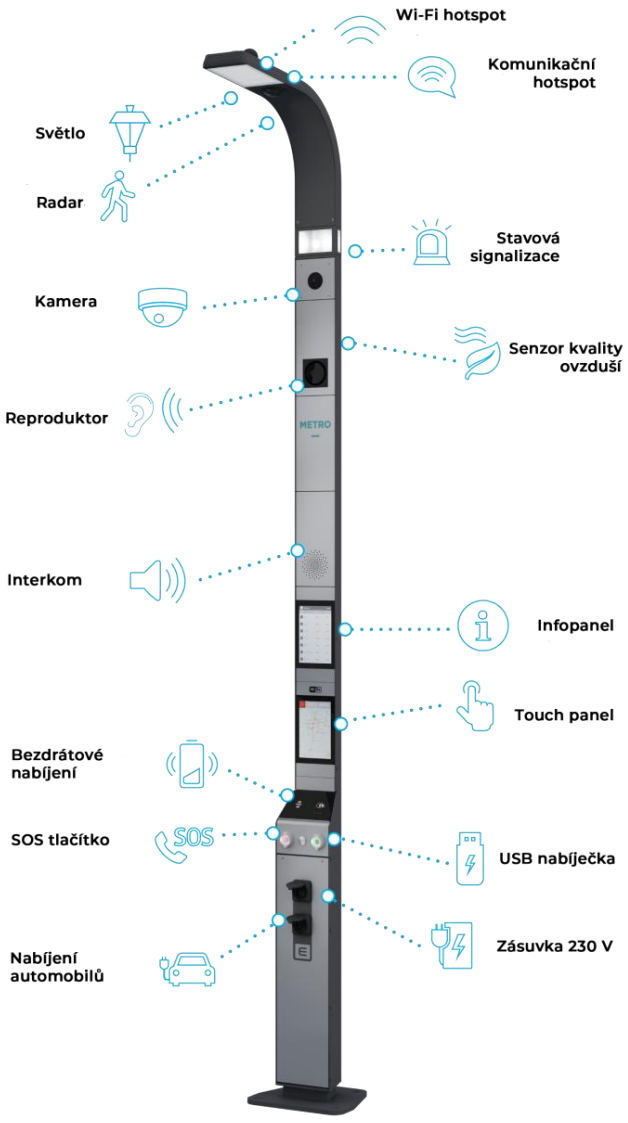
4.2 Chytrý sloup

Chytrý (multifunkční) sloup lze charakterizovat jako plně integrované zařízení, které oproti klasickým sloupům veřejného osvětlení obsahuje funkce, jenž se více přibližují k potřebám Smart City. Těmito funkcemi rozumíme regulace (stmívání) osvětlení, monitory a senzory okolí a prostředí, bezpečnostní kamery, silniční kamery a radary, atd. S přibývajícím množstvím vozidel na elektrický pohon může chytrý sloup obsahovat i nabíječku na tento typ vozidel, což jistě v blízké budoucnosti najde svoje uplatnění.

Většina dnešních světelných systémů VO využívá halogenové výbojky k umělému osvětlení. Oproti LED světelných zdrojům halogenové výbojky mají vysokou spotřebu energie. Přibližně 80 %veškeré spotřebované elektrické energie je možné snížit pomocí výměny halogenových výbojek za LED světelné zdroje.

Hlavním přínosem systému chytrých sloupů je tedy přidání různých „chytrých“ modulů jako jsou senzory prostředí, chytrý dotykový displej, LoRaWAN, aplikace obnovitelných zdrojů energie a akumulátorů do dosavadního systému veřejného osvětlení k vytvoření all-in-one (vše v jednom) chytrého sloupu, který může být využit různými způsoby, viz Obrázek 12.

Jedinečným výběrem a kombinací těchto jednotlivých modulů v jeden ucelený systém by bylo nejen finančně a energeticky účinné, ale také by takový systém poskytl všechny důležité funkce podle potřebných požadavků. Ve veřejném osvětlení se momentálně moc regulovatelné světelné zdroje nevyskytují, dají se většinou pouze zapínat nebo vypínat na pokyn, popřípadě stmívat. Chytrý sloup by pomocí různých senzorů a řídícího systému VO poskytnul i plynulé stmívání LED světelných zdrojů a nastavování intenzity osvětlení podle potřeby. Příklad takového multifunkčního sloupu je na Obrázku 12. Tento sloup od firmy ELKOEP, s.r.o., je využit i v praktické části této diplomové práce. [18], [25]



Obrázek 12: Multifunkční sloup [25]

Některé komponenty, které tedy lze přidat do chytrého (multifunkčního) sloupu jsou:

- ***Obnovitelný zdroj energie***

Fotovoltaický panel, nebo například větrná turbína.

- ***LED (Light Emitting Diode)***

Zdroje LED jsou složené z několika elektroluminiscenčních diod. V elektrotechnice je označení pro diodu emitující světlo, případně ultrafialové nebo infračervené záření. Dioda vyzařuje z obnaženého PN přechodu a vede stejnosměrný proud pouze jedním směrem, v druhém směru průchodu proudu zabraňuje. Ve veřejném osvětlení pomalu zdroje LED nahrazují vysokotlaké halogenové výbojky, díky své účinností přibližně 100 - 120 lm/W, úspornosti a životností přibližně 50 - 100 tisíc hodin. Jejich nevýhodami jsou ale tepelná závislost a vysoká pořizovací cena, díky kterým se všechny světelné zdroje ve veřejném osvětlení za LED zdroje vyměnit nedají. [18], [22]

- ***LDR (Light Depended Resistor)***

Také známý jako fotorezistor, který se používá pro stmívání světla. Jeho odpor je proměnlivý a závisí na intenzitě dopadajícího světla na fotorezistor. Jeho odpor se vzrůstající intenzitou světla klesá, a naopak se snižující se intenzitou světla se zvyšuje. To ovlivňuje procházející proud, což má za následek stmívání světla.

- ***PIR (Passive Infrared Sensor)***

Pasivní infračervené světlo, neboli PIR čidlo. Je to zařízení pro měření infračerveného světla, které vyzařuje s objektů v jeho zorném poli. Když objekt projde kolem, v tu chvíli se změní teplota před zorným polem zařízení z pokojové / okolní teploty na teplotu těla a zase zpátky. Tuto změnu velikosti infračerveného záření čidlo zaznamená a přemění na odpovídající změnu napětí, tím čidlo provede detekci pohybu.

- ***Senzory znečištění ovzduší***

Tyto senzory jsou zodpovědné za detekci a monitorování znečištění ovzduší v blízké oblasti. Jsou to například senzory CO (oxidu uhelnatého), CO_2 (oxidu uhličitého), NO_2 (oxidu dusičitého), senzor pevných částic, senzor teploty, senzor vlhkosti a další senzory

(voda, povodně atd.). Všechny tyto senzory monitorují a odesílají data a informace o jednotlivých faktorech v reálném čase do řídícího střediska.

- ***LoRaWAN***

LoRa je jedním z řešení pro bezdrátový přenos dat, kdy je hlavním cílem co možná nejnižší spotřeba energie při malých pořizovacích nákladech s malým datovým tokem. LoRaWAN je síť, se kterou LoRa pracuje a využívá se v IoT zařízení. Veškeré informace jsou přenášeny bezdrátově do koncového zařízení, například komunikace mezi sloupy a následně do koncové centrály pro správu veřejného osvětlení. V podstatě lze LoRaWAN považovat za Wi-Fi pro připojení IoT zařízení. [18], [21], [23]

- ***GPRS (General Packet Radio Service)***

Služba umožňující uživatelům mobilních telefonů přenos dat a připojení k internetu. Umožňuje tedy odesílání informací přes mobilní sítě. Oproti LoRaWANu může poslat větší objem dat, až 115 kbit/s s průměrnou rychlostí až 40 kbit/s. V podstatě tato služba poskytuje mobilní signál, je díky ní přístup k datům a tedy internetu a službám určující lokaci.

- ***Baterie***

Vyrobená elektrická energie je uskladněna v nabíjecí lithium-iontové baterii. Taková lithium-iontová baterie má vysokou hustotu energie, malou údržbu, téměř žádné samovybíjení a vysokou životnost. Její nevýhodou je její obtížná a nákladná recyklace. Uskladněná elektrická energie se může využít například v noci.

- ***Regulátor baterie***

Regulátor brání baterii proti přebíjení a reguluje i proud z baterie. Může se stát nějaká porucha na panelu sloupu, nebo na jeho elektronice, regulátor baterie slouží pro bezpečnost.

- ***Arduino UNO***

Jednodeskový počítač, který ovládá připojenou elektroniku v chytrém sloupu.

- ***LCD displej***

Takový displej slouží k zobrazování hodnot ze senzorů znečištění ovzduší a okolí, teplotu, vlhkost a navíc může zobrazovat důležité novinky, zprávy, reklamy atd.

- ***Další možnosti***

Výhoda takového chytrého sloupu je právě v jeho modulárnosti a multifunkčnosti. V budoucnu se budou vyvíjet další možné komponenty a chytrý sloup se tak bude vylepšovat. Možné další komponenty jsou Wi-Fi modul, veřejný rozhlas, interkom nebo také například RGB signalizace, která signalizuje stav chytrého sloupu. Je zde také možnost zásuvky, ať už drátové nebo bezdrátové, pro nabíjení přenosných zařízení (telefon, notebook atd.), USB zásuvka, SOS tlačítko. Některé chytré sloupy by mohly obsahovat i vodovodní potrubí a tedy sloužit jako veřejné pítko.

Přibývá čím dál tím víc elektromobilů a proto je potřeba mít více nabíjecích míst. Predikci na podíl elektromobility v České republice v následujících letech zpracovalo v roce 2015 Ministerstvo průmyslu a obchodu, nebo společnost Deloitte v roce 2019. [26], [27]

Jeden z možných modulů multifunkčního sloupu je právě nabíječka pro elektromobily. Je potřeba ale mít přístup k třífázové soustavě pro takovou nabíječku, proto není možnost takové nabíječky instalovat kdekoliv, nemluvě o potřebné zatížitelnosti sítě. Velkou součástí této práce je právě jeden takový návrh parkoviště s využitím chytrých sloupů s nabíječkami elektromobilů. [18], [23]

Multifunkční sloupy mají mnoho předností, co se týče možnosti využití. Určitě se uplatní v budoucím rozvoji v jakékoliv podobě. Ovšem přes svoje výhody mají i několik nevýhod:

- ***Výhody chytrého sloupu***
    - Využití LED světelných zdrojů s nižší spotřebou energie, nízkým vytvářeným teplem, okamžité zapnutí/vypnutí, regulace intenzity osvětlení.
    - Solární a větrná energie jsou přívětivé k životnímu prostředí a jsou to v podstatě neomezené zdroje energie zadarmo.

- Chytré senzory ovzduší a okolí pracují v častých opakujících se intervalech, tím tedy poskytují hodnoty a informace v reálném čase
- Chytrý LCD displej poskytuje velký výběr zpráv a informací rychle a jednoduše z internetu, odpadá potřeba reklam z okolí, jako billboardy, vylepené letáky atd.
- Sloupy s bezpečnostní kamerou zajišťují bezpečnost a částečnou ochranu v oblastech s častými krádežemi.
- Modulárnost různých modulů, upravující tak cenu a velikost celého sloupu.
- Možnost dalšího rozšíření do budoucna.
- Vysoká návratnost.

- ***Nevýhody chytrého sloupu***

  - Vysoká počáteční pořizovací cena.
  - Závislost LED světla na okolní teplotě.
  - Solární panel se může díky částicím ve vzduchu a vlhkosti ušpinit a snížit jak jeho účinnost.
  - Protože chytrý sloup obsahuje hodně sofistikovaných modulů, je ho potřeba více kontrolovat a tím přidat na roční udržovací ceně.
  - Malá šířka pásma a bitrate LoRaWANu omezuje velikost poslaných dat.

4.3 Využití multifunkčních sloupů ve světě

Využití multifunkčních sloupů ve světě ještě není tak rozsáhlé, přeci jenom je to stále novinka v této chvíli. I přes to ale některá města už této možnosti využívají, i když se víceméně jedná jen o chytré sloupy pouze s možností stmívání osvětlení.

V tuto chvíli se pohybuje obchod s chytrými sloupy okolo 8,5 miliard dolarů, ovšem do roku 2025 by se mohl vyšplhat až na skoro 16 miliard. Obchod je rozdělen do segmentů, a to severní Amerika, Evropa, Asie a Tichomoří, Latinská Amerika, Střední Východ a Afrika. Severní Amerika ovládala obchod v roce 2018 díky tomu, že jako první začala investovat do systému chytrých sloupů. V Americe probíhá stále více a více výzkumů a vývojů chytrých sloupů s možností nabíjení elektromobilů, což její pozici ještě napomáhá.

Předpokládá se ale, že Asie a Tichomoří se vynoří jako nejrychleji rostoucí regionální trh a do roku 2025 dosáhnou dominantního postavení. Hlavní faktor přispívající k tomuto růstu regionálního trhu budou rostoucí vládní iniciativy v zemích jako Austrálie, Čína, Indie, Japonsko a Jižní Korea pro nahrazení stávajících systémů veřejného osvětlení za systémy s chytrými sloupy za účelem snížení energetické spotřeby. Kromě toho, systémy ANPR (Automatic number-plate recognition), neboli systémy na čtení SPZ vozidel, se stále více nasazují na chytré sloupy pro řízení dopravy a dodržování předpisů v zemích jako je Čína, Vietnam, Indonésie a Jižní Korea. Mimo to došlo v zemích jako je Čína a Japonsko k nárůstu použití chytrých sloupů s nabíječkami elektromobilů, což trh multifunkčních sloupů také posílí.

Mezi hlavní výrobce chytrých sloupů ve světě patří Philips a jejich společnost Signify Company, která se podílela na projektu One Planet Cardiff, o kterém již bylo řečeno v předchozí kapitole, dále Acuity Brands,E.ON nebo například Cree, Inc. Ty se ale zatím zabývají jen stmíváním osvětlením, i to ale již má veliký vliv na snížení naší uhlíkové stopy.

Chytré sloupy s moduly vytváří například společnost Omniflow. Dalším výrobcem takového sloupu je společnost Elko EP a jejich produkt iNELS, kteří jako jedni z prvních průkopníků v České republice začali vyvíjet a vyrábět inteligentní elektroinstalace pro budovy a domy. Multifunkční sloup od této firmy je následně použit v praktické části této diplomové práce. Co se týče takovýchto multifunkčních sloupů, zatím je jen pár zmínek, že by se někde používaly komerčně, možná jen za výzkumnými účely nebo jako pokusy. Jedno takové využití je například v Německu ve městě Essen, kde mají 15 chytrých sloupů od E.ONu, které také slouží jako nabíječka pro elektromobil. Další pak ve městě Sydney v Austrálii, kde mají 20 takovýchto sloupů s nabíječkami od firmy JET Charge. Další zmínka je z Maďarska v Budapešti, kde jich mají prozatím 5. Je to stále ještě v počáteční fázi a k jejich nasazení je potřeba nejen stále vyvíjet další komponenty, ale současnou nevýhodou je vysoká pořizovací cena. [28], [29], [30], [31]

Tabulka 6 udává přehled několika výrobců chytrých (multifunkčních) sloupů a jejich výbavu. Chytrý sloup od společnosti iNELS je nejvíce modulární a taky jako jeden z mála má dostupný datasheet. Kvůli největšímu počtu dostupných informací, jeho modulárnosti a různých dostupných variant řešení jeho konstrukce, ať už jako samotná nabíjecí stanice

nebo kompletní chytrý sloup s osvětlením, je použit v praktické části této práci. [25], [46], [47], [48]

Tabulka 6: Přehled některých výrobců chytrých sloupů [25], [46], [47], [48]

Výrobce	iNELS	Omniflow	Comptek	Schréder
Různé varianty	Ano	Ne	Ne	Ano
Nabíječka pro elektromobil	Ano	Ano	Ano	Ano
Světelný zdroj	Ano	Ano	Ano	Ano
Wi-Fi modul	Ano	Ano	Ano	Ano
Senzory kvality ovzduší	Ano	Ano	Ano	Ne
Kamera	Ano	Ano	Ano	Ano
RGB signalizace	Ano	Ne	Ne	Ne
Nabíjení přenosných zařízení	Ano	Ne	Ne	Ne
Bezdrátové nabíjení telefonů	Ano	Ne	Ne	Ne
Čtečka platebních karet	Ano	Ne	Ne	Ne
Čidlo pohybu	Ano	Ne	Ne	Ne
Dotykový display	Ano	Ano	Ano	Ne
OZE	Ne	Ano	Ano	Ne

5 Elektrická vozidla

Jelikož se práce zaměřuje na multifunkční, nebo také chytré sloupy s možností nabíjení baterií elektromobilů, je vhodné se o nich dozvědět alespoň nějaké základní informace. Obecně je za elektrické vozidlo považováno každé vozidlo, které používá jeden nebo více elektrických motorů nebo trakčních motorů. Takové vozidlo získává elektrickou energii buď z nějakého kolektorového systému, nebo může být soběstačné s baterií, solárním panelem, palivovými články nebo elektrickým generátorem.

5.1 Elektromobil a jeho historie

Elektromobil je motorové vozidlo poháněné jedním nebo více elektrickými motory a využívá energii uloženou v nabíjecí baterii, existují ale i alternativy s vodíkovými palivovými články. V porovnání s motorovými vozidly se spalovacím motorem, elektromobily jsou tišší, nemají žádné emise výfukových plynů a vůbec méně emisí. První praktický elektromobil byl vyroben v 80. letech 19. století. V roce 1881 předvedl svůj model elektromobilu Gustave Trouvé v Paříži. Thomas Parker sestavil praktický elektromobil ve Wolverhamptonu v roce 1884, 20 let před Ford Modelem T, což je první cenově dostupné vozidlo. Mezi první elektromobil vytvořený v České republice řadí elektromobil Františka Křižíka v roce 1895. Elektromobily byly oblíbené až do chvíle, kdy se na scénu dostala motorová vozidla s pokrokovým spalovacím motorem. Jejich palivo, benzín a diesel, byly o dost levnější. V roce 1912 tomu ještě pomohl vynález elektrického startéru, který nahradil těžké startování pomocí kliky. Od roku 2008 se díky pokročilému vývoji v bateriích a požadavku na snížení emisí skleníkových plynů vracejí zpátky elektromobily na trh.

Od společnosti Tesla v čele s Elonem Muskem v roce 2008 přišel první sériově vyráběný elektromobil Tesla Roadster. Později se přidalo Mitsubishi i-MiEV v roce 2009 v Japonsku. Tesla si stále drží svou pozici, mimo jiné, jako jeden z nejznámějších moderních výrobců elektromobilů. Všechny velké automobilky jako BMW, Toyota, Renault, Volvo, Ford a další se zavázaly, že budou pomalu přecházet ze spalovacích motorů na elektromobily a také, že jejich modely dostanou i svou elektrickou verzi.

Pořizovací cena elektromobilu je mírně vyšší než u srovnatelného spalovacího auta, ovšem celková cena za vlastnictví elektromobilu (zahrnuje pořizovací cenu, provoz a údržbu – palivo/elektřina) je nižší než cena za vlastnictví spalovacího automobilu

vzhledem k tomu, že cena elektřiny spotřebované elektromobilem při jízdě je několikanásobně nižší než cena paliva pro spalovací automobil a také díky minimální potřebné údržbě, kterou mechanicky jednodušší motor vyžaduje. Nejdůležitějším faktorem vyšší pořizovací ceny oproti spalovacím automobilům je cena baterie. Cena baterií se mezi léty 2010 a 2016 snížila o celých 73 % z 1 000 dolarů (cca 22 000 Kč) za kilowatthodinu (kWh) kapacity na 273 dolarů (cca 6 000 Kč) dolarů za kWh. Její cena se stále snižuje a odhadovaná cena na rok 2030 je 74 dolarů (cca 1 600 Kč) za kWh. Podle studií v roce 2024 nebo 2025 nebudou moci konkurovat spalovací automobily s elektromobily v jejich pořizovací ceně, ani ceně za provoz a údržbu. [32], [33]

5.2 Baterie elektromobilu

Jedná se o nejdůležitější, nejdražší a především nejkontroverznější část elektromobilu. Odpůrci elektromobilů rádi uvádí právě jako hlavní problém baterie, kde kromě jejich vysoké ceny zmiňují krátkou životnost, nutnou brzkou výměnu, nedostatečnou dojezdovou vzdálenost a zátěž na životní prostředí při jejich recyklaci. Mnohé byla kdysi pravda, dnes to již zdaleka tak neplatí. [34], [39]

- ***Konstrukce baterií***

Baterie se skládají ze stovek až tisíců malých bateriových článků, které jsou spojené buď sériově anebo paralelně tak, aby bylo dosaženo požadované napětí a proud. Každý takový bateriový článek mívá napětí 3 až 4 V. V současnosti se používají tři typy bateriových článků: válcové, pouzdrové a hranolové. Tesla využívá články válcové, které jako hlavní výhodu mají vyspělost a vysokou optimalizaci při výrobě. Jedná se též o nejlevnější variantu, která má zároveň i nejvyšší účinnost. BMW a Volkswagen využívají články hranolové, které jsou sice skladnější, lépe se chladí a nemají nákladnou výrobu, za to ale mají nízkou energetickou hustotu a problémy s počtem cyklů nabití a vybití. Nissan, Chevrolet a Renault používají články pouzdrové, které jsou nejflexibilnější, co se týče návrhu jednotlivých modulů a kapacity, je potřeba ale pečlivě kontrolovat jak tlak, tak teplotu uvnitř baterie. Jednotlivé bateriové články se skládají do bateriových modulů a tvoří tak stavební bloky každé baterie. Důvodem takového uspořádání je snazší výroba, management, instalace i údržba. Jednotlivé moduly mohou být v případě potřeby vyměněny a v případě požáru pomáhá toto uspořádání snížit rychlost jeho šíření. [34], [39]

- ***Důležité parametry baterií***

Výrobci baterií pro elektromobily musí uvést mnoho důležitých požadavků do vzájemné rovnováhy. Protože se jedná o pojízdný automobil, je zcela zásadní velikost a váha celé baterie. Z tohoto důvodu se uvádí měrná energie či hustota baterie, což je energie na jednotku hmotnosti, respektive objemu (uvádí se watthodina na kilogram (Wh/kg) nebo watthodina na litr (Wh/l)). Současné výzkumy jsou zaměřeny hlavně na vytvoření baterie s co nejvyšší hustotou energie. Zatímco se jedni soustředí na hustotu energie jednotlivých bateriových jednotek, jiní se naopak soustředí spíše na hustotu modulu celého, kde vstupuje do hry tvar i uspořádání bateriových jednotek. Dalším důležitým parametrem je počet cyklů nabití a vybití, během kterých i baterie dokáže zachovat své vlastnosti a udává tak celkovou životnost baterie. Obvykle to bývá 1 000 až 1 500 cyklů, objevují se ale už baterie, které vydrží až 7 000 nabití. V neposlední řadě je důležitá také cena, která prozatím tvoří okolo 30 % z celkové ceny elektromobilu.

Na všech zmíněných vlastnostech závisí to nejdůležitější, což je kapacita baterie elektromobilu a tím pádem i její dojezdová vzdálenost. Na základě dosavadní dostupné technologie, která udává maximální měrnou energii jednotlivých typů baterií a ve snaze vyvážit co možná nejlépe hmotnost, cenu a dojezd, jsou dnes na trhu baterie od 16 kWh (MiEV a Mitsubishi) do 90 kWh (Tesla). Obecně se tak dá říct, že olověné baterie mají dojezdovou vzdálenost 30 až 80 km, niklové až 200 km a lithiové baterie 320 až 480 km. Dá se zde využít rekuperační brzdění, kdy se energie z brzdění dá převést zpět do baterie a poté znovu využít, které dokáže dojezd prodloužit o 10 až 15 % v běžném městském provozu a až o 50 % v extrémních podmínkách. Dále je dojezdová vzdálenost baterií závislá například na počasí. Ve spalovacích automobilech je auto v zimě ohříváno díky teplu vytvářené motorem, u elektromobilů je potřeba na zahřátí obětovat část kapacity baterie elektromobilu. U testování Tesly dokázala zapnutá klimatizace snížit dojezdovou vzdálenost až o 96 km. Dále je závislá na terénu, schopnostech řidiče, typu a váze vozidla. [34], [39]

- ***Životnost baterií***

Životnost baterií je jeden z nejvíce diskutovaných parametrů samotné baterie. Většina zákazníků se obává z brzké ztráty kapacity baterie a z nutnosti ji tak brzo vyměnit. Zkušenosti ale prokázaly, že u baterií s vyspělými systémy řízení baterie (BMS – Battery

Management System) je tento strach neopodstatněný. Kromě BMS se na nabíjení podílí také nabíjecí stanice a palubní nabíječka, viz dále v textu, které spolu neustále komunikují, aby nabíjení neohrozilo baterii. Například Nissan LEAF přibližně i po 200 000 najetých kilometrech si udržel 80 až 90 % kapacity baterie, muselo se vyměnit pouze 0,01 % baterií kvůli vnitřním defektům a to bez ohledu na klimatické podmínky. Také například Tesla Roadster si po více než 160 000 najetých kilometrech zachoval 80 - 85 %. Zpravidla je u baterie pouze pár článků vadných, které je možné díky modulovému uspořádání snadno vyměnit. Tesla nabízí záruku například na dobu 8 let. [34], [39]

- ***Typy baterií***

První elektromobily používaly již na počátku 20. století ke svému pohonu olověné baterie (Lead-acid). Jednalo se o snadno dostupné a levné baterie a jejich výzkum byl již v té době značně pokročilý. Mezi jejich hlavní nevýhody patří to, že by se nikdy neměly vybít pod 50 % a pravidelná potřeba kontroly elektrolytu. Zároveň jsou poměrně těžké a jejich životnost byla přibližně 3 roky. Její běžná účinnost je 70 až 75 % a při chladném počasí se dále snižuje až o 40 %,

Později se objevily nikl-metal hydridové baterie (NiMH), které mají lepší měrnou energii a navíc mají i velmi dlouhou živostnost. Takové baterie byly v prvních hybridních vozech Toyota RAV4 a jsou stále funkční i po 10 letech. Obavy, že baterie dlouho nevydrží, tedy už nebyly pravdou ani pro minulou generaci baterií. Nevýhodou byla jejich malá účinnost, vysoká míra samovybíjení a špatné vlastnosti za chladného počasí.

V roce 1979 byla poprvé představena lithiová baterie (Li-ion), která je dodnes jednou z nejoblíbenějších a používá se prakticky skoro všude. Problémy prvního prototypu byly citlivost na teplotu, deformace při vysoké teplotě, nízká účinnost při nízkých teplotách a brzká degradace. Nová generace obětovala část své měrné energie a měrné síly ve prospěch delší životnosti, ochrany životního prostředí, snížení nebezpečí vzniku požáru a zvýšení rychlosti nabíjení.

Do budoucna jsou uvažovány v současné době dvě hlavní varianty. První z nich je zachování lithiových baterií, ovšem vyměnit v nich grafit za křemík. To by mělo za účinek zvýšení měrné energie a zvýšení hustoty energie. Problém představuje pouze velká změna mezi objemem vybité a nabité energie. Druhou možností jsou baterie v pevném stavu, které nevyužívají elektrolytu, a tudíž přepážka mezi jednotlivými částmi anody a katody už

nikdy nebude působit problém. Tím pádem se bude jednat o bezpečnější baterie, které budou mít navíc mnohem delší životnost. Tabulka 7 obsahuje stručné shrnutí baterií používaných v elektromobilech. [34], [37], [39]

Tabulka 7: Typy baterií [34], [37], [39]

Typ baterie	Olověná	Nikl-metal hydridová	Lithiová
Měrná energie (Wh/kg)	30 až 50	60 až 120	110 až 160
Vnitřní odpor (mΩ)	< 100	200 až 300	150 až 250
Cykly nabití a vybití	200 až 300	300 až 500	500 až 1 000
Rychlost rychlonabíjení	8 až 16 h	2 až 4 h	2 až 4 h
Tolerance přebití	vysoká	nízká	velice nízká
Samovybíjení za měsíc	5 %	30 %	10 %
Nominální napětí elektrického článku	2 V	1.25 V	3.6 V
Provozní teplota	-20 až 60°C	-20 až 60 °C	-20 až 60 °C
Potřeba údržby	3 až 6 měsíců	60 až 90 dní	Netřeba

5.3 Nabíjení elektromobilů

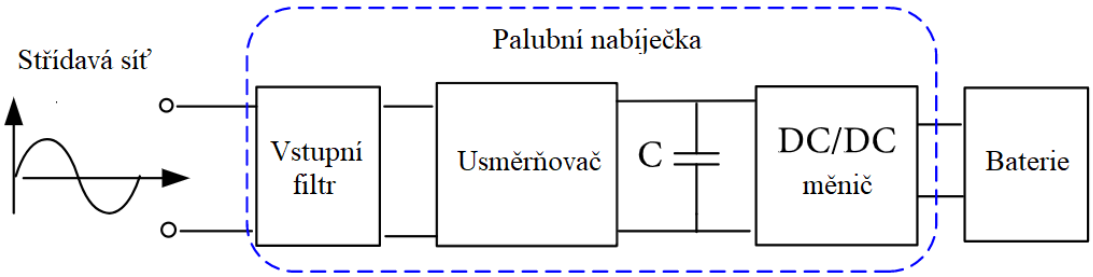
- ***Palubní nabíječka (palubní systém auta)***

Tato nabíječka je přímo zabudovaná v elektromobilu. V případě využití střídavého proudu pro nabíjení projde proud nabíjecím kabelem do palubní nabíječky, která změní střídavý proud na stejnosměrný proud a pošle ho přes systém řízení baterie (Battery Management Systém, neboli BMS) do baterie. Pokud se elektromobil nabíjí stejnosměrným proudem, potom se obejde palubní nabíječka a proud směřuje rovnou přes systém řízení baterie do baterie. Sice se při tomto způsobu nabíjení palubní nabíječka nevyužívá, za to jsou ale kladeny větší požadavky na BMS. Dělí se podle toho, kolik fází mohou využít (jednofázové nebo třífázové) a podle svého výkonu. Tyto faktory potom řídí cenu palubní nabíječky, potažmo tedy i cenu elektromobilu. Výkon se pohybuje okolo 7,3 kW pro jednofázovou, pro třífázovou pak 22 kW. Palubní nabíječka má provozní napětí 110 až 260 V střídavého napětí pro jednofázovou, v případě třífázové 360 až 440 V. Výchozí napětí do baterie je 450 až 850 V stejnosměrného napětí. [35], [40]

Palubní nabíječka umožnuje především kontrolu proudu a napětí, kterým se baterie nabíjí (Voltage nebo Current Control Mode) a tak se stará o životnost baterie. Nabíječka nabízí nabíjení buď konstantním proudem, anebo konstantním napětím. Obě varianty jsou

jednoduché na ovládání a každá má své výhody a nevýhody. Při nabíjení konstantním proudem dochází k vysoké efektivitě a rychlosti nabíjení. Hrozí ale, že v pozdější fázi dojde k přebití baterie, což zapříčiní snížení její životnosti. Při nabíjení konstantním napětím hrozí, že přiteče do baterie ze začátku příliš velká hodnota proudu, který baterii nadmíru zahřeje a opět se sníží její životnost. Nabíječka tedy tyto varianty kombinuje. Nejprve se nabíjí konstantním proudem, což zajistí rychlost a efektivitu. V momentě, kdy na obou koncích baterie dosáhne napětí určité amplitudy, se nabíjení změní na nabíjení konstantním napětím. Takový systém se nazývá strategie nabíjení a jedná se o nejdůležitější funkci celé palubní nabíječky.

Palubní nabíječka provádí několik na sebe navazujících úkolů: usměrnění vstupu, korekce účiníku, změna stejnosměrného napětí pomocí stejnosměrného měniče a filtrování výstupu. Automobil se připojí do nabíjecí stanice se střídavým proudem, proud projde skrz PFC stage (Power factor controller), který mění střídavý proud na stejnosměrný. Ten projde dál a dostane se do stejnosměrného měniče, který mění hladinu napětí podle potřeby. Na Obrázku 13 je zobrazen princip nabíjení střídavým napětím přes palubní nabíječku. [35], [40]



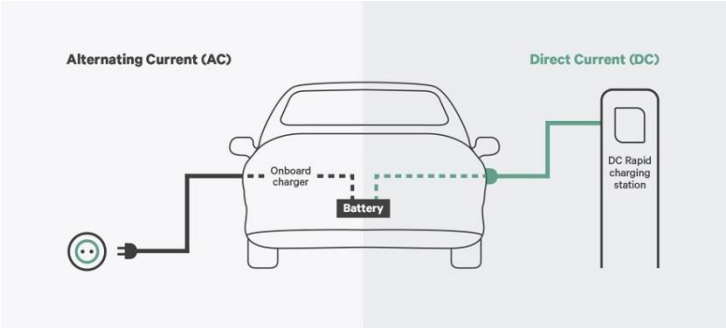
Obrázek 13: Nabíjení palubní nabíječkou [40]

- ***Nabíjecí stanice***

Existují dva druhy nabíjecích stanic. Prvním z nich je stanice, která nabíjí baterii střídavým proudem. Při tomto způsobu nabíjení je využita palubní nabíječka, která je zabudovaná v každém elektromobilu a její funkce již zde byla popsána. Hlavní funkcí nabíjecí stanice je zprostředkování nezbytné komunikace s řídícím systémem vozidla a zajištění tak bezpečnosti vozidla a posádky. Dále také sděluje vozidlu, jaký maximální proud může v jakou chvíli odebírat v závislosti na vytížení elektrické sítě. Střídavá nabíjecí stanice tedy reguluje odběr elektřiny vozidla podle aktuálních možností domu nebo odběrného místa a nedochází tak k přetěžování sítě. Jejich hlavní výhodou je jejich cenová dostupnost. Jsou

skoro 7 krát až 10 krát levnější než stejnosměrné stanice při stejném výkonu. Další jejich výhodou je jejich rozšířenost, jsou menší a mají jednodušší, rychlejší a méně nákladnou instalaci. Právě proto se hodí k instalaci doma a k nočnímu nabíjení. Jejich poloha se dá najít na internetu pomocí speciálních map. Jsou ale pomalejší než stejnosměrné nabíjecí stanice. Technologie se ale neustále zlepšuje a dnes umí střídavá stanice poskytnout až 22 kWh nabíjecího výkonu. To znamená, že pokud má baterie elektromobilu kapacitu 21 kWh, může dojít k plnému nabití přibližně za hodinu. Pokud je ale elektromobil vybaven například pouze 3,7 kWh palubní nabíječkou, znamená to, že odebraný výkon palubní nabíječky nebude větší než 3,7 kW za hodinu. Pokud ale i přes to, je nutné rychlé nabití, nezbývá nic jiného než nabíjet pomocí stejnosměrné stanice. [35], [40]

Druhým druhem nabíjecí stanice je stanice se stejnosměrným proudem. To se nazývá tzv. rychlonabíjení. Samotná nabíjecí stanice přeměňuje střídavé napětí na stejnosměrné, potom „obejde“ palubní nabíječku elektromobilu a dodá stejnosměrný proud přes BMS přímo do baterie, přesně podle instrukcí řídícího systému ve vozidle. Stejnosměrné nabíjecí stanice jsou technologicky podstatně složitější, mnohonásobně dražší a vyžadují výkonné odběrné místo elektrické energie. Navíc musí stanice umět komunikovat s vozem místo palubní nabíječky, aby mohla upravovat parametry výstupního výkonu podle stavu a schopnosti baterie v elektromobilu. V současné době je brzdí od rozšířenějšího výskytu právě cena a technologická náročnost, proto jich je podstatně míň než střídavých stanic. Takové stanice se nachází převážně u hlavních dopravních komunikací. Standartní výkon stejnosměrných stanic je 50 kW, tedy více než dvojnásobek než u střídavých stanic. U ultrarychlých stanic je to však až 150 kW a Tesla vyvinula super-stanice, které mají výkon 250 kW. Pro baterie je ovšem šetrnější pomalé nabíjení pomocí střídavých stanic, ideálně by se mělo nabíjet střídavou stanicí v domácnostech a stejnosměrnou stanicí pouze při dlouhých cestách. Schématické znázornění rozdílu mezi nabíjením stejnosměrným a střídavým napětím je vidět na Obrázku 14. [35], [40]



Obrázek 14: Rozdíl v nabíjení [40]

6 Návrh chytrého osvětlení parkoviště

Praktickou částí a zároveň hlavním přínosem a stěžejní částí této diplomové práce je vytvoření regulačního schéma a modelu chytrého osvětlení pro parkoviště s možností nabíjení elektromobilů. Jak již bylo v práci shrnuto, elektromobilismus se stále rozvíjí, do budoucna může přinést i jisté výhody. Jakákoliv renovace veřejného osvětlení za vhodných podmínek by měla vzít v potaz i eventuální možnost nabíjení elektromobilů.

Pro tento model bylo vybráno parkoviště Fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni. Návrhy osvětlení a návrhy nabíjecích stanic elektromobilů pro toto parkoviště již byly tématy diplomových prací dvou dřívějších absolventů této fakulty, Ing. Natálie Lihunové a Ing. Pavla Kopačky. Cílem této diplomové práce je tedy navázat na výsledky těchto dvou diplomových prací. Především dále rozvinout návrh možné modernizace osvětlovací soustavy a provozu tohoto parkoviště využitím multifunkčních sloupů a navrhnout řídící systém osvětlovací soustavy a nabíjení elektromobilů na daném parkovišti. Pohled na parkoviště je na Obrázku 15 a Příloha B obsahuje současný stav napájení VO na parkovišti FEL ZČU.

Obrázek 15: Parkoviště Fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni [1]

Hlavním výsledkem a přínosem této diplomové práce je tedy návrh regulačního schéma osvětlovací soustavy parkoviště a nabíjení elektromobilů prostřednictvím multifunkčních sloupů, jehož model je vytvořen a analyzován pomocí programu MATLAB Simulink použitím základní knihovny a knihovny Simscape. K vytvoření takového modelu je ale potřeba znát počet míst na parkovišti a maximální možný počet nabíjecích stanic, respektive chytrých sloupů s nabíjecí stanicí pro elektromobily. Jedná se ale i o model

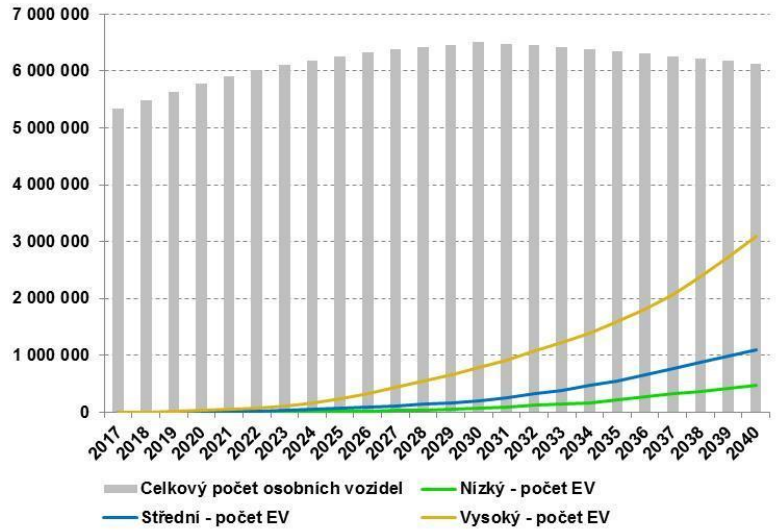
osvětlení, proto je na místě vytvořit celkový model návrhu osvětlení parkoviště, například v programu Building Design. Dále je potřeba provést simulaci a ověřit, zda jsou splněny všechny požadavky pro třídu osvětlení C (tj. konfliktní oblast) dle normy, viz Tabulka 4.

Pro tuto simulaci byl vybrán multifunkční sloup ELEKTRO-LUMEN U1 9k0 740 LED od společnosti ELKO EP, který je možné vidět na Obrázku 12 v kapitole 4.2 a jeho základní parametry jsou uvedeny v technickém listu v Příloze C. Tento sloup má mnoho variabilních funkcí, umí regulovat intenzitu jasu a stmívat v závislosti na okolním provozu a denní době. Sloup má také několik variant konstrukce, ať už se jedná jen o spodní část sloupu, která obsahuje jen nabíjecí stanici jak pro elektromobily, tak pro přenosná multimediální zařízení, jako je mobilní telefon, anebo kompletní sloup se všemi moduly, který se zároveň může chovat jako pouliční lampa veřejného osvětlení.

6.1 Výběr počtu nabíjecích míst

Pro výsledný regulační model je potřeba znát maximální možný počet nabíjecích míst na parkovišti. Výpočet počtu nabíjecích míst navazuje na diplomovou práci Ing. Kopačky, který se právě tímto problémem zabýval a využije se zde stejná metodika výpočtu.

K výpočtu je potřeba znát několik referenčních hodnot. Je potřeba znát teoretický rozvoj elektromobility v České republice (v našem případě například do roku 2031, $CREV_{2031}$), celkový počet předpokládaných vozů v České republice (opět do roku 2031, $AllCar_{2031}$) a počet parkovacích míst na parkovišti (*PARK*). Pro účely mé diplomové práce jsem zvolil situaci střední počet elektromobilů v roce 2031, tedy modrou křivku z Obrázku 16.



Obrázek 16: Rozvoj elektromobility v budoucích letech [50]

Pak dostaneme vzorec pro předpokládaný počet elektromobilů na parkovišti (*EV PARK*) (9):

$$EV\ PARK = \frac{CREV_{2031}}{AllCar_{2031}} . PARK = \frac{300 . 10^3}{6450 . 10^3} . 470 \doteq 22\ (-). \quad (9)$$

Jako poslední bod k získání počtu parkovacích míst, které jsou určené výhradně pro elektromobily (místa osazená nabíjecími stanicemi, *EV CHAR*) je potřeba určit koeficient *k*, který určuje poměr počtu nabíjecích stanic na elektromobil *EVSE/EV*. V případě ZČU a v navázání na diplomovou práci Ing. Kopačky, určíme *k* = 0, 4 a dostaneme vzorec (10):

$$EV\ CHAR = EV\ PARK . k = 22 . 0{,}4 \doteq 9\ (-). \quad (10)$$

Výsledný počet parkovacích míst, která jsou osazena nabíjecí stanicí, je tedy 9. Tento výpočet je pouze orientační. Samozřejmě by se mohl uvažovat jakýkoliv rozvoj elektromobility z Obrázku 16 (nízký, střední nebo vysoký) a to v jakémkoli roce, ovšem pro optimální výpočet pro moji diplomovou práci jsem právě zvolil rok 2031 a střední rozvoj elektromobility.

6.2 Návrh osvětlení parkoviště multifunkčními sloupy

Návrh osvětlení parkoviště vychází z již vypracovaných modelů navržených osvětlovacích soustav parkoviště Fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni převzatých z diplomové práce Ing. Lihunové [1]. Ing. Lihunová ve své diplomové práci shrnula stávající poměry a problémy osvětlení na daném parkovišti a vytvořila a porovnala tři různé typy modelů pro případnou renovaci osvětlení. Z výsledků její diplomové práce vyplynulo, že pro osvětlení daného parkoviště a přilehlého chodníku je nejlépe vhodná první varianta jejího návrhu osvětlovací soustavy. Na Obrázku 16 jsou uvedeny základní parametry všech navržených svítidel a světelných zdrojů (jednotlivé typy svítidel označeny „B“ až „F“) a návrhy jejich umístění na parkovišti. Typ svítidel označených „A“ osvětlují přilehlou silniční komunikaci a v modelu slouží pouze pro zhodnocení všech světelných podmínek v této lokalitě.

Moje diplomová práce navazuje právě na tento nejvhodnější model osvětlení parkoviště s tím rozdílem, že v mnou navrženém návrhu osvětlovací soustavy bude část původně navržených sloupů vyměněno za chytré (multifunkční) sloupy s možností nabíjení elektromobilů. Po prozkoumání výsledků simulace původního modelu OS z diplomové

práce Ing. Lihunové jsem se rozhodl, že nejlepším řešení bude výměna svítidel typu „C“, tzn. od výrobce MODUS typ MODUS LVLEDOS7500V24, viz Obrázek 17.

Svítidla použitá v tomto projektu

A	Množství: 5 Ks	VYRTYCH	HORNET-100H-E Svítidlo pro osvětlení komunikací	100,0 W 8500,0 lm	IP 43
B	Množství: 12 Ks	Enika Nová Paka	06216296 THEOS A58/W 16LED 140W 4000K AN-96	140,0 W 14153,3 lm	IP 66
C	Množství: 30 Ks	MODUS	MODUS LVLEDOS7500V24 LED svítidlo pro veřejné osvětlení, hliníkový korpus, skleněný kryt, 4000K	58,0 W 7700,0 lm	IP 65
D	Množství: 10 Ks	MODUS	MODUS STL8000C LED svítidlo pro veřejné osvětlení, hliníkový korpus, skleněná optika pro komunikace	60,0 W 8800,0 lm	IP 65
E	Množství: 4 Ks	MODUS	MODUS STL4000P LED svítidlo pro veřejné osvětlení, hliníkový korpus, skleněná optika pro parkoviště	27,0 W 4200,0 lm	IP 65
F	Množství: 9 Ks	MODUS	MODUS STL4000P3 LED svítidlo pro veřejné osvětlení, hliníkový korpus, skleněná optika pro parkoviště, 3000K	27,0 W 4000,0 lm	IP 65

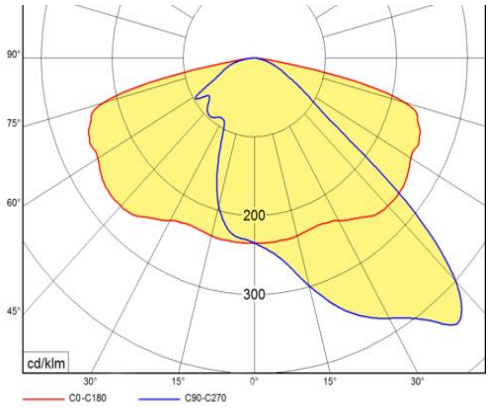
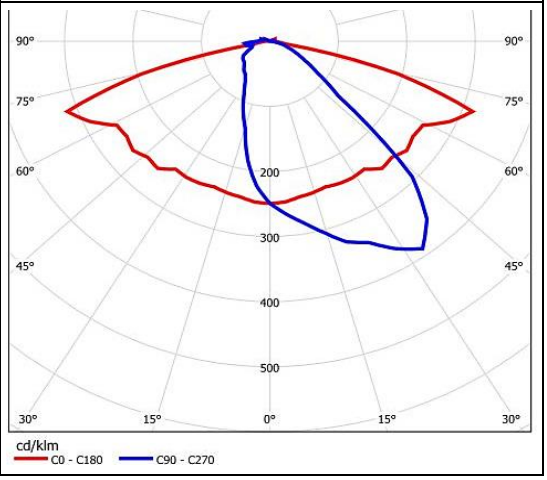
Název	Minimální hodnota	Průměrná hodnota	Maximální hodnota	Rovnoměrnost
Parkoviště- přední část				
Přední část parkoviště - Normálová osvětlenost	7,98 lx	32,4 / 20 lx ✓	49,6 lx	0,25 / 0,25 ✓
Chodník - Normálová osvětlenost	13 lx	32,1 / 5 lx ✓	58 lx	0,4 / 0,25 ✓
Levá zadní část parkoviště - Normálová osvětlenost	15,5 lx	31,6 / 20 lx ✓	49,5 lx	0,49 / 0,25 ✓
Pravá zadní část parkoviště - Normálová osvětlenost	7,31 lx	29,6 / 20 lx ✓	51 lx	0,25 / 0,25 ✓

Obrázek 17: Původní návrh OS parkoviště před budovou FEL ZČU v Plzni

K výše uvedenému rozhodnutí výměny, právě tohoto typu svítidel, jsem dospěl po porovnání parametrů a křivek svítivosti původního navrhovaného svítidla MODUS LVLEDOS7500V24 a svítidla obsaženého v nově navrhovaném multifunkčním sloupu ELEKTRO-LUMEN U1 9k0 740 LED. Návrh upraveného modelu OS je potřeba zkontrolovat pomocí analýzy simulací v softwaru Building Design, aby bylo ověřeno, že i po změně uvažovaných sloupů bude OS splňovat požadavky dle normy. V knihovně svítidel softwaru Building Design nejsou bohužel k dispozici dostupná data svítidla ELEKTRO-LUMEN U1 9k0 740 LED, ale jsou tam data od stejného výrobce pro svítidlo

MARUT M ME 9k0 740 LED, které má dle informací z internetových stránek výrobce stejné parametry jako uvažované svítidlo. Původní svítidla MODUS LVLEDOS7500V24 a nově navržená svítidla ELEKTRO-LUMEN U1 9k0 740 LED mají podobné parametry a křivky svítivosti a světlené zdroje mají rovněž podobné charakteristické vlastnosti, viz Tabulka 8. Multifunkční sloup má svítidlo se světelným zdrojem s teplotou chromatičnosti 4 000 K a se světelným tokem 9 000 lm, což je více než měl vybraný světlený zdroj v původním modelu. Detailnější technická data světelného zdroje svítidla zvoleného multifunkčního sloupu jsou uvedena v Příloze C.

Tabulka 8: Porovnání svítidel a světelných zdrojů

	MODUS LVLEDOS7500V24	**ELEKTRO-LUMEN U1 9k0 740 LED**
Svítidlo		
Typ SZ	LED	LED
Ra (-)	70	70
P (W) - SZ (SV)	58	64 (80)
Φ_{SV} (lm)	7 700	7 625
T_c (K)	4 000	4 000
Účinnost SZ (lm / W)	133	145
Křivky svítivosti		

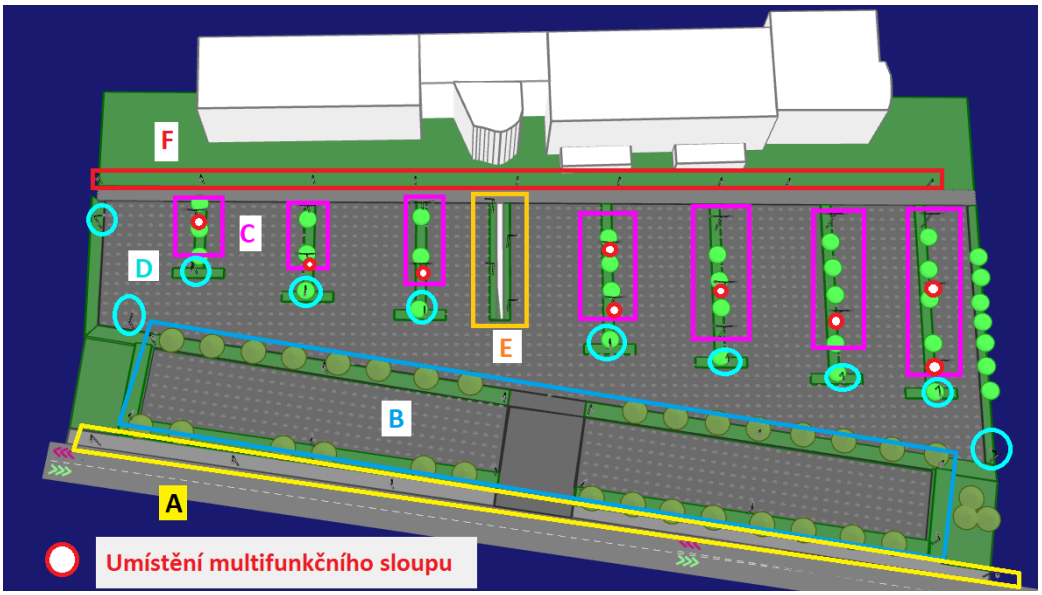
Na základě podobnosti parametrů a podobnosti křivek svítivosti původního a nového svítidla (viz Tabulka 8) lze tvrdit, že se výsledný model a osvětlenost parkoviště změní jen nepatrně a mnou nově navržená osvětlovací soustava bude splňovat všechny požadavky pro veřejné osvětlení parkoviště dle platné normy. Pro simulaci je potřeba tedy vyměnit některá svítidla typu „C“ za svítidla vybraného typu chytrého sloupu veřejného osvětlení, ostatní svítidla se světelnými zdroji zůstanou v návrhu i modelu OS nezměněny.

V původním návrhu Ing. Lihunové bude tedy nahrazeno 9 svítidel MODUS LVLEDOS7500V24 stejným počtem multifunkčních sloupů se svítidly ELEKTRO-LUMEN U1 9k0 740 LED. Pro simulaci mnou upraveného návrhu OS byl využit model Ing. Lihunové (s jejím souhlasem), který jsem upravil o patřičný počet sloupů, přičemž umístění vyměňovaných sloupů jsem zachoval. Přehled umístění všech multifunkčních sloupů (svítidlo označené „X“) a parametry všech svítidel a světelných zdrojů v mém návrhu OS jsou uvedeny na Obrázku 18 a Obrázku 19.

Svítidla použitá v tomto projektu

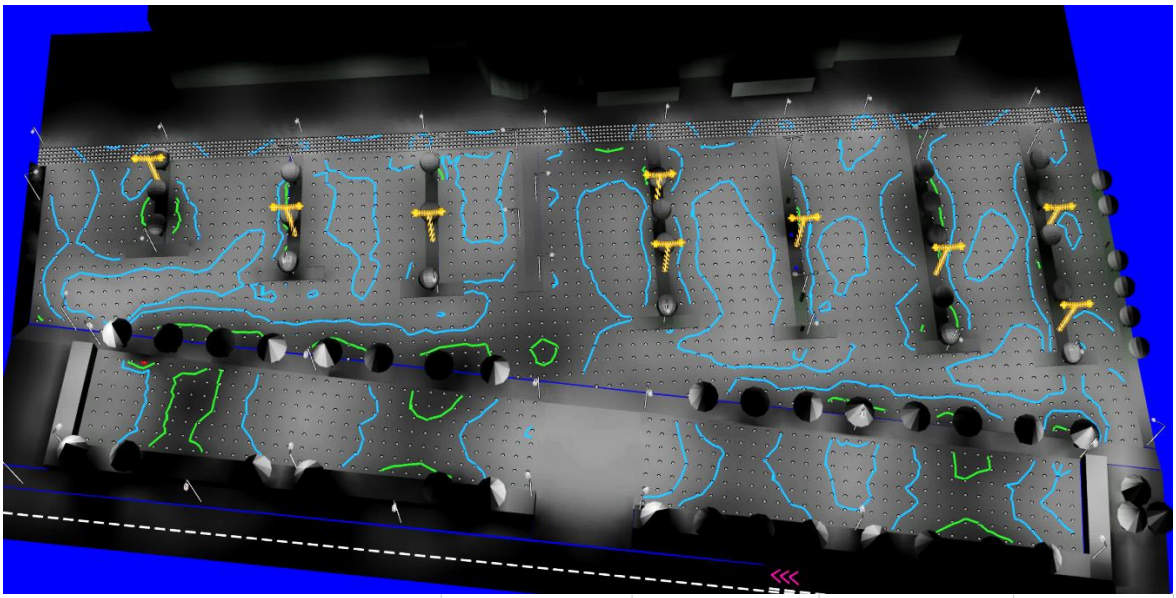
A	Množství: 5 Ks	VYRTYCH	HORNET-100H-E Svítidlo pro osvětlení komunikací		100,0 W 8500,0 lm	IP 43
B	Množství: 12 Ks	Enika Nová Paka	06216296 THEOS A58/W 16LED 140W 4000K AN-96		140,0 W 14153,3 lm	IP 66
C	Množství: 12 Ks	MODUS	MODUS LVLEDOS7500V24 LED svítidlo pro veřejné osvětlení, hliníkový korpus, skleněný kryt, 4000K		58,0 W 7700,0 lm	IP 65
D	Množství: 10 Ks	MODUS	MODUS STL8000C LED svítidlo pro veřejné osvětlení, hliníkový korpus, skleněná optika pro komunikace		60,0 W 8800,0 lm	IP 65
E	Množství: 4 Ks	MODUS	MODUS STL4000P LED svítidlo pro veřejné osvětlení, hliníkový korpus, skleněná optika pro parkoviště		27,0 W 4200,0 lm	IP 65
F	Množství: 9 Ks	MODUS	MODUS STL4000P3 LED svítidlo pro veřejné osvětlení, hliníkový korpus, skleněná optika pro parkoviště, 3000K		27,0 W 4000,0 lm	IP 65
X	Množství: 18 Ks	ELEKTRO-LUMEN	MARUT M ME 9k0 740 Pouliční LED svítidlo, hliníkový odlitek, difuzor skleněný		70,0 W 9000,0 lm	IP 66

Obrázek 18: Návrh nové OS - parametry světelných zdrojů a svítidel



Obrázek 19: Návrh nové OS - rozmístění světelných zdrojů a svítidel na parkovišti

Výsledky výpočtu osvětlenosti a rovnoměrnosti osvětlenosti na ploše celého parkoviště ze simulací modelu v softwaru Building Design jsou uvedeny na následujícím Obrázku 20.



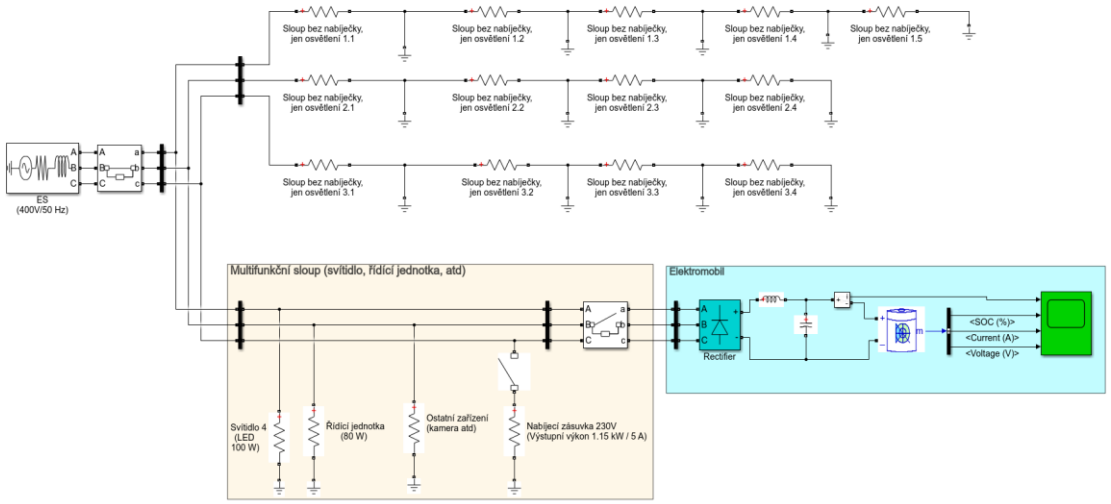
Název	Minimální hodnota	Průměrná hodnota	Maximální hodnota	Rovnoměrnost
Parkoviště- přední část				
Přední část parkoviště - Normálová osvětlenost	8,69 lx	33,3 / 20 lx ✓	49,4 lx	0,26 / 0,25 ✓
Chodník - Normálová osvětlenost	13,2 lx	32,8 / 5 lx ✓	59 lx	0,4 / 0,25 ✓
Levá zadní část parkoviště - Normálová osvětlenost	15,5 lx	31,9 / 20 lx ✓	49,9 lx	0,49 / 0,25 ✓
Pravá zadní část parkoviště - Normálová osvětlenost	7,42 lx	29,9 / 20 lx ✓	51 lx	0,25 / 0,25 ✓

Obrázek 20: Výsledky ze simulace nového návrhu OS ze SW Building Design

Z vizuálního zobrazení výsledků simulace si lze představit výsledný stav po realizaci rekonstrukce mnou navrženého projektu OS. Světle modré izoluxy znázorňují hodnoty vyhovující osvětlenosti, žluté izoluxy požadované hodnoty osvětlenosti dle normy a červené izoluxy nevyhovující hodnoty osvětlenosti dle normy. Zvýrazněny (ozanžově) jsou tam i všechny multifunkční sloupy. Jak je zřejmé, tak na ploše celého parkoviště není nikde místo s nevyhovující osvětleností. Pokud se porovnají výsledky ze simulace modelu mnou navržené OS (viz Obrázek 20) s výsledky prezentovanými Ing. Lihunovou v její diplomové práci (viz Obrázek 17), tak je zřejmé, že se téměř shodují. V mnou navržené úpravě modelu OS pouze průměrné hodnoty osvětlenosti a rovnoměrnosti osvětlenosti nepatrně vzrostly. Z výsledků a výsledných hodnot, lze tedy usuzovat, že mnou navržená OS s multifunkčními sloupy je dle normy vyhovující a lze jí realizovat.

6.3 Základní model chytrého osvětlení parkoviště

Prvním úkolem k vytvoření regulačního schématu chytrého osvětlení parkoviště bylo namodelovat připojení a odpojení baterie a simulovat její nabíjení. První model vytvořený v softwaru MATLAB Simulink není tedy určen k tomu, aby zcela simuloval reálné podmínky. První fungující model, který baterii připojí a nabíjí, je vidět na Obrázku 21.



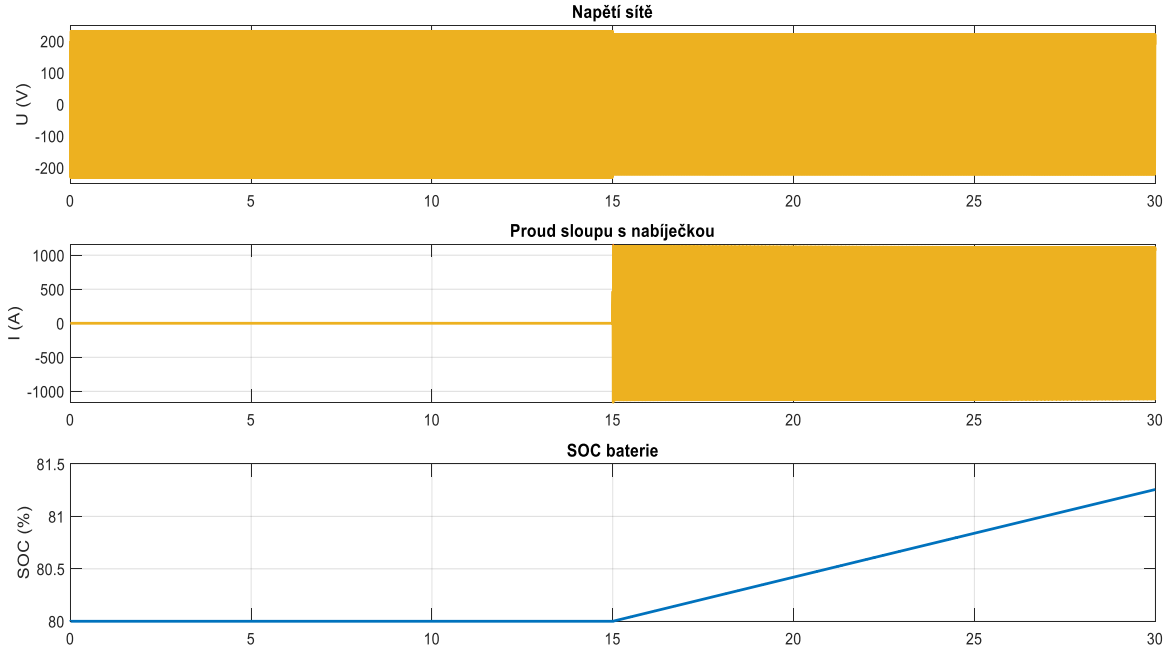
Obrázek 21: Model parkoviště s nesymetrií

Model se skládá ze zdroje, tedy distribuční sítě 230/400V, horní část modelu zahrnuje všechny sloupy veřejného osvětlení bez nabíječky pro elektromobily a spodní část modelu obsahuje jeden chytrý sloup veřejného osvětlení, na který se následně může připojit elektromobil k nabíjení. Chytrý sloup obsahuje svítidlo, svojí řídící jednotku, další zařízení jako např. kamera, senzory atd., a další nabíječku pro přenosná zařízení jako

mobilní telefon nebo notebook. Ke sloupu se může připojit elektromobil, který obsahuje svůj usměrňovač, stejnosměrný meziobvod a baterii, která se nabijí.

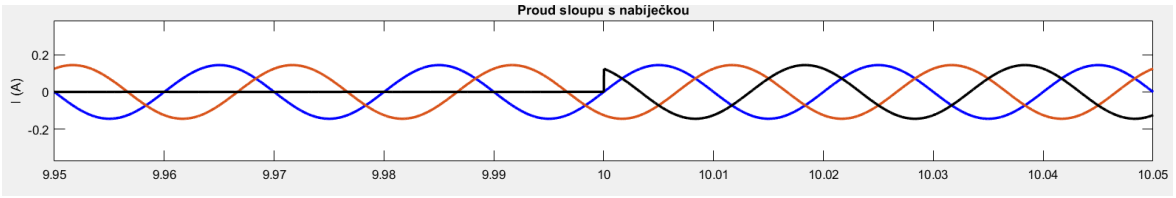
Jak již bylo řečeno, tento model nepopisuje realitu, pouze slouží jako základní model k rozvíjení a ukazuje hlavně připnutí a nabíjení baterie. Výsledné grafy jsou možné vidět na Obrázku 22.

Grafy obsahují průběhy napětí sítě, dále proud, který teče chytrým sloupem a pak procento nabití baterie (SOC) elektromobilu. Je vidět, že v čase 15 s se připojí elektromobil a začne se pomalu nabíjet. Proud se také zvedl, ovšem zvýšil svojí hodnotu nad 1 kA a amplituda velikosti napětí poklesla. Z těchto grafů tedy vyplývá, že je v síti nesymetrie, které musíme v síti zabránit.



Obrázek 22: Grafy modelu parkoviště s nesymetrií

Nesymetrie v tomto modelu je způsobená špatnými hodnotami vypínačů a sériovým zapojením sloupů veřejného osvětlení bez nabíječky, kde v první fázi je připojeno o jeden sloup více než v dalších fázích. Dále pak můžeme pozorovat na Obrázku 23 průběh proudu na chytrém sloupu s nabíječkou, v čase 10 s. V tu chvíli se sepne vypínač na fázi C a připojí se ke sloupu náhodná elektronika (např. se začne nabíjet mobilní telefon) a proud zvýší svojí hodnotu, která před tím byla nulová.



Obrázek 23: Detail proudu chytrého sloupu

Model ale baterii nabíjí a hodnota SOC se dá sledovat a zpětně díky ní i elektromobil odepnout od sítě po nabití, aby nedošlo k přebíjení baterie a tedy nedocházelo tak k jejímu nechtěnému opotřebení.

6.4 Návrh řídícího systému nabíjení elektromobilů a provozu parkoviště

Po vyřešení nabíjení baterie elektromobilu bylo potřeba vytvořit návrh vývojového diagramu popisující, jak bude celé regulační schéma řídícího systému nabíjení elektromobilů (pomocí multifunkčních sloupů) a provozu parkoviště fungovat. Základem bylo si přesně vydefinovat: co a jak se bude signalizovat, jaké parametry je potřeba počítat a jaké kontrolovat. Protože se řeší nabíjení elektromobilů, je vývojový diagram (tj. princip regulačního schéma řídícího systému parkoviště) zaměřen na elektromobil, který přijíždí na parkoviště s úmyslem dobití baterie. Základní podmínka je volné místo s nabíjecí stanicí, jejichž počítání a sledování bude signalizováno na vjezdu na parkoviště, jestli vůbec je někde volné místo pro nabíjení. Pokud žádné místo nebude k dispozici, elektromobil odjede hledat nabíjecí stanici jinde.

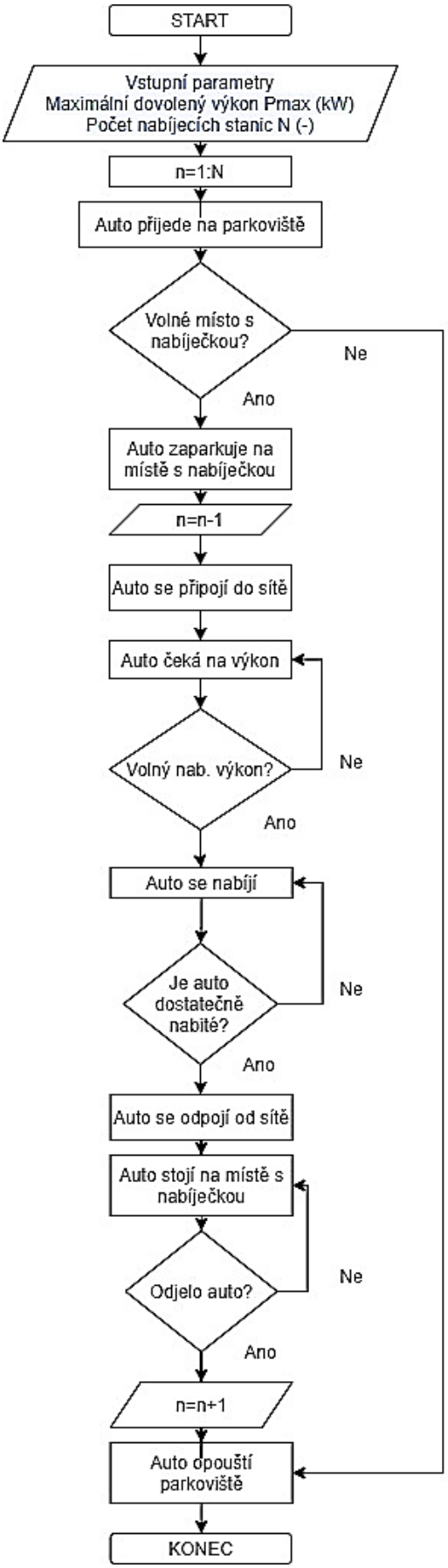
Z reálného hlediska je problém při simulování volného místa. Elektromobil se připojí do sítě a začne se nabíjet. Pokud je dobit, elektromobil se přestane nabíjet, ale elektromobil stále stojí na místě. Pro simulaci se tedy přičítá volné místo až ve chvíli, kdy elektromobil opustí místo s nabíjecí stanicí. Na parkovištích většinou bývají závory a počítání volných míst pomocí parkovacích lístků, na parkovišti FEL ZČU v Plzni se používají identifikační karty zaměstnanců a studentů (JIS). Pro zjištění aktuální obsazenosti parkovacích míst s možností nabíjení elektromobilů by však byla potřeba nainstalovat i senzory pohybu, které by signalizovaly volné nebo zabrané místo.

Dále jsou v mnou vytvořených modelech regulačních schémat uvažovány dvě situace:

1) Všechna svítidla i multifunkční sloupy s nabíječkami pro elektromobily jsou napájeny z části elektrizační sítě, ze které je napájeno celé VO na území města Plzně (koncept vycházející z diplomové práce Ing. Lihunové).

2) Svítidla VO jsou kromě svítidel obsažených v multifunkčních sloupech napájená z části elektrizační sítě, ze které je napájeno celé VO na území města Plzně a multifunkční sloupy se svými svítidly jsou napájené z distribučního transformátoru 22 / 0,4 kV, ze kterého je napájen i areál FEL ZČU v Plzni (koncept vycházející z diplomové práce Ing. Kopačky).

Celý vývojový diagram, na jehož základě, byly následně v softwaru MATLAB Simulink sestaveny schémata regulátorů provozu parkoviště, jednotlivých multifunkčních sloupů a svítidel VO je znázorněn na Obrázku 24.



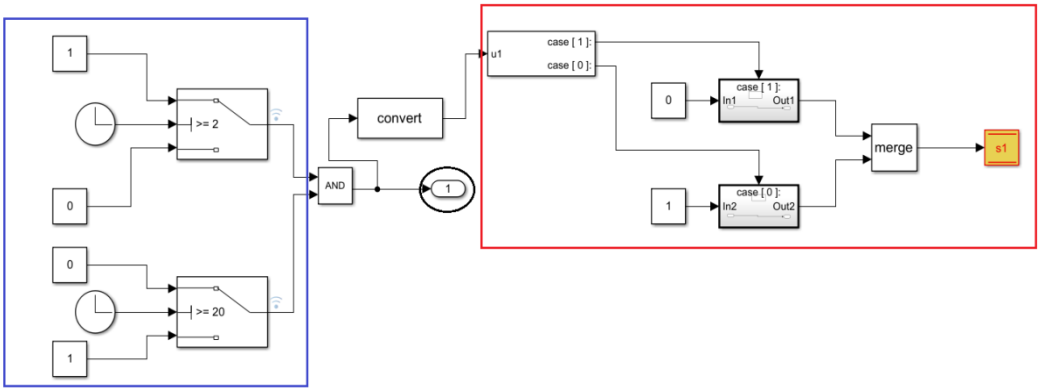
Obrázek 24: Vývojový diagram

Pokud budou multifunkční sloupy napájeny, ne ze sítě VO, ale z distribučního transformátoru 22 / 0.4 kV, ze kterého je napájen areál školy, tak bude navíc potřeba sledovat okamžité hodnoty spotřeby objektu FEL ZČU v Plzni. Dle této spotřeby pak stanovovat možný počet připojených elektromobilů a výkon osvětlovací soustavy proto, aby nedošlo k možnému přetížení tohoto distribučního transformátoru 22 / 0.4 kV. V tomto případě bude potřeba v regulačním schématu i podmínka (omezení) maximálního odebíraného výkonu nabíjecími stanicemi a svítidly. Přičemž se uvažuje, že prioritně se musí pokrýt spotřeba objektu školy, ta nesmí být nikdy omezena, a výkon OS lze plynule řídit dle intenzity slunečního svitu. Hlavní prostředkem pro regulaci spotřeby bude tedy nabíjení elektromobilů.

Uvažoval jsem ve mnou vytvořených modelech oba výše představené koncepty napájení multifunkčních sloupů z důvodu, aby bylo je možné porovnat a regulační obvod regulátoru multifunkčních sloupů i řídícího systému celého parkoviště i řídícího systému OS navrhnout tak, aby byl aplikovatelný pro jakékoliv jiné parkoviště a jiné provozní podmínky. Níže představené modely splňují zadání této práce, ale je možné je dále upravovat dle individuálních požadavků vztahujících se k aplikační oblasti, pro kterou by byly použity.

6.4.1 Návrh regulátoru obsazenosti parkovacího místa

První mnou navržený regulátor má za úkol sledovat obsazení parkovacího místa s nabíjecí stanicí. Všechny mé modely obsahují hlavní regulátor, který sčítá všechny parkovací místa s nabíjecí stanicí. Maximální číslo na displeji (ten by byl nainstalován při vjezdu na parkoviště), který ukazuje výstup z hlavního regulátoru, je devět, tedy celkový počet nabíjecích stanic. Dále pak každý sloup obsahuje regulátor obsazenosti místa s nabíjecí stanicí. Návrh mého regulátoru obsazenosti parkovacího místa je vidět na Obrázku 25.

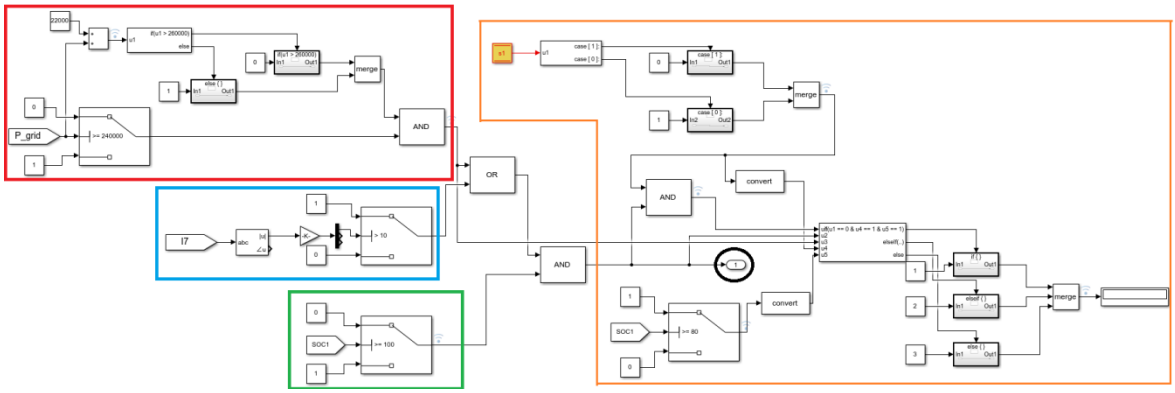


Obrázek 25: Regulátor obsazenosti parkovacího místa

Modrá část regulátoru udává čas, kdy se automobil připojí k nabíjecí stanici, jejíž výstup je znázorněn černě. Pro simulaci příjezdu automobilu na parkovací místo s nabíjecí stanicí je použit tzv. „switch block“, který propustí první vstup v případě, že je splněna podmínka ve druhém vstupu. Pokud podmínka splněná není, propouští se třetí vstup. Může se nastavit čas připojení i odpojení automobilu. Červená část regulátoru počítá obsazenost parkovacího místa. V simulaci to znamená, že pokud je na výstupu modré části jednička, automobil přijel na parkovací místo a připojil se k síti. Červená část regulačního schéma pak posílá do hlavního regulátoru signálem nulu, tedy jedno místo se z celkových devíti odečte. Pokud modrá část má na výstupu nulu, znamená to, že automobil se odpojil od nabíjecí stanice a odjel z parkoviště. Červená část tedy posílá do hlavního regulátoru jedničku a parkovací místo se přičte k celkovému počtu.

6.4.2 Návrh regulátoru nabíjení baterie

Dalším mnou navrženým regulátorem je regulátor nabíjení baterie. Každý multifunkční sloup obsahuje regulaci nabíjení baterie a jeho návrh je zobrazen na Obrázku 26.



Obrázek 26: Regulátor nabíjení baterie

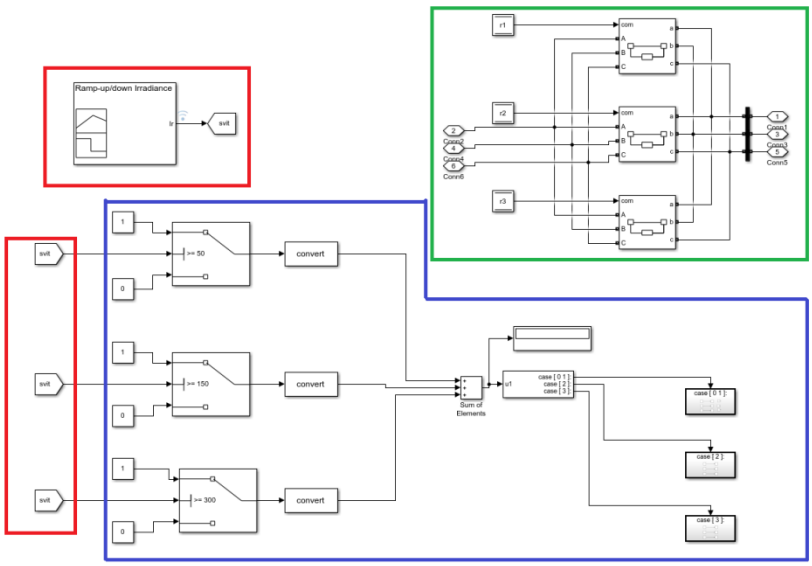
Červená část regulátoru hlídá celkový výkon zdroje. Může také sledovat, jak bude celkový výkon vypadat i po teoretickém přírůstku výkonu, například jestli v síti je dostatek výkonu na nabíjení dalšího automobilu. Modrá část regulátoru sleduje, zda již teče proud do nabíjecí stanice, tedy jestli už nabíjecí stanice nabíjí automobil. Tyto dvě části rozhodují, zda se automobil může, nebo nemůže nabíjet. Pokud červená část má na výstupu jedničku, znamená to, že v síti je dostatek výkonu, pokud tomu tak není, vystupuje nula. Pokud již teče proud do nabíjecí stanice chytrého sloupu, vystupuje z modré části jednička, jinak vystupuje nula. Znamená to tedy, že pokud je v síti dostatek výkonu, automobil se začne nabíjet a do nabíjecí stanice začne téci proud. Pokud v síti dostatek výkonu není, automobil se buď nezačne nabíjet, protože před tím proud netekl do nabíjecí stanice, nebo

se bude stále dál nabíjet, pokud již proud do nabíjecí stanice tekl. Zelená část regulátoru sleduje SOC baterie automobilu. Z této části se vysílá jednička, dokud automobil není nabitý na 100 %.

Oranžová část obsahuje podmínkový blok. Chytrým spojením a zvolením vstupů vystupuje z podmínkového bloku buď jednička, která značí situaci, že se automobil dobil na 100 % a čeká se na majitele automobilu, aby odpojil automobil a odjel a uvolnil tak parkovací místo s nabíječkou. Pokud vystupuje dvojka, znamená to, že se automobil nemůže nabíjet z důvodu nedostatku výkonu v síti. Trojka jako výstup v simulaci slouží jen ke správné funkčnosti podmínkového bloku a dají se v něm přidávat další podmínky dle potřeby. Například, tedy při připojení správných vstupů a nastavení správné podmínky, může tento blok i signalizovat, že se automobil nemůže nabíjet, jelikož je multifunkční sloup v poruše.

6.4.3 Návrh regulátoru OS parkoviště a řízení výkonu

Třetí regulátor slouží k regulaci výkonu. Jeho návrh je vidět na Obrázku 27.



Obrázek 27: Regulátor OS parkoviště a řízení výkonu

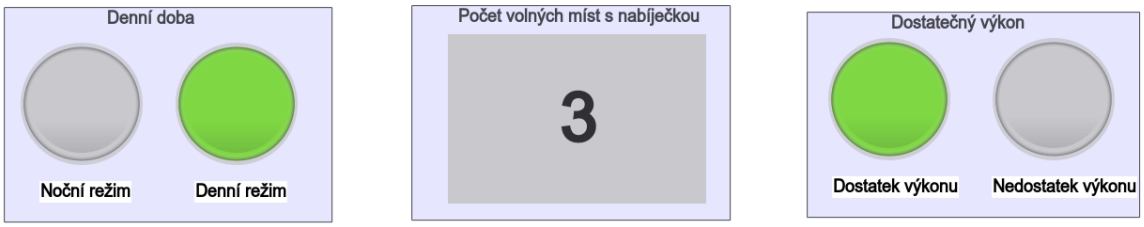
Výkon v simulaci pomocí tohoto regulátoru je řízen pomocí vnitřních odporů vypínačů v zelené části regulátoru. Řízení kdy a jaký vypínač má být momentálně sepnutý, řídí podmínka v modré části. Z podmínky může vystupovat jednička, dvojka nebo trojka dle porovnání podmínky s hodnotami z červené části, která se chová jako vstupní část pro modrou část. Vstupní část může obsahovat i jiné hodnoty, zde například obsahuje intenzitu slunečního svitu, nebo v jiném modelu například výkon v síti.

6.4.4 Návrh kontrolních a informačních panelů se světelnou signalizací

Pro přehlednost řízení provozu, nabíjení elektromobilů a řízení navržené OS, byly navrženy i informační (kontrolní) panely, které udávají díky většinou světelné signalizaci informace o aktuálním provozním stavu. Vstupní data do těchto signalizačních (informačních) a kontrolních panelů jsou z hlavního regulátoru provozu parkoviště, z regulátoru nabíječky multifunkčního sloupu a regulátoru navrženého řízení OS parkoviště.

- ***Centrální signalizace provozu parkoviště***

Centrální signalizace provozu parkoviště je v modelu umístěna na vjezdu do parkoviště a jejím cílem je informovat přijíždějící řidiče o možnosti nabití elektromobilu na daném parkovišti. Kontrolní (informační) panel je zobrazen na Obrázku 28.



Obrázek 28: Kontrolní (informační) panel centrální signalizace

Světelná signalizace na kontrolním panelu rozsvěcí dle pokynu (signálu), který přichází z hlavního regulátoru provozu parkoviště. Jednotlivá signalizace má za cíl podávat tyto informace:

- *Denní doba*

Pokud model obsahuje sloupy veřejného osvětlení, simulace obsahuje signalizaci denní doby, která značí, zda veřejné osvětlení svítí nebo ne.

- *Počet volných míst s nabíječkou*

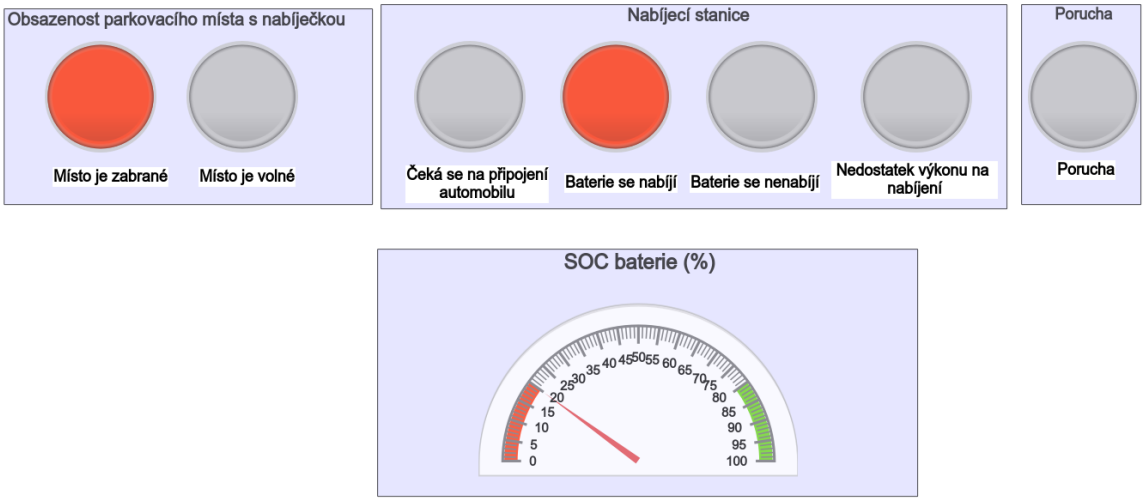
Displej u příjezdu na parkoviště udává počet volných míst k nabíjení elektromobilu. Způsob sledování volného místa byl již popsán v úvodu kapitoly 6.4.

- *Dostatečný výkon*

Pokud v síti není dostatečný výkon, signalizuje se modrá, jinak zelená.

- ***Signalizace chytrého sloupu***

Obdobně jako byla navržena centrální signalizace provozu parkoviště, tak je navržena i signalizace (informační a kontrolní panel) provozu multifunkčních sloupům, viz Obrázek 29.



Obrázek 29: Kontrolní (informační) panel chytrého sloupu

- *Obsazenost parkovacího místa s nabíječkou*

Každý sloup posílá signál do centrálního regulačního systému o volnosti místa. Signalizuje se zelená, jako volné místo a červená, jako místo zabrané

- *Nabíjecí stanice*

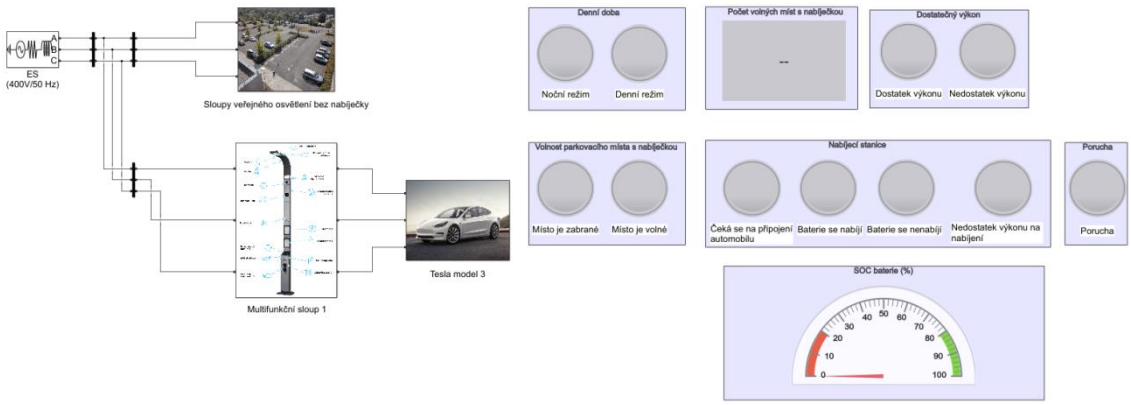
Nabíjecí stanice signalizuje žlutou, kdy se čeká na připojení elektromobilu ke sloupu. Po připojení se signalizuje červená při dobíjení, zelená při dobití a odpojení elektromobilu od sítě, kdy se čeká, než majitel elektromobilu odpojí přívodní kabel a nakonec modrá, pokud je elektromobil připojený, ale nemůže se z důvodu nedostatku volného výkonu v síti nabíjet.

- *Porucha*

Pokud se vyskytne porucha na sloupu, ochrana zareaguje, odpojí se celý sloup od sítě a signalizuje se červená. Při poruše je ale možné sloup stále používat k osvětlení. Odstranění poruchy a uvedení chytrého sloupu znovu do provozu musí provést školený personál.

6.5 Finální základní model

Po modelu pro nabíjení baterie a vyřešeném vývojovém diagramu vznikl finální základ modelu, který se dále upravoval a zdokonaloval podle potřeby a je vidět na Obrázku 30.



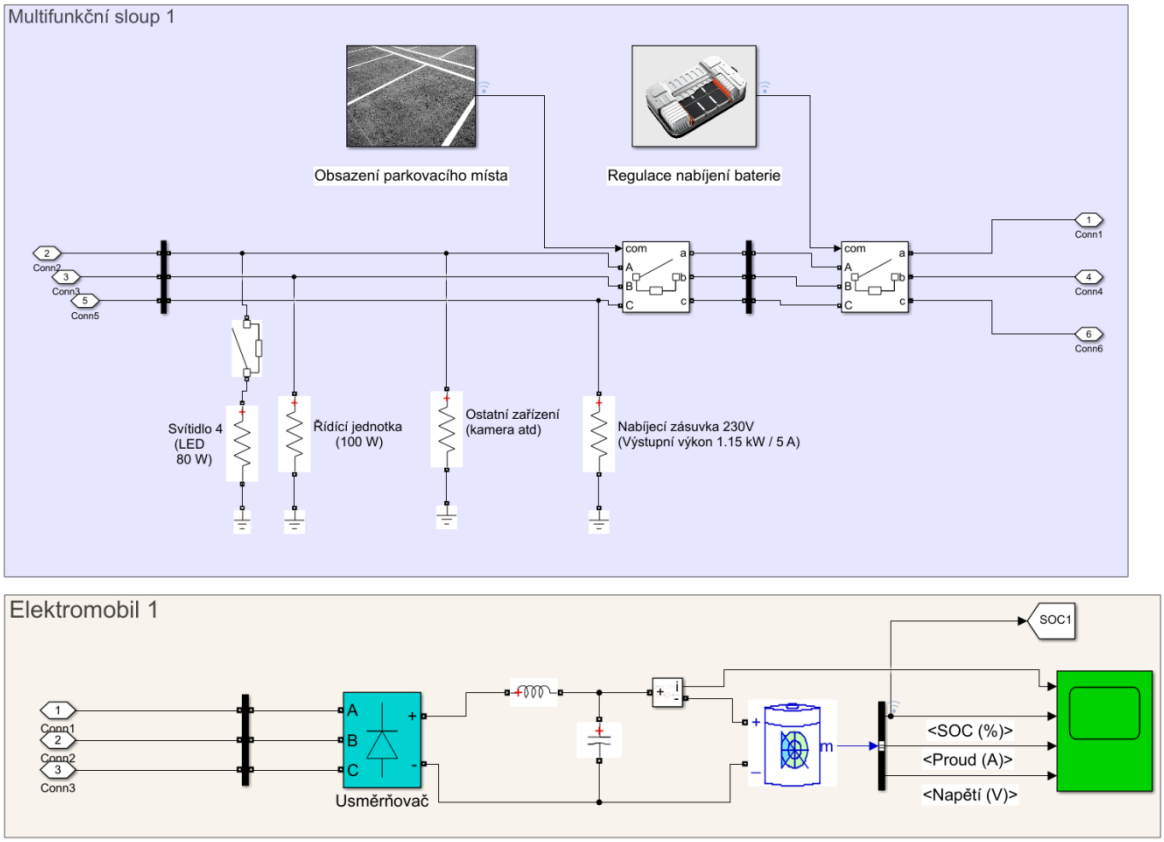
Obrázek 30: Finální základní model

Model vždy obsahuje zdroj, tedy distribuční síť 230/400 V, chytré sloupy veřejného osvětlení s nabíjecí stanicí, kterých je 9, jak již bylo vypočteno v kapitole 6.1, a u kterých se podle potřeby a aktuální simulace kontroluje maximální výkon v síti. Na Obrázku 31 jsou parametry nabíječky. K chytrým sloupům jsou připojeny elektromobily, pro účely simulace byly vybrány elektromobily Tesla model 3, BMW i3 a Škoda Citigo-e iV. Nakonec model obsahuje paralelně připojený objekt k chytrým sloupům. To můžou být buď sloupy veřejného osvětlení, anebo, v dalších simulacích, připojená budova.

Technické parametry	
Nabíjecí režim:	AC
Výstupní napětí:	3x 230 V AC
Nabíjecí napětí:	3 x 230/400V / 50Hz (TNS)
Výstupní výkon:	22 kW / 32 A
Typ zásuvky:	EU TYP2 (EV-T2M3SE12-3AC32A-0,7M6,0E00)
Kalibrovaný elektroměr:	ANO
Krytí:	IP54
Rozměr zásuvky:	85 x 93.7 x 32.5 mm
Možnost připojení:	nabíjecí stanice ukončena zásuvkou
Blokace zásuvky při nabíjení:	ANO
Stav nabíjení indikován:	na LCD, stavovou signalizací - stav RGB světla
Nabíjení:	Standard IEC 61851-1 MODE3
Nabíjecí zařízení:	Phoenix Contact EEM-350-D-MCB

Obrázek 31: Parametry nabíječky

Na Obrázku 32 jsou zobrazeny výsledné chytré sloupy a elektromobily.



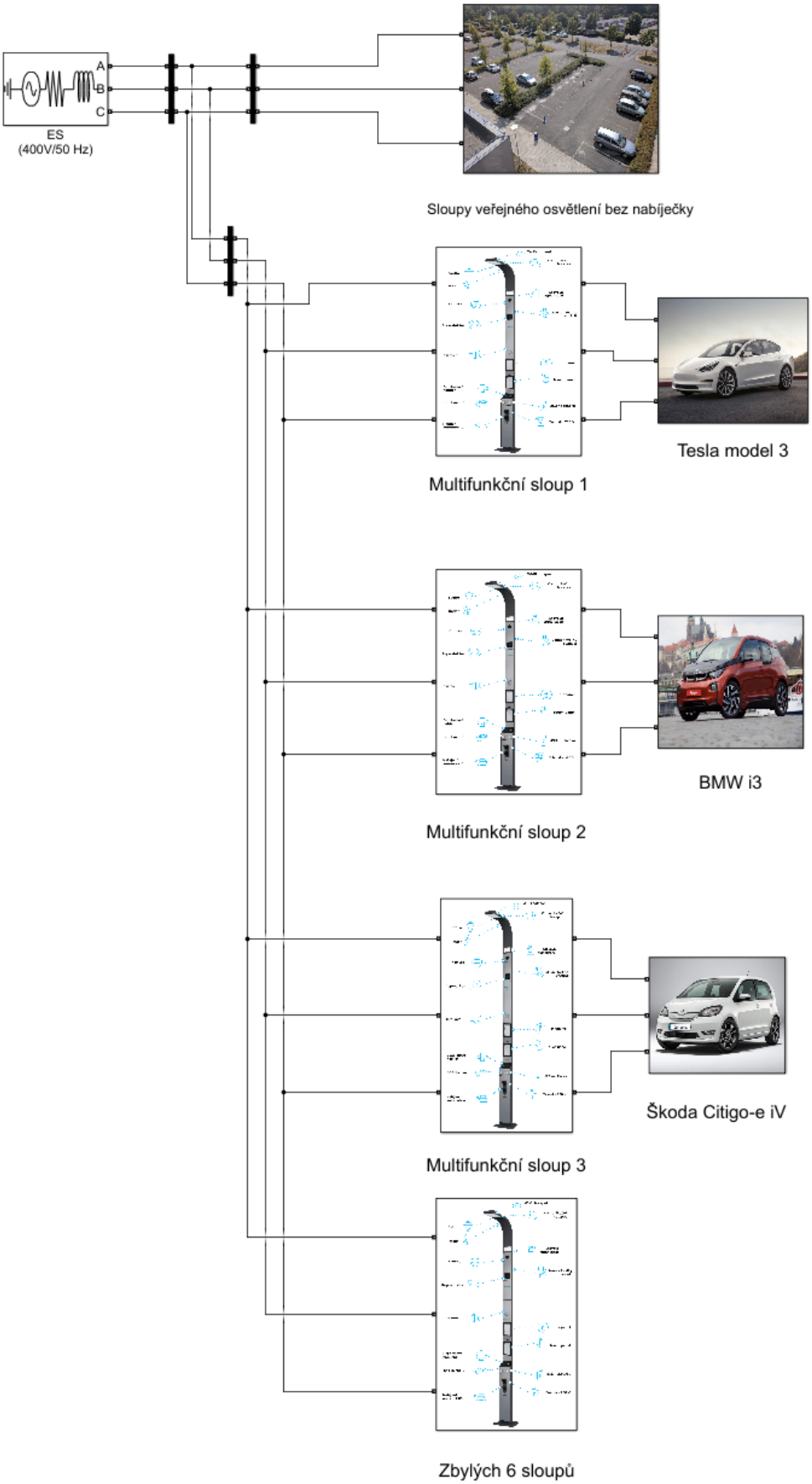
Obrázek 32: Návrh chytrého sloupu a elektromobilu

Jak již bylo řečeno výše, simulace obsahuje 3 elektromobily. K tomu obsahuje 3 varianty multifunkčního sloupu, kde každá varianta obsahuje jinak rozmístěné vnitřní součásti na jiné fáze tak, aby bylo dosaženo symetrie zatížení (první sloup má svítidlo na první fázi, druhý sloup na druhé fázi atp.). Tabulka 9 obsahuje parametry elektromobilů použitých v simulaci.

Tabulka 9: Parametry použitých elektromobilů

Název elektromobilu	Nominální napětí (V)	Kapacita (Ah)
Tesla model 3	350	215
BMW i3	360	118
Škoda Citigo-e iV	350	106

Nakonec Obrázek 33 je zde pro představu, jak jsou připojeny všechny sloupy k sobě. Ve všech simulacích je všech devět multifunkčních sloupů, kde se tři varianty třikrát opakují, připojených paralelně ke sloupům veřejného osvětlení, nebo k objektu.



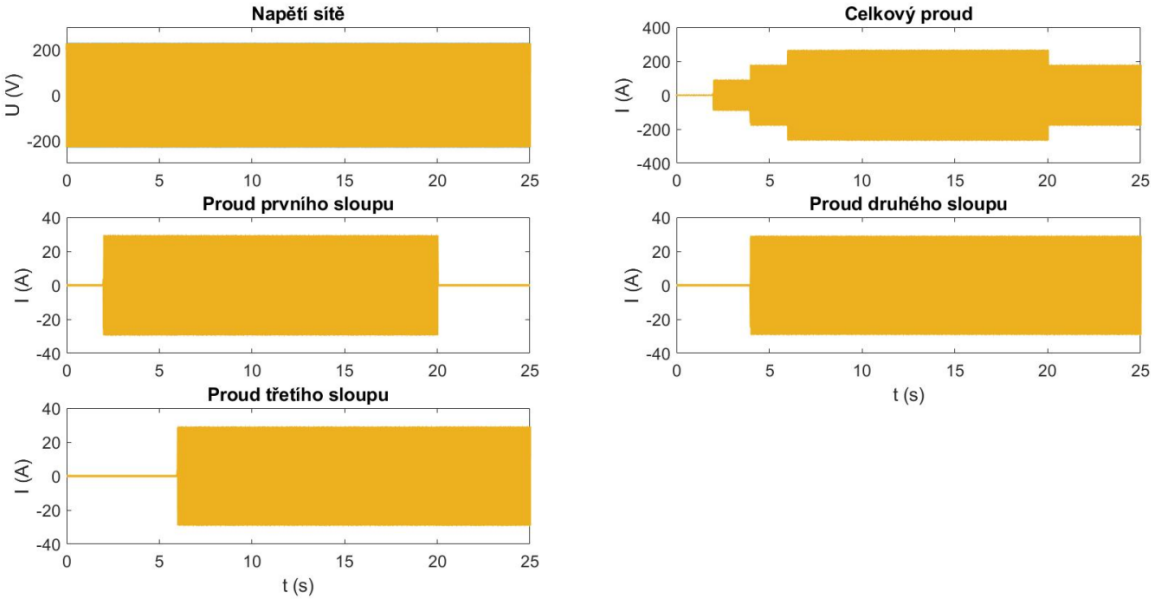
Obrázek 33: Zapojení multifunkčních sloupů

7 Výsledky simulací navrženého modelu

7.1 První simulace – veřejné osvětlení

Tento model navazuje přímo na model zobrazený na Obrázku 30. Model tedy obsahuje sloupy veřejného osvětlení z kapitoly 6.2 a Obrázku 18.

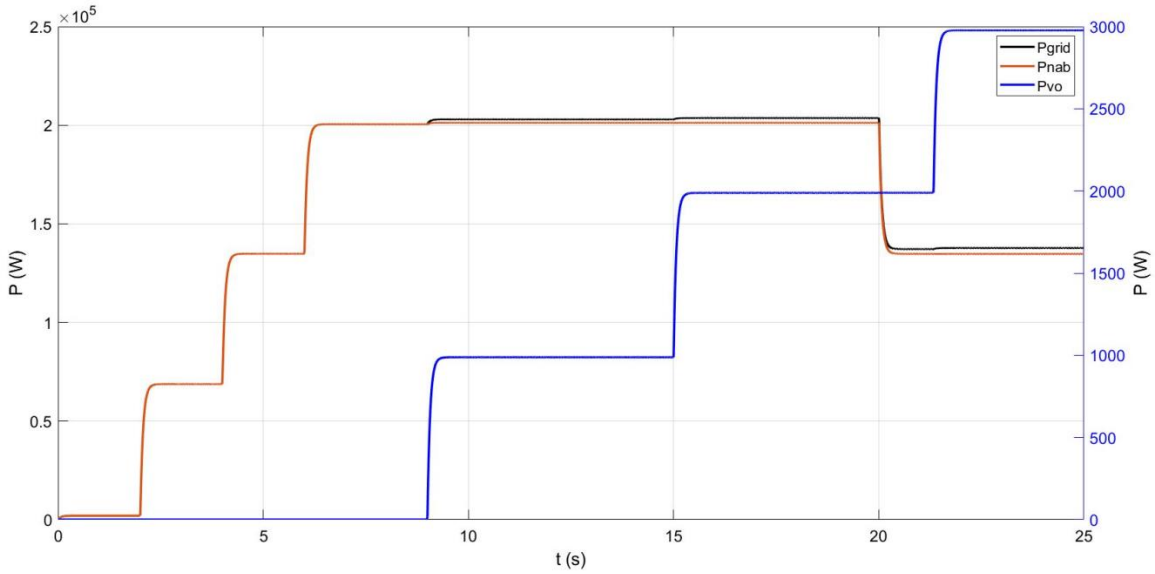
Předpokládejme, že při celkové rekonstrukci veřejného osvětlení parkoviště FEL ZČU v Plzni, by se dimenzovalo připojení právě na maximální výkon při plném výkonu všech nabíjecích stanic a při plném výkonu veřejného osvětlení tzn., navržená OS s multifunkčními sloupy by byla napájena z části elektrizační sítě, ze které je napájeno celé VO na území města Plzně. Výsledné grafy ze simulace toho modelu v softwaru MATLAB Simulink jsou zobrazeny na Obrázku 34, Obrázku 35 a na Obrázku 36.



Obrázek 34: Napětí a proud první simulace

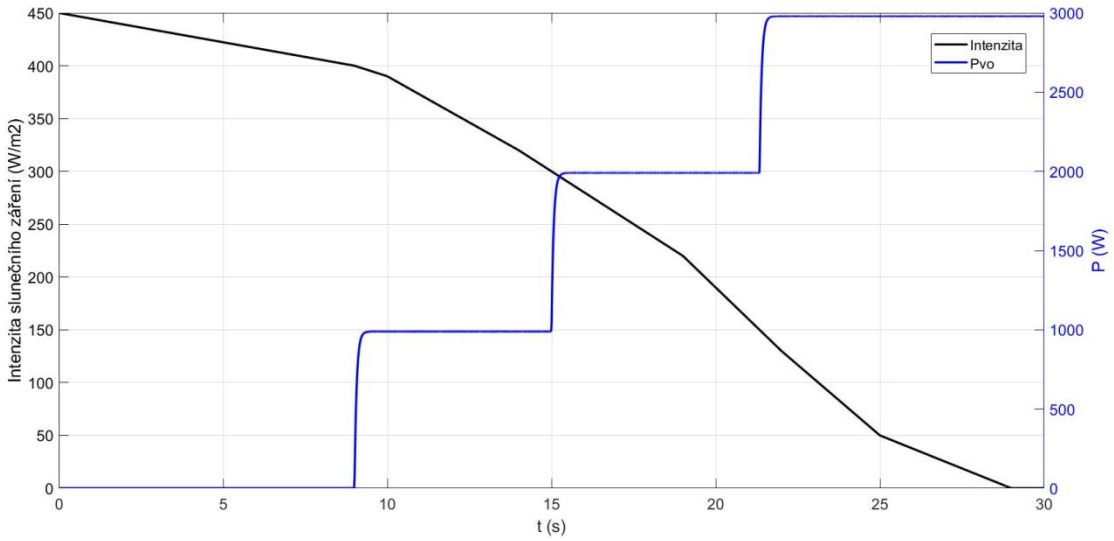
Z grafů je vidět, že síť je ideálně tvrdá, tedy napětí se v čase nemění. V této simulaci se připojují nebo odpojují vždy 3 chytré sloupy najednou, tedy proudy prvního, druhého a třetího sloupu jsou v síti dohromady třikrát. Je také vidět, že každý sloup nabíjí plným proudem 32 A. Celkový proud se mění dle připojení a odpojení sloupů. Na začátku simulace je celkový proud téměř nulový. V čase 2 s, 4 s a 6 s se začne nabíjet vždy trojice elektromobilů (v čase 6 s je tedy připojeno všech devět elektromobilů) a celkový proud se v těchto časech vždy úměrně navýší, jak je vidět z grafů na Obrázku 34. V čase 20 s se odpojí trojice elektromobilů a celkový proud poklesne na stejnou hodnotu, jaká byla v čase 4 s, protože je připojené stejné množství elektromobilů. V čase přibližně 9 s se připojí VO, protože se začalo stmívat a tak se snižuje intenzita slunečního záření, to ale na grafu

proudu není vidět z důvodu nízkého připočteného proudu. K lepší představě připojení VO slouží Obrázek 35, kde jsou vidět výsledné výkony simulace.



Obrázek 35: Výkony první simulace

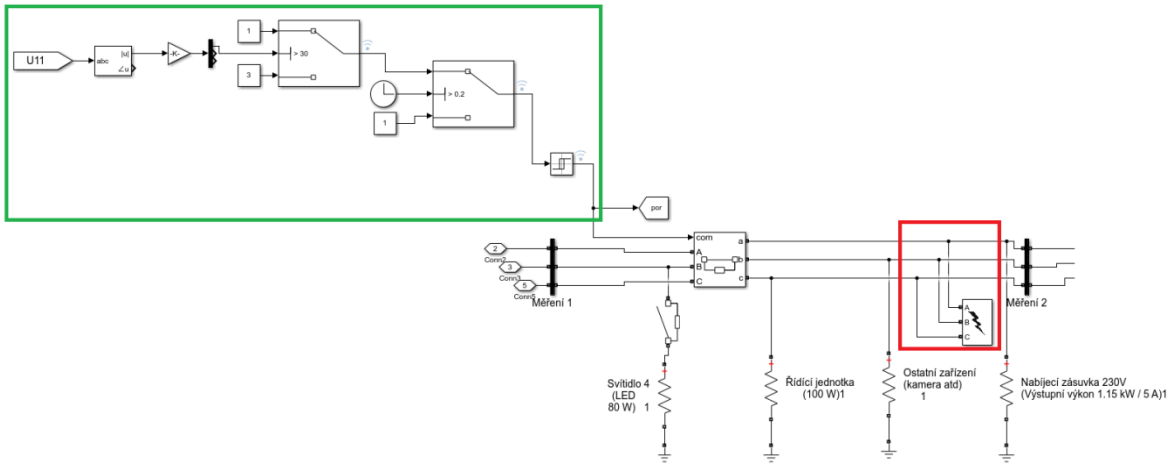
Průběh celkového výkonu sítě P_{grid} kopíruje výkon chytrých sloupů P_{nab} až do chvíle, kdy se sepne výkon veřejného osvětlení P_{vo}. P_{grid} se zvyšuje o aktuální výkon VO. P_{nab} se zvyšuje nebo snižuje přesně v místech, kde se na Obrázku 34 zvyšuje nebo snižuje celkový proud. VO se sepne v čase 9 s a dále se reguluje dle aktuální intenzity slunečního záření. Celková regulace výkonu VO na intenzitě slunečního záření průběh je vidět na Obrázku 36. Výkon veřejného osvětlení se postupně zvedá o třetinu maximálního výkonu v hodnotách 400, 300 a 150 W/m^2.



Obrázek 36: Výkon veřejného osvětlení

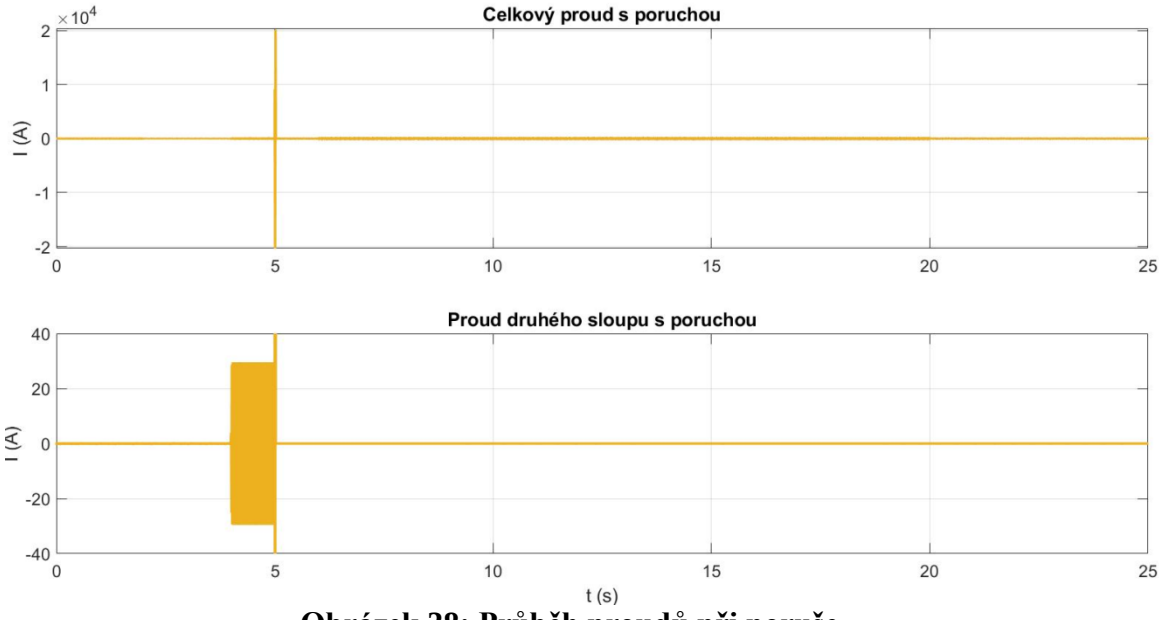
7.1.1 Porucha na sloupu

Tato simulace proběhne na stejném modelu, ovšem teď nastane porucha na Multifunkčním sloupu 2 z Obrázku 33. Návrh regulace multifunkčního sloupu při poruše je zobrazen na Obrázku 37.



Obrázek 37: Porucha na sloupu

V červené části je vyobrazené místo, kde vznikne na sloupu třífázová porucha. Na bloku Měření 2 probíhá měření napětí. Když napětí klesne pod určitou zadanou hodnotu (ideálně klesne na nulu), v zelené části regulátoru se odešle vypínací signál na relátko, které odpojí sloup od sítě a tím tak odstaví poruchu až do chvíle, kdy by sloup musela opravit školená obsluha a zprovoznit celý sloup. Při poruše se ale sloup může dál používat jako veřejné osvětlení. Obrázek 38 zobrazuje výsledný celkový proud sítě a proud poškozené sloupu s třífázovou poruchou.

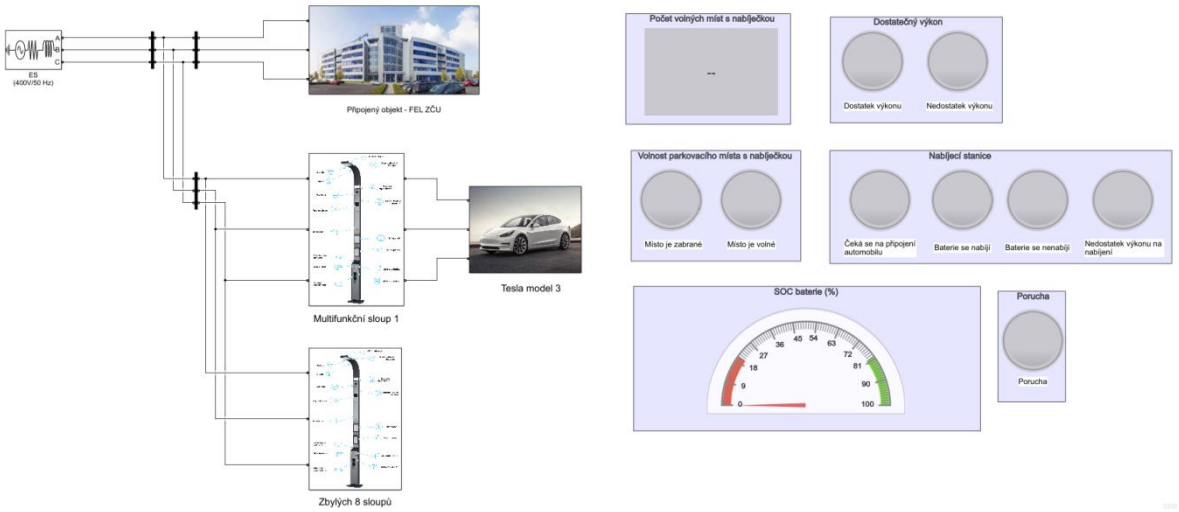


Obrázek 38: Průběh proudů při poruše

V této simulaci se elektromobil připojí v čase 4 s, ovšem v čase 5 s vznikne na sloupu souměrná třífázová porucha, díky které mnohonásobně vzroste proud. Ochrana zareaguje, sloup se odpojí od sítě a signalizuje se červená na sloupu, jak již bylo popsáno v kapitole 6.4.4. Sloup se dá ale dále využívat jako veřejné osvětlení.

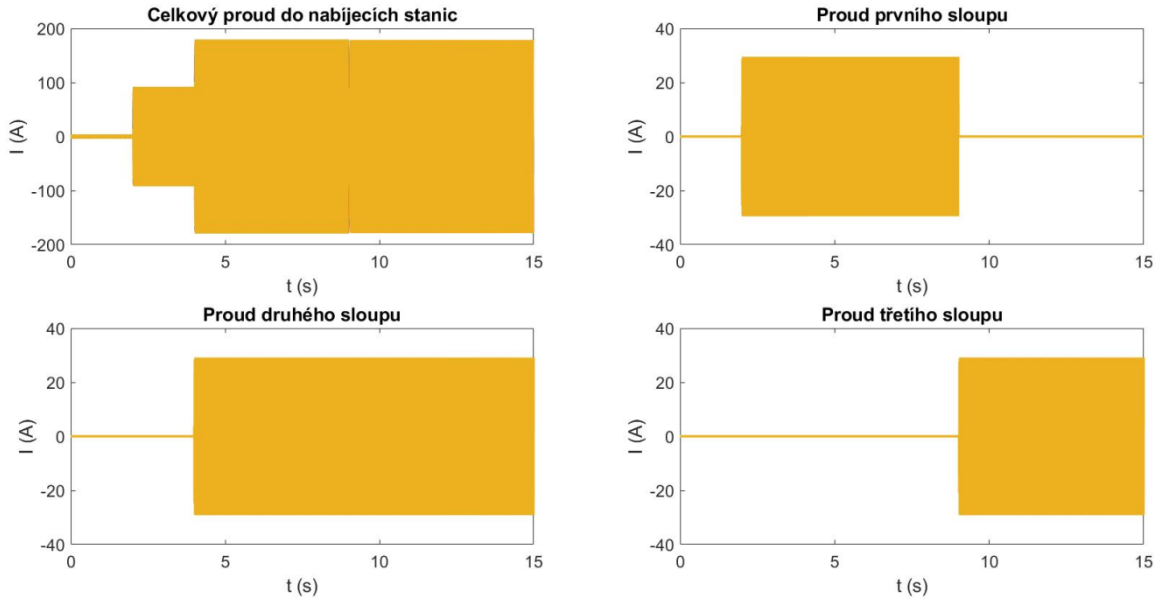
7.2 Druhá simulace – omezený výkon

První simulace měla předpoklad, že při rekonstrukci parkoviště bude síť dimenzována na celkový maximální výkon. Druhá simulace navazuje na práci pana Ing. Kopačky, tedy že chytré sloupy s nabíječkou budou připojeny na transformátor 22 / 0,4 kV (400 kVA) a uvažujeme zde výkonovou rezervu 90 – 160 kVA. Chytré sloupy budou paralelně zapojeny se školou, u které předpokládáme konstantní zátěž 150 kW. Pro simulaci zanedbáme jalový výkon. Obrázek 39 zobrazuje model druhé simulace.



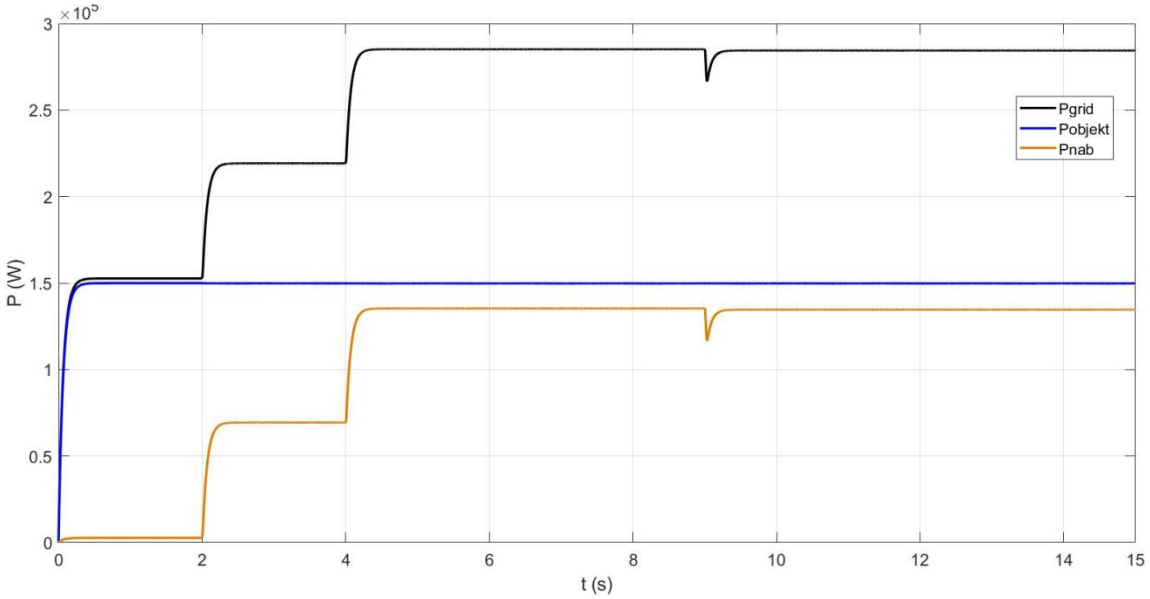
Obrázek 39: Model pro druhou simulaci

V simulaci je tedy maximální výkon omezen jmenovitým výkonem transformátoru. Hodnoty by neměly přesáhnout 310 kW. Výsledky simulace jsou na Obrázku 40 a 41.



Obrázek 40: Proudy druhé simulace

V simulaci se v čase 2 s, 4 s a 6 s připojí vždy trojice elektromobilů (v čase 6 s je tedy připojeno všech devět elektromobilů ke sloupu) a celkový proud se v těchto časech vždy úměrně navýší, jak je vidět z grafů na Obrázku 40. Z grafů je ale vidět, že v čase 6 s se proud nezvýší, protože při připojení druhé trojice elektromobilů v čase 4 s se navýší výkonová hodnota a při připojení sedmého elektromobilu by se již překročil dovolený výkon. V čase 6 s je tedy připojeno všech 9 elektromobilů, v síti je ale výkon pouze k nabíjení 6 elektromobilů. Elektromobily tedy čekají na volný výkon v síti, aby se mohly nabíjet. V čase 9 s dojde odpojení 3 sloupů, uvolní se tedy volný výkon v síti a dojde k regulaci výkonu, jak je vidět na Obrázku 41.

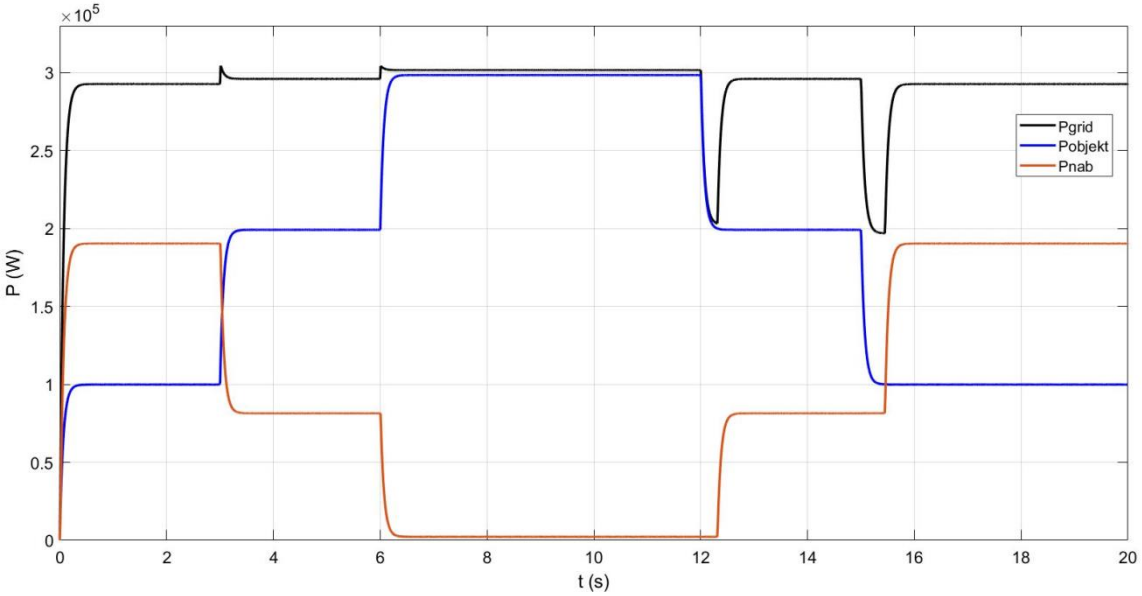


Obrázek 41: Výkony druhé simulace

Z grafu výkonů je vidět, že z možného přibližného výkonu všech nabíjecích stanic 198 kW je maximálně využito přibližně 140 kW. K přetížení transformátoru tedy nedojde, ovšem tento způsob řízení výkonu není vhodný, majitelé elektromobilů musí čekat na dostatečný výkon sítě a nedá se přesně určit, když na jaký automobil přijde řada. Také záleží na výkonu připojeného objektu, navíc v simulaci se předpokládala konstantní zátěž, to také není vždy pravda.

7.3 Třetí simulace – řízení výkonu

Jak již bylo řečeno, s vývojem elektromobility a přibývajících elektromobilů bude potřeba vyvinout centrální systémové řízení výkonu. Díky tomu budou být připojeny, sice s nižším výkonem, všechny dostupné nabíjecí stanice. V této simulaci předpokládáme proměnlivou zátěž objektu, přesněji tedy 100, 200 a 300 kW a všechny připojené nabíjecí stanice, tedy je využit maximální výkon nabíjecích stanic. Sloupy i objekt jsou opět připojeny k transformátoru 400 kVA s výkonovou rezervou 90 – 160 kVA a opět zanedbáváme jalový výkon. Výsledek simulace zobrazuje Obrázek 42.



Obrázek 42: Výkony třetí simulace

Objekt má proměnlivou zátěž v čase. V časech 3 s a 6 s se připojí a v časech 12 s a 15 s se odpojí vždy 100 kW proměnlivé zátěže. Výkon nabíjecích stanic se tedy reguluje tak, aby nebyla překročena maximální zátěž transformátoru. Výkon nabíjecích stanic je při maximální zátěži objektu jen přibližně 10 kW, všechny elektromobily se ale nabíjí současně. Je také vidět, že výkon se nereguluje plynule, ale skokově.

8 Energetické a ekonomické zhodnocení

V práci se bude z hlediska energetiky a ekonomiky hodnotit první simulace, tedy možnost, že by proběhla celková rekonstrukce parkoviště, která by obsahovala sloupy veřejného osvětlení bez nabíječky podle původního světelného návrhu, ovšem 9 sloupů typu C byly vyměněny za chytré sloupy s nabíječkou pro elektromobily. Vzhledem k nedostatečným informacím předpokládaného reálného počtu elektromobilů, které se budou během roku či dne na parkovišti nabíjet, tak je návrh chytrého osvětlení parkoviště zaměřen pouze na zhodnocení návrhu osvětlovací soustavy bez uvažování nabíječek elektromobilů. Ekonomické a energetické zhodnocení je tedy zaměřeno pouze provoz svítidel osvětlovacích soustav.

Celkový příkon v návrhu chytrého osvětlení parkoviště a chodníku se zjistí tak, že se sečte příkon všech světelných zdrojů a svítidel, které lze nalézt v Tabulce 10, a dostáváme rovnici (11), kde n_s je počet světelných zdrojů a P_s je výkon jednoho svítidla:

$$P_c = \sum n_s \,.\, P_s = 9 \,.\, 27 + 12 \,.\, 58 + \cdots + 18 \,.\, 80 = 4\,767\ (W) \tag{11}$$

Celkovou spotřebu elektrické energie za rok v případě, že počítáme roční dobu využití osvětlovací soustavy jako 4 000 h, vypočteme ze vztahu (12), který je spočítán dále v práci.

K ekonomickému zhodnocení, stejně jako u energetického zhodnocení, chytrého osvětlení se využije metodika výpočtu stejná jako je použita v práci Ing. Lihunové [1]. K ekonomickému hodnocení se musí provést úvaha, jestli je výhodnější zachovat původní soustavu, zrenovovat jí anebo vytvořit kompletně novou soustavu OS. V každé úvaze se uvažuje nad mnoha parametry, jako např. investiční náklady, budoucí provozní náklady, roční výdaje za výměnu světelných zdrojů. V případě této práce ale postačí zjednodušená varianta výpočtu, použije se stejná, jako v již zmíněné práci. Tabulka 10 obsahuje potřebné informace o použitých svítidlech. Z důvodu nedostatečných informací o chytrém sloupu, který byl vybrán do praktické části, není známá přesná částka za svítidlo se světelným zdrojem, jenž je součástí multifunkčního sloupu. Z přiloženého konfigurátoru variant sloupu [51] se ale dá vypozorovat, že přibližná cena za světelný zdroj by mohla činit přibližně 10 000 Kč, použije se tedy tato hodnota.

Tabulka 10: Informace o svítidlech

Název svítidla	Cena (Kč)	Počet kusů	Výkon (W)
MODUS STL4000P3	9 062,90	9	27
MODUS LVLED057500V24	19 456,80	12	58
MODUS STL8000C	28 177,50	10	60
THEOS 20/A58/W	25 319,30	12	140
MODUS STL4000P	27 493,50	4	27
ELEKTRO-LUMEN U1 9k0 740 LED	10 000,00	18	80

V Tabulce 11 jsou použité hodnoty pro výpočet ekonomického zhodnocení. Protože tato práce navazuje na již zmíněnou práci, použijí se stejné hodnoty ceny montáže c_{mon} a ceny elektrické energie c_e.

Tabulka 11: Hodnoty pro výpočet

P_c (W)	n (kus)	c_{sv} (Kč)	c_{mon} (Kč)	c_e (Kč)	t_c (h)
4 767	65	1 190 628,30	500	2,5	4 000

P_c značí celkový příkon soustavy, kdy se sečte příkon všech svítidel dohromady. Dále se spočítá roční spotřeba elektrické energie E (kWh), daná vztahem (12), kde t_c je roční doba využití.

$$E = P_c \,.\, t_c = 4{,}767 \,.\, 4000 = 19\,068\ (kWh) \tag{12}$$

V další rovnici (13) se vypočte roční spotřeba veřejného osvětlení S_R.

$$S_R = E \,.\, c_e = 19\,068 \,.\, 2{,}5 = 47\,670\ (K\check{c}) \tag{13}$$

Nakonec se vypočítají celkové investiční náklady N_c, kde se k celkové ceně za svítidla c_v přičte cena za montáž svítidla. Výpočet je uveden v rovnici (14).

$$N_C = c_{sv} + (n \,.\, c_{mon}) = 1\,190\,628{,}30 + (65 \,.\, 500) = 1\,223\,128{,}3\ (K\check{c}) \tag{14}$$

Celkové ekonomické a energetické hodnocení je shrnuto v Tabulce 12.

Tabulka 12: Tabulka výsledných hodnot

Počet (kus)	Celková cena (Kč)	P_c (kW)	E (kWh/rok)	S_R (Kč/rok)	N_c (Kč)
65	1 190 628,30	4,767	19 068	47 670	1 223 128,30

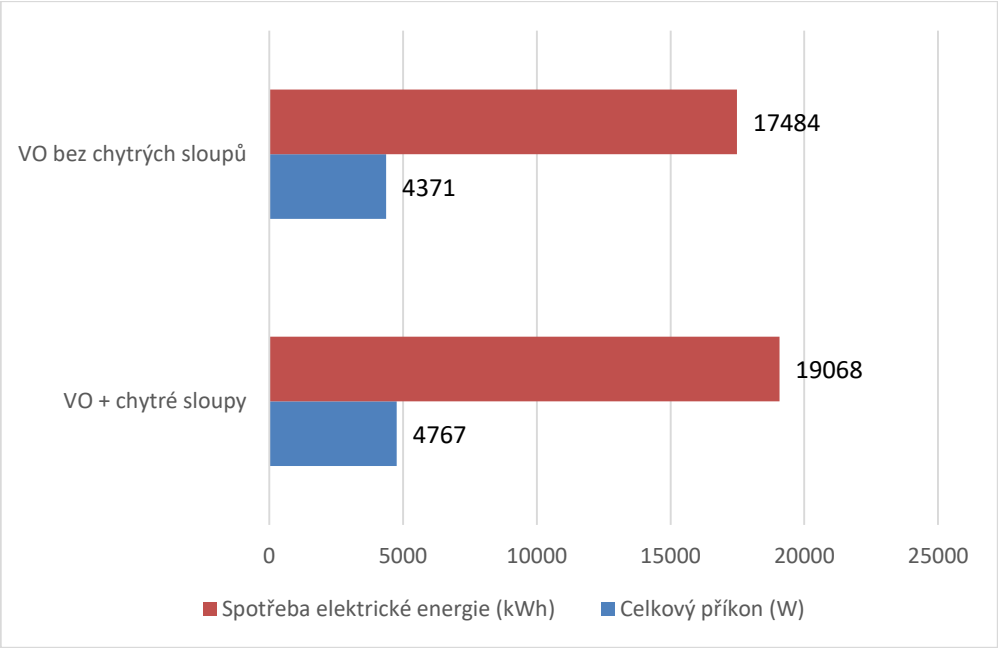
Tabulka 13 obsahuje ekonomické a energetické zhodnocení chytrého osvětlení v případě, že by byla prováděna regulace osvětlení o 40 % a poslední řádek tabulky obsahuje úspory oproti variantě bez regulace.

Tabulka 13: Regulace osvětlení o 40 %

Počet svítidel (kus)	65
Celkový příkon soustavy bez regulace (kW)	4,767
Celkový příkon soustavy s regulací (kW)	2,860
Roční doba využití soustavy bez regulace (h/rok)	1 600
Roční doba využití soustavy s regulací (h/rok)	2 400
Spotřeba elektrické energie bez regulace (kWh/rok)	7 627,20
Spotřeba elektrické energie s regulací (kWh/rok)	6 864,20
Cena elektrické energie (Kč/kWh)	2,5
Náklady za elektrickou energii bez regulace (Kč/rok)	19 068
Náklady za elektrickou energii s regulací (Kč/rok)	17 161
Celkové náklady za elektrickou energii (Kč/rok)	36 229
Roční úspora elektrické energie (Kč/rok)	11 441

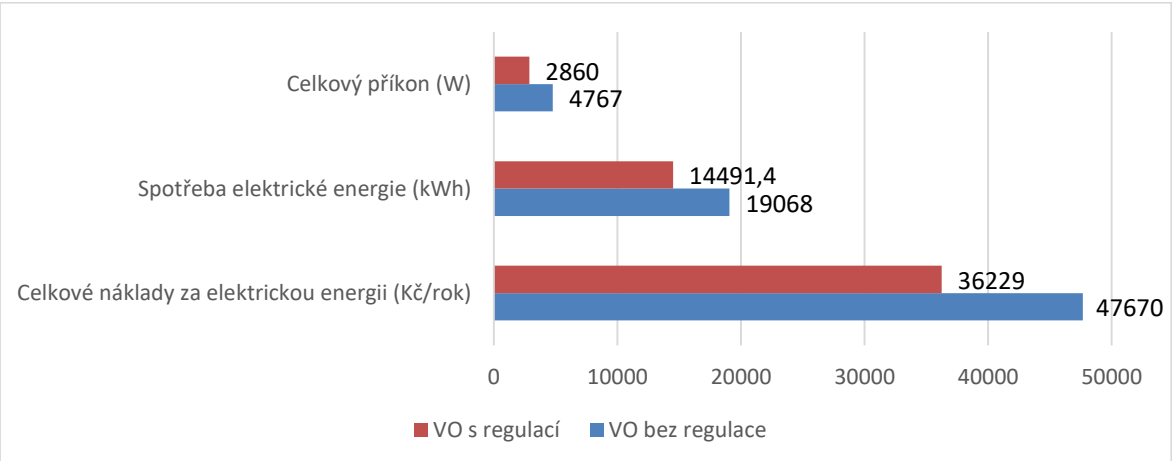
Tabulka 12 udává celkové zhodnocení mého prvního navrženého modelu. Tabulka 13 říká, že při použití regulace osvětlení by došlo k úspoře 11 441 Kč ročně. Hodnoty jsou počítány pro veřejné osvětlení. Kdybychom do výpočtu přidali ještě pořizovací cenu jednoho sloupu s nabíječkou pro elektromobily, u kterého minimální cena je 105 161 Kč, jak pořizovací náklady, tak i roční spotřeba elektrické energie by se rapidně zvedla.

Obrázek 43 udává graf energetického porovnání mého návrhu VO s chytrými sloupy a návrhu VO Ing. Lihunové. Je vidět, že můj návrh OS (bez uvažování nabíječek elektromobilů) má větší výkon i spotřebu energie. Rozdíl ale není zas tak velký.



Obrázek 43: Porovnání VO s a bez chytrých sloupů

Obrázek 44 udává porovnání mého návrhu bez regulace a s regulací osvětlení. Z grafu vyplývá, že se hodnoty s regulací dost zmenšily. Pokud by se na řešeném parkovišti využila mnou navržená OS s mým návrhem jejího dynamického řízení, tak by došlo ke značné úspoře elektrické energie i nákladů za provoz OS. Při využití multifunkčních sloupů by vzrostla samozřejmě spotřeba elektrické energie i finanční náklady (investiční i provozní), ale vzhledem k tomu, že to nebylo cílem této práce toto posoudit, tak to zde uvedené není. Nicméně, před aplikací mého návrhu chytrého osvětlení parkoviště by bylo dobré zmíněné zhodnocení i nabíjení elektromobilů provést a porovnat například využití multifunkčních sloupů a klasických nabíječek pro elektromobily.



Obrázek 44: Porovnání navržených VO s a bez regulace

Závěr

Práce byla zaměřena na chytré a dynamické osvětlení parkoviště. V úvodu se diplomová práce věnuje charakteristice světla a základním pojmům ze světelné techniky, dále pak legislativě veřejného osvětlení, třídám osvětlení a jejich měření a požadavkům. Potom následovala kapitola o osvětlovacích soustavách, jaké obsahují komponenty, systémy a strategie řízení veřejného osvětlení a nakonec i popis dynamického systému veřejného osvětlení a jeho možného využití v České republice. Následně navazovala kapitola o chytrých, multifunkčních sloupech, jejich popis, analýza současného stavu vývoje multifunkčních sloupů a posouzení možností jejich využití zejména s ohledem na plánovaný rostoucí trend používání elektromobilů v ČR. Volně na to navázala kapitola o elektromobilech, popisu jejich využívaných baterií a způsoby jejich nabíjení.

Následující kapitola pak byla věnována návrhu regulačního schéma chytrého veřejného osvětlení na parkovišti. Jako parkoviště bylo vybráno parkoviště před budovou Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Zvolený multifunkční sloup chytrého osvětlení, který slouží i jako nabíjecí stanice pro elektromobily, byl vybrán chytrý sloup od firmy ElkoEP. Výpočtem bylo navrženo, že takových chytrých sloupů je potřeba devět na řešeném na parkovišti. Software MATLAB a jeho prostředí Simulink byl vybrán jako vhodný program pro vytvoření navrženého regulačního schéma řídícího systému provozu parkoviště, řízení OS a hlavně regulátoru nabíjení elektromobilů prostřednictvím multifunkčních sloupů. Prvním krokem bylo vytvořit schéma nabíjení elektromobilové baterie. Tento model byl následně použit k vytvoření tří konečných modelů popisovaných v této diplomové práci. První, který byl následně i ekonomicky a energeticky zhodnocen, obsahuje zdroj, tedy městskou distribuční síť 230 / 400 V, sloupy veřejného osvětlení, u kterých je umožněna regulace osvětlení podle intenzity slunečního svitu a chytré sloupy veřejného osvětlení se střídavou nabíjecí stanicí s výkonem 22 kW.

Každý sloup obsahuje vhodné signalizace a celkovou situaci parkoviště řídí centrální regulátor. Celý systém je dimenzovaný na celkový maximální možný výkon soustavy. Druhý model se liší od prvního tím, že místo sloupů veřejného osvětlení je k chytrým sloupům připojen objekt, modelovaný jako konstantní zátěž. Tento model zobrazuje omezený maximální výkon, který je omezen transformátorem, na který je celý objekt připojen. Třetí a poslední model je totožný s druhým, ovšem výkon chytrých sloupů s nabíječkou je tentokrát regulován. Regulací výkonu do nabíjecích stanic sice zmenšíme

momentální možný nabíjecí výkon, zákazník je ovšem stále připojen a nečeká, až na něj vyjde řada s nabíjením. Problémem je ale takový regulátor vytvořit, ať už z technického, tak finančního hlediska.

Mnou navržené modely by se určitě dále mohly rozšiřovat a vylepšovat. Například by se mohla navrhnout regulace proudu do baterie elektromobilu z usměrňovače a možnost nastavení přesného stálého nabíjecího proudu, výměna střídavých za stejnosměrné stanice, nebo také například vracení energie z elektromobilů zpět do sítě, tzn. využít baterie elektromobilů jako částečnou podpůrnou službu pro udržení frekvenční a napěťové stability v elektrizační soustavě.

Myslím, že je důležité modernizovat co nejvíce naše okolí. Podle mého názoru, zkombinování chytrých multifunkčních sloupů s nabíjecí stanicí pro elektromobily a chytrého veřejného osvětlení s LED světelnými zdroji se určitě v budoucnosti provede v České republice. Závisí to hlavně na vývoji elektromobilů a na stárnutí osvětlovacích soustav veřejného osvětlení, tedy je potřeba čekat do chvíle, kdy bude nutnost vystavět více nabíjecích stanic pro elektromobily a zároveň budou pořizovací náklady nových osvětlovacích soustav menší než náklady za údržbu současných osvětlovacích soustav. Pokud bude rozvoj využívání elektromobilů v ČR podle Národního akčního plánu, tak bude stále rozvíjející se infrastruktura elektrizační soustavy v ČR připravena plánované množství elektromobilů napájet. Je tedy spíše otázkou, jestli bude dostatek elektřiny v budoucnu na nabíjení elektromobilů.

Seznam literatury a informačních zdrojů

[1] LIHUNOVÁ, Natálie. *Analýza venkovního osvětlení v Plzni*. Plzeň, 2020. Dostupné také z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/40194/1/DP%20Lihunova.pdf. Diplomová. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Lenka Raková, Ph.D.

[2] VANOVICH, Andrei. *Návrh osvětlení pozemní komunikace*. Praha, 2016. Dostupné také z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/64870/F3-DP-2016-Vanovich-Andrei-Navrh_osvetleni_pozemni_komunikace.pdf?sequence=-1. Diplomová. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Petr Žák, Ph.D.

[3] *Směrnice pro veřejné zakázky a návrh veřejného osvětlení* [online]. In: SCHÄPPI, Bernd a Thomas BOGNER. Vídeň, 2017, s. 37 [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: http://www.premiumlight.cz/fileadmin/cz/pdf/CS_outdoor-cs-guidelines-2019.pdf

[4] *ČSN CEN/TR 13201-1 Osvětlení pozemních komunikací: Část 1: Návod pro výběr tříd osvětlení*. prosinec 2017.

[5] *ČSN EN 13201-2 Osvětlení pozemních komunikací: Část 2: Požadavky*. duben 2019.

[6] Barva. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Barva

[7] Svítivost. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Sv%C3%ADtivost

[8] KUSALA, Jaroslav. O vlnění: Elektromagnetické spektrum. *Radarová encyklopedie* [online]. 2008 [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://www.army.cz/images/id_8001_9000/8753/radar/k21.htm#z

[9] KUDLÁČEK, Patrik. *Modré světlo: riziko pro váš zrak nebo zbytečně přeceňovaný fenomén?* [online]. 2019 [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://www.cerva.com/clanek/modre-svetlo

[10] *Barvy světla a jejich využití v praxi* [online]. 2019 [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://www.svet-svitidel.cz/clanky-barvy-svetla-a-jejich-vyuziti-v-praxi/

[11] *Oslnění - UGR* [online]. 2021 [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: http://www.gigalighting.cz/oslneni-ugr.htm

[12] *Iluminação Pública em Espaço Urbano* [online]. 2012 [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://docplayer.com.br/69063096-Iluminacao-publica-em-espaco-urbano.html

[13] *How Does Outdoor Lighting Cause Light Pollution?* [online]. [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://www.delmarfans.com/educate/basics/lighting-pollution/

[14] *Making the city of Cardiff, Wales, both safe and smart* [online]. 2018 [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://www.interact-lighting.com/b-dam/b2b-li/en_AA/interact/case-study/cardiff/case-study-city-cardiff.pdf

[15] *Connected LED street lighting - Germany* [online]. 2018 [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://www.interact-lighting.com/en-my/case-studies/city-of-aurich

[16] *Dolní Břežany zkoušejí multifunkční „chytré“ lampy veřejného osvětlení* [online]. 2018 [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: http://www.smartcityvpraxi.cz/zajimave_projekty_210.php

[17] *INTELIGENTNÍ VEŘEJNÉ OSVĚTLENÍ* [online]. [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://smartcitypolygon.cz/project/inteligentni-verejne-osvetleni/

[18] PURKAYASTHA, Diya a Kaushik VAKADKAR. Design of Smart Pole Systems Using Internet of Things. *2019 IEEE 5th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)* [online]. IEEE, 2019, 2019 [cit. 2021-03-04]. ISBN 978-1-5386-8075-9. Dostupné z: doi:10.1109/I2CT45611.2019.9033680

[19] *Jak projektovat veřejné osvětlení* [online]. 2005 [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: http://www.artmetal-cz.com/p%C5%99edn%C3%A1%C5%A1ky/publikace/Jak%20projektovat%20VO-2005.pdf

[20] Internet of things. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Internet_of_things

[21] LoRaWAN. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/LoRaWAN

[22] LED. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/LED

[23] *The Smart Pole Revolution* [online]. 2005 [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://www.airsynergy.ie/THE-SMART-POLE-REVOLUTION/

[24] *IoT smart controller 12V 24V 6A waterproof programmable solar charge controller for street light* [online]. [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://putiandatang.en.alibaba.com/product/60809707232-807039790/IoT_smart_controller_12V_24V_6A_waterproof_programmable_solar_charge_controller_for_street_light.html

[25] *Chytrý sloup* [online]. [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://www.elkoep.cz/chytrysloup

[26] Odbor 31300. *Národní akční plán čisté mobility* [online]. 2015 [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/cz/prumysl/zpracovatelsky-prumysl/automobilovy-prumysl/narodni-akcni-plan-ciste-mobility--167456/

[27] *Automobilový průmysl: Znovuobjevení automobilu* [online]. 2019 [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cz/Documents/deloitte-analytics/Automobilovy-prumysl-znovuobjeveni-automobilu.pdf

[28] *Smart Pole Market Size, Share & Trends Report Smart Pole Market Size, Share & Trends Analysis Report* [online]. 2020 [cit. 2020-12-21]. Dostupné z: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/smart-pole-market

[29] *Häufig gestellte Fragen zu den Smart Poles* [online]. [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://www.essen.de/rathaus/connected_essen_1/connected_essen_smartpoles_faq.de.html

[30] *JET Charge has worked with Ene.Hub to bring hotspot-enabled, charge-capable light poles to Sydney's inner-west.* [online]. 2019 [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://www.caradvice.com.au/734795/smart-poles-ev-charging/

[31] *Budapest launches smart pole pilot* [online]. 2020 [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://www.luciassociation.org/budapest-smart-pole-pilot/

[32] Eletric car. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_car

[33] Elektromobil. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromobil

[34] Electric vehicle battery. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_vehicle_battery

[35] Nabíjecí stanice. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Nab%C3%ADjec%C3%AD_stanice

[36] Charging station. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Charging_station

[37] *Summary and Comparison of Battery Characteristics* [online]. [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://www.pveducation.org/pvcdrom/battery-characteristics/summary-and-comparison-of-battery-characteristics

[38] *AC / DC nabíjení* [online]. [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://www.evexpert.cz/eshop/znalostni-centrum11/ac-dc-nabijeni

[39] *Elektromobily a jejich baterie* [online]. [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://www.evexpert.cz/eshop/znalostni-centrum11/elektromobily-a-jejich-baterie

[40] *Palubní nabíječka elektromobilů* [online]. [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://www.evexpert.cz/eshop/znalostni-centrum11/palubni-nabijecka-elektromobilu

[41] *Veřejné osvětlení pro 21. století: Příručka pro města a obce* [online]. [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/prirucka-vo-21.-stoleti-efekt-2017-porsenna.pdf

[42] Nabíjení elektromobilů, zatížení sítě a řízení výkonu – část I., typy nabíjení. *TZB-info: Energetika* [online]. 16.7.2020 [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/20937-nabijeni-elektromobilu-zatizeni-site-a-rizeni-vykonu-cast-i

[43] Nabíjení elektromobilů, zatížení sítě a řízení výkonu – část II., řízení výkonu. *TZB-info: Energetika* [online]. 20.8.2020 [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/21052-nabijeni-elektromobilu-zatizeni-site-a-rizeni-vykonu-cast-ii-rizeni-vykonu

[44] Nabíjení elektromobilů, zatížení sítě a řízení výkonu – část III., zkušenosti s instalací a provozem nabíječek. *TZB-info: Energetika* [online]. 1.10.2020 [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/21208-nabijeni-elektromobilu-zatizeni-site-a-rizeni-vykonu-cast-iii-zkusenosti-s-instalaci-a-provozem-nabijecek

[45] *Why fast charging stations are good for the grid* [online]. [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: https://fastnedcharging.com/hq/why-fast-charging-stations-are-good-for-the-grid/

[46] *Shuffle* [online]. [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: https://www.schreder.com/en/products/shuffle-smart-multifunctional-column

[47] *CityPole* [online]. [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: https://comptektechnologies.com/wp-content/uploads/2018/06/CityPole_prod-cat_Spring2018-Email.pdf

[48] *Technical Code* [online]. [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: https://www.mcmc.gov.my/skmmgovmy/media/General/pdf/MCMC-MTSFB-TC-G010_2017_RNF-Smart-Pole.pdf

[49] KOPAČKA, Pavel. *Projekt parkoviště Západočeské univerzity pro rozvoj elektromobility*. Plzeň, 2019. Dostupné také z: file:///D:/Download/%C5%A1kola/2.%20ro%C4%8Dn%C3%ADk/diplomka/DP_Pavel_Kopacka.pdf. Diplomová. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Prof. Ing. Zdeněk Vostracký, DrSc., dr. h. c.

[50] *Dílčí studie pro pracovní tým A25: Predikce vývoje elektromobility v ČR* [online]. In: . 3.4.2018, s. 146 [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/narodni-akcni-plan-pro-chytre-site/2019/10/Studie-NAP-SG-A25_Elektromobilita.pdf

[51] *Chytrý sloup: konfigurátor* [online]. [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: https://www.chytrysloup.inels.cz/

Seznam příloh

Příloha A: Parametry pro výběr třídy osvětlení C

Příloha B: Současný stav napájení VO na parkovišti FEL ZČU

Příloha C: Technické parametry chytrého sloupu, světelného zdroje a svítidla

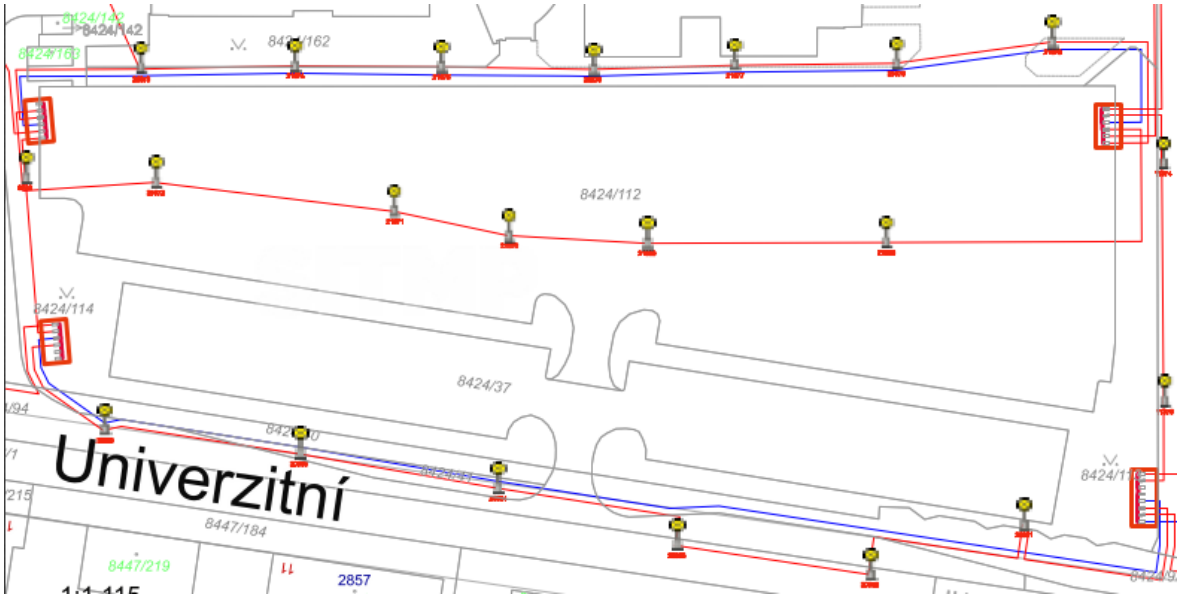
Přílohy

Příloha A: Parametry pro výběr třídy osvětlení C

Parametr	Možnosti	Popis[a]	Váhová hodnota V_w[a]
Návrhová rychlost nebo dovolená rychlost	Velmi vysoká	$v \geq 100$ km/h	3
	Vysoká	$70 < v < 100$ km/h	2
	Střední	$40 < v \leq 70$ km/h	0
	Nízká	$v \leq 40$ km/h	–1
Intenzita dopravy	Vysoká		1
	Střední		0
	Nízká		–1
Skladba dopravního proudu	Smíšená s vysokým podílem nemotorové dopravy		2
	Smíšená		1
	Pouze motorová		0
Směrově rozdělená komunikace	Ne		1
	Ano		0
Parkující vozidla	Vyskytují se		1
	Nevyskytují se		0
Jasnost okolí	Vysoká	Výlohy, reklamní plochy, sportoviště, nádražní a skladové areály	1
	Střední	Běžná situace	0
	Nízká		–1
Náročnost navigace	Vysoká		2
	Střední		1
	Nízká		0

[a] Hodnoty uvedené ve sloupci jsou příklady. Na národní úrovni lze postup výběru přizpůsobit nebo použít vhodnějších váhových hodnot.

Příloha B: Současný stav napájení VO na parkovišti FEL ZČU



Příloha C: Technické parametry chytrého sloupu, světelného zdroje a svítidla

Technické parametry		s nabíječkou	bez nabíječky
Napájecí napětí:		3x230 V AC (50/60 Hz)	1x230 V AC (50/60 Hz)
Maximální příkon:			
- nabíjecí stanice:		22 000 W / 32 A	x
- řídící elektronika		100 W	
- LED osvětlení:		80 W	
Tolerance napájecího napětí:		-15 %; +10 %	
Přepěťová ochrana			
Typ ochrany:		omezovač přepětí	
Druh svodiče přepětí:		Typ 2	
Počet pólů:		3+N	
Vybíjecí proud In (8/20) µs:		40 kA	
Max. prac. napětí:		280 V AC	
Max. úroveň ochrany při vyb. pr. :		1.4 kV	
Proudový chránič:		ANO AC, DC pro elektromobily	
Další údaje			
Pracovní teplota:		-25 až 45 °C	
Upevnění:		na betonový podstavec	
Krytí:		IP54	
Mechanická odolnost:		IK10	
Základní materiál sloupu:		ocel 11 375 ČSN	
Povrchová úprava:		pozink	
Barva:		komaxit	
Výška a hmotnost:			
CHARGER	Výška:	1305 x 460 x 400 mm	
	Hmotnost:	135 kg	
KIOSK	Výška:	2122 x 460 x 400 mm	
	Hmotnost:	195 kg	
CITY	Výška:	3786 x 460 x 400 mm	
	Hmotnost:	245 kg	
STREET	Výška:	4288 x 460 x 935 mm	
	Hmotnost:	280 kg	

Technické parametry	
Světelný tok (svítidlo):	7625 lm
Světelný tok (zdroje:):	9000 lm
Výkon svítidla:	64 W
Umístení:	jednostranně nahoře
Vzdálenost sloupů:	11 m
Montážní výška (1):	4.2 m
Výška světelného bodu:	4.153 m
Přesah (2):	0.6 m
Sklon ramene (3):	20.0 °
Délka ramene (4):	0 m

Technické parametry	
Světelný zdroj:	2x LED modul SLM 8x2 224/50H16
Výkon:	64 W
Účinnost:	až 179 lm / W
Životnost:	> 100 000 hod.
Možnost regulace:	ANO, 0-100%, předřadník DALI
Distribuce světla:	přímá
Barva - teplota chromatičnosti:	volitelná v konfigurátoru: 3 000 K / 4 000 K / 5 000 K
Index barevného podání:	Ra > 70, Ra > 80
Krytí:	IP54
Rozměr:	603 x 200 x 835 mm