

**Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta elektrotechnická**

DISERTAČNÍ PRÁCE

**Efektivní řízení TZB a obnovitelných zdrojů energie pro
bytové a komerční objekty**

Ing. Jakub Jiřinec

Plzeň, 2021



**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI**

Disertační práce

k získání akademického titulu doktor v oboru

Elektroenergetika

Ing. Jakub Jiřinec

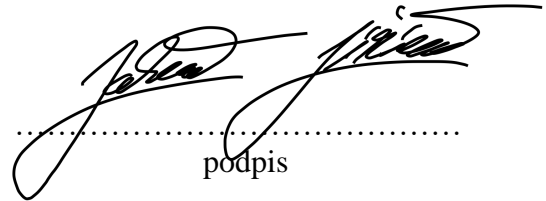
**Efektivní řízení TZB a obnovitelných zdrojů energie pro
bytové a komerční objekty**

Školitel: prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně a použil jsem prameny, které cituji a uvádím v seznamu literatury. V předložené vědecké práci jsou použity obvyklé vědecké postupy.

V Plzni, 24.3.2021



.....
podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc., Ing. Davidu Rotovi, Ph.D. a dalším kolegům z Katedry elektroenergetiky a ekologie za cenné rady a podněty, které mi umožnily vypracování této práce. Dále děkuji svým blízkým, kteří mě po celou dobu mého dosavadního studia podporovali.

Abstrakt

Disertační práce se zabývá efektivním řízením vybraných technických zařízení budov v kombinaci s fotovoltaickou elektrárnou. První část je věnována problematice rekuperačních jednotek, pro které byly navrženy a vytvořeny měřicí a řídicí systémy. Provoz těchto systémů byl následně zhodnocen a byla navržena vhodná rozšíření. Další část práce je zaměřena na možnosti optimalizace chodu tepelného čerpadla dle předpovědi venkovní teploty a výroby fotovoltaické elektrárny (FVE). V této části byly navíc uvedeny další možnosti optimalizace přebytků z FVE, například pomocí plynulého řízení odporové zátěže či řízeného nabíjení elektromobilu. V poslední části práce je řešena problematika adaptivního osvětlení s důrazem na jeho hospodárny provoz. Veškeré vytvořené měřicí a řídicí systémy byly otestovány v reálném provozu.

Klíčová slova

Technická zařízení budov (TZB), rekuperační jednotka, tepelné čerpadlo, fotovoltaická elektrárna (FVE), předpověď počasí, optimalizace chodu, úspora energie, adaptivní osvětlení, nabíjení elektromobilů

Abstract

The presented PhD dissertation deals with effective management of selected technical equipment of buildings in combination with a photovoltaic power plant. The first part is devoted to the issue of recuperation units, for which measuring and control systems were designed and created. The operation of these systems was subsequently evaluated and suitable extensions were proposed. Next part of the thesis is focused on the possibilities of optimizing the operation of the heat pump according to the forecast of the outdoor temperature and the production of the photovoltaic power plants (PV). In addition, other options for optimizing surpluses from PV plants were presented in this section, for example by means of continuous control of the resistive load or controlled charging of the electric vehicle. In final part of the thesis, the issue of adaptive lighting with emphasis on its economical operation is being solved. All created measuring and control systems were tested in real operation.

Keywords

Technical equipment of buildings, recuperation unit, heat pump, photovoltaic power plant (PV), weather forecast, optimization of operation, energy saving, adaptive lighting, electric vehicle charging

Obsah

1	ÚVOD.....	6
1.1	ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	8
1.2	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	10
1.3	METODY ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE	11
2	ŘÍZENÉ VĚTRÁNÍ A VYTÁPĚNÍ BUDOV	13
2.1	TERMODYNAMIKA VLHKÉHO VZDUCHU	14
2.1.1	<i>Základní pojmy a vztahy termodynamiky vlhkého vzduchu.....</i>	<i>14</i>
2.1.2	<i>Výpočet výkonů.....</i>	<i>18</i>
2.2	PREDIKCE VENKOVNÍ TEPLoty	20
2.2.1	<i>Off-line predikce venkovní teploty.....</i>	<i>23</i>
2.2.2	<i>Předpověď počasí – venkovní teplota.....</i>	<i>29</i>
2.3	MĚŘENÍ PARAMETRŮ REKUPERAČNÍCH JEDNOTEK	31
2.3.1	<i>Návrh měřicího systému</i>	<i>31</i>
2.3.2	<i>Testovací provoz.....</i>	<i>36</i>
2.3.3	<i>Shrnutí poznatků a přínosů.....</i>	<i>38</i>
2.4	MĚŘENÍ PARAMETRŮ PROSTŘEDÍ V UČEBNĚ S REKUPERAČNÍ JEDNOTKOU	39
2.4.1	<i>Návrh měřicího systému</i>	<i>39</i>
2.4.2	<i>Testovací provoz.....</i>	<i>44</i>
2.4.3	<i>Shrnutí poznatků a přínosů.....</i>	<i>47</i>
2.5	ŘÍZENÁ VENTILACE VNITŘNÍCH PROSTOR POMOCÍ CENTRÁLNÍ REKUPERAČNÍ JEDNOTKY	48
2.5.1	<i>Návrh systému</i>	<i>49</i>
2.5.2	<i>Popis vytvořeného programu.....</i>	<i>51</i>
2.5.3	<i>Provoz navrženého systému.....</i>	<i>54</i>
2.5.4	<i>Shrnutí poznatků a přínosů.....</i>	<i>64</i>
2.6	OPTIMALIZACE CHODU TEPELNÉHO ČERPADLA	65
2.6.1	<i>Popis systému</i>	<i>66</i>
2.6.2	<i>Testovací provoz.....</i>	<i>71</i>
2.6.3	<i>Shrnutí poznatků a přínosů.....</i>	<i>77</i>
3	OPTIMALIZACE SPOTŘEBY BUDOVY S FVE.....	78
3.1	PŘEDPOVĚĎ OSVITU A VÝKONU FVE	80
3.2	ŘÍZENÍ REKUPERAČNÍ JEDNOTKY	88
3.2.1	<i>Návrh systému</i>	<i>89</i>
3.2.2	<i>Shrnutí poznatků a přínosů.....</i>	<i>93</i>
3.3	ŘÍZENÍ TEPELNÉHO ČERPADLA	94
3.3.1	<i>Popis systému</i>	<i>95</i>
3.3.2	<i>Testovací provoz.....</i>	<i>97</i>
3.3.3	<i>Shrnutí poznatků a přínosů.....</i>	<i>98</i>
3.4	ŘÍZENÍ ODPOROVÉ ZÁTĚŽE	99
3.4.1	<i>Popis systému</i>	<i>99</i>
3.4.2	<i>Testovací provoz.....</i>	<i>100</i>
3.4.3	<i>Shrnutí poznatků a přínosů.....</i>	<i>104</i>
3.5	ŘÍZENÉ NABÍJENÍ ELEKTROMOBILŮ	105
3.5.1	<i>Popis systému</i>	<i>105</i>

3.5.2	<i>Testovací provoz</i>	107
3.5.3	<i>Shrnutí poznatků a přínosů</i>	109
4	ADAPTIVNÍ OSVĚTLENÍ	110
4.1	KOMERČNĚ POUŽÍVANÉ SYSTÉMY ADAPTIVNÍHO OSVĚTLENÍ.....	111
4.2	POPIS NAVRŽENÉHO SYSTÉMU.....	112
4.3	ZPŮSOB ŘÍZENÍ ZÓNY	114
4.4	POPIS VYTVOŘENÉHO PROGRAMU	115
4.5	TESTOVACÍ PROVOZ	116
4.6	SHRnutí POZNATKŮ A PŘÍNOSŮ	121
	ZÁVĚR	122
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	126
	SEZNAM PUBLIKACÍ A VÝSTUPŮ STUDENTA VZTAHUJÍCÍCH SE K DISERTAČNÍ PRÁCI	129
	OSTATNÍ PUBLIKACE A VÝSTUPY STUDENTA	131
	SEZNAM PŘÍLOH	133

Seznam symbolů a zkratek

Název	Značka	Jednotka
tlak syté vodní páry	p_p''	Pa
parciální tlak vodní páry	p_p	Pa
barometrický tlak vzduchu	p_b	Pa
nadmořská výška	NV	m
termodynamická teplota	T	K
teplota	ϑ	°C
teplota exteriéru	ϑ_e	°C
teplota interiéru	ϑ_i	°C
teplota odpadního vzduchu	ϑ_{11}	°C
teplota odpadního vzduchu po rekuperaci	ϑ_{12}	°C
teplota venkovního vzduchu	ϑ_{21}	°C
teplota venkovního vzduchu po rekuperaci	ϑ_{22}	°C
teplota vzduchu vstupujícího do místnosti	ϑ_{23}	°C
požadovaná teplota v místnosti	ϑ_g	°C
plynová konstanta vodní páry	r_p	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
plynová konstanta suchého vzduchu	r_v	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
absolutní vlhkost	ρ	kg.m^{-3}
hustota vodní páry	ρ_p	kg.m^{-3}
absolutní vlhkost syté vodní páry	ρ_p''	kg.m^{-3}
relativní vlhkost	φ	-
měrná vlhkost	x	kg.kg_{sv}^{-1}
hmotnost vodní páry ve vzduchu	m_p	kg
hmotnost suchého vzduchu	m_v	kg_{sv}
objemové vzduchové množství	\dot{V}	$\text{m}^3.\text{h}^{-1}$
teplota rosného bodu	t_r	°C
měrná tepelná kapacita suchého vzduchu	c_{pv}	$\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
měrná tepelná kapacita vodní páry	c_{pp}	$\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
měrná tepelná kapacita venkovního vzduchu	c_{p21}	$\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
měrná entalpie vlhkého vzduchu	h	kJ.kg^{-1}
měrná entalpie suchého vzduchu	h_v	kJ.kg^{-1}
měrná entalpie vodní páry	h_p	kJ.kg^{-1}
měrná entalpie odpadního vzduchu	h_{11}	kJ.kg^{-1}
měrná entalpie venkovního vzduchu	h_{21}	kJ.kg^{-1}
měrná entalpie venkovního vzduchu po rekuperaci	h_{22}	kJ.kg^{-1}
výparné teplo vody	I_o	kJ.kg^{-1}
hmotnostní průtok	\dot{M}	kg.h^{-1}
hmotnostní průtok venkovního vzduchu	\dot{M}_{21}	kg.h^{-1}
standardní vzduchové množství	\dot{V}_{st}	$\text{m}^3.\text{h}^{-1}$
požadovaný výkon ohřevu bez rekuperace	P_{BR}	W
požadovaný výkon ohřevu s rekuperací	P_{SR}	W
ušetřený výkon použitím rekuperace	P_U	W
termický výkon dohřevu	$P_{dohř}$	W
termický výkon rekuperátoru	P_{rek}	W
teplotní účinnost rekuperátoru	$\mu_{t, rek}$	%
entalpická účinnost rekuperátoru	$\mu_{h, rek}$	%
datový úhel	τ	°

Název	Značka	Jednotka
pořadové číslo dne	D	-
pořadové číslo měsíce	M	-
deklinace Slunce	δ	$^{\circ}$
výška Slunce nad obzorem	h_s	$^{\circ}$
zeměpisná šířka	φ_{EV}	-
časový úhel	t_s	$^{\circ}$
azimut Slunce	a	$^{\circ}$
úhel slun. paprsků na dopadající rovinu	γ	$^{\circ}$
úhel sklonu roviny	α	$^{\circ}$
azimutový úhel normály osluněné plochy	α_s	$^{\circ}$
intenzita záření na obecnou rovinu	G	W/m^2
intenzita přímého záření na ob. rovinu	G_P	W/m^2
intenzita přímého záření na kolmou plochu k paprskům	G_{Pn}	W/m^2
intenzita přímého záření na kolmou plochu k paprskům vypočtená z G_0	G_{Pnv}	W/m^2
intenzita přímého záření na vodorovnou rovinu	G_{Ph}	W/m^2
intenzita difuzního záření na ob. rovinu	G_D	W/m^2
intenzita difuzního a odraženého záření na vod. rovinu	G_{DRh}	W/m^2
intenzita difuzního a odraženého záření na obec. rovinu	G_{DR}	W/m^2
intenzita odraženého záření na ob. rovinu	G_R	W/m^2
sluneční konstanta	G_0	W/m^2
intenzita záření na vodorovnou rovinu	G_h	W/m^2
intenzita záření při NOCT	G_{NOCT}	W/m^2
součinitel podle Heindla a Kocha	ε	-
součinitel znečištění atmosféry	Z	-
účinnost FV modulů při daném osvitu a teplotě	$\eta_{FV,t}$	-
referenční účinnost FV modulu při norm. zkušebních podmínkách,	η_{ref}	-
teplotní součinitel výkonu	γ_{FV}	-
teplota FV modulu	ϑ_{FV}	$^{\circ}\text{C}$
referenční teplota FV modulu	ϑ_{ref}	$^{\circ}\text{C}$
teplota okolí při NOCT	ϑ_{NOCT}	$^{\circ}\text{C}$
plocha	A	m^2
počet panelů	n	-
účinnost FVE na DC straně	η_{DC}	-
účinnost FV měniče	η_M	-
účinnost FVE na AC straně	η_{AC}	-
pohltivost dopadajícího záření	α_{FV}	-
celkový součinitel tepelné ztráty z FV článku	U_{FV}	-
teplota článku za normálních testovacích podmínek	$NOCT$	$^{\circ}\text{C}$
projektovaná tepelná ztráta	Φ	W
výpočtová teplota venkovní	ϑ_{ev}	$^{\circ}\text{C}$
výpočtová teplota vnitřní	ϑ_{iv}	$^{\circ}\text{C}$
měrná tepelná ztráta	H	W/K
elektrické napětí	U	V
elektrický proud	I	A
elektrický činný výkon	P	W
elektrický jalový výkon	Q	VA_r
elektrický zdánlivý výkon	S	VA
celkové harmonické zkreslení napětí	$THD U$	%
celkové harmonické zkreslení proudu	$THD I$	%

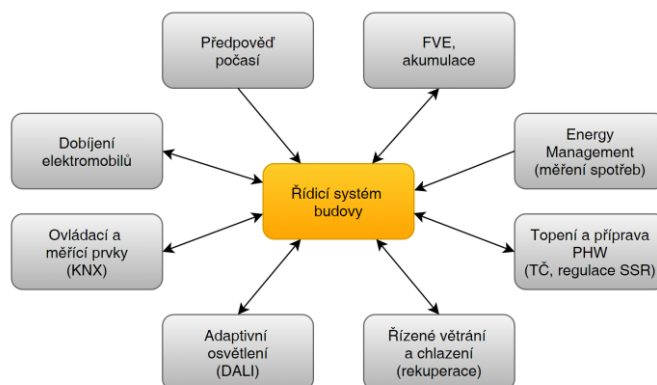
Název	Značka	Jednotka
činná energie	E_c	Wh
žalová energie	E_j	VArh
tepelná energie	E_T	Wh
účinník	$\cos f$	-
frekvence	f	Hz
oxid uhličitý	CO_2	-
koncentrace částic na jeden milion	ppm	-
intenzita záření při NOCT	G_{NOCT}	W/m^2
Koeficient úpravy tepelné ztráty	k	-
aktuální osvětlenost	E_{akt}	lx
požadovaná osvětlenost	E_{poz}	lx
hystereze osvětlenosti	H	lx
požadovaný procentuální výkon svítidla	P_{poz}	%
aktuální procentuální výkon svítidla	P_{akt}	%
zapínací procentuální výkon svítidla	P_{zap}	%
oxid uhličitý	CO_2	
universal seriál bus	USB	
programovatelný logický kontrolér	PLC	
osobní počítač	PC	
Application Programming Interface	API	
fotovoltaický	FV	
fotovoltaická elektrárna	FVE	
teplá užitková voda	PHW	
akumulační nádoba otopné vody	AKU	
tepelné čerpadlo	$TČ$	
solid state relé	SSR	
pulzně šířková modulace	PWM	
obnovitelné zdroje energie	OZE	
technická zařízení budov	TZB	
topný faktor tepelného čerpadla	COP	
distribuční soustava	DS	
měření a regulace	MaR	
Digital Addressable Lighting Interface	$DALI$	
standard pro automatizaci budov	KNX	
stejnsměrný elektrický proud	DC	
střídavý elektrický proud	AC	
vytápění, ventilace a chlazení	$HVAC$	
Model Predictive Control	MPC	
File Transfer Protocol	FTP	
hloubka vybití baterií	DoD	
čidlo teploty	ST	
čidlo relativní vlhkosti	RH	
čidlo prašnosti	PM	
okenní magnetický kontakt	KO	
dveřní magnetický kontakt	KD	
čidlo přítomnosti	PS	
elektrický dohřev	ED	
třícestný ventil	SV	
termostatický směšovací ventil	TSV	
elektrické vozidlo	EV	

1 Úvod

Efektivní řízení technických zařízení budov (TZB) v kombinaci s obnovitelnými zdroji energie v bytové a komerční výstavbě je v současné době hojně diskutovaným tématem. Pojem TZB zahrnuje celou řadu odvětví. Obecně lze říci, že se jedná o zařízení, která ovlivňují chod budovy (topení, vzduchotechnika, elektrické rozvody, osvětlení atd.). Dnešní snahou je optimalizovat chod těchto zařízení tak, aby bylo dosaženo požadovaných parametrů vnitřního prostředí budovy při minimálních provozních nákladech a maximálním využití vyrobené elektrické energie z obnovitelných zdrojů.

Díky poznatkům, které jsem získal v rámci studia, přípravy projektů, jejich realizace a jejich následném vyhodnocení, jsem dospěl k vlastnímu řešení dané problematiky, kde jsem kladl důraz zejména na propojení dílčích systémů mezi sebou tak, aby byla dosažena požadovaná úroveň komfortu při minimalizaci provozních nákladů. V disertační práci jsem se snažil, abych své návrhy vždy maximálně otestoval v praxi při reálném provozu, protože simulovat chování objektu je poměrně složité a do systému vstupuje celá řada proměnných, které výrazně ovlivňují chování dílčích částí systému.

Z důvodu integrace a vzájemného propojení jednotlivých částí, bylo nezbytné danou problematiku rozebrat poměrně ze široka a pro dané oblasti vytvořit dílčí řídicí systémy s požadovanými funkcemi. Díky tomu, že celkový navržený systém zahrnuje propojení různých zařízení a jejich vzájemnou kooperaci, je možné zvýšit efektivitu celého systému, snížit provozní náklady a vzhledem k použitému hardwaru snížit pořizovací náklady na celý systém regulace (na jedné hardwarové platformě se nachází celé řízení objektu). Ve své práci jsem se zaměřil na oblasti, které považuji za důležité a jejichž provoz mezi sebou poměrně zásadně souvisí (Obr. 1.1), pokud chci snížit provozní náklady objektu. V mém případě se jedná především o oblast vytápění, rekuperace, osvětlení a efektivní využití vyrobené elektrické energie.



Obr. 1.1 Jednotlivé části řídicího systému budovy

V úvodní kapitole jsem uvedl základní vztahy pro termodynamiku vlhkého vzduchu a popsal způsob využití predikce venkovní teploty, které jsem v rámci své práce používal. V další části kapitoly jsem se zabýval převážně rekuperačními jednotkami (měření, optimalizace chodu), které jsou v dnešní době nezbytnou součástí instalací, jak u komerčních, tak bytových projektů. Díky tomu jsem si vyzkoušel jejich chování v reálném provozu a možnosti optimalizace jejich chodu. Efektivita provozu zařízení, jako jsou rekuperační jednotky či tepelná čerpadla vzduch-voda, značně závisí na venkovní teplotě. Z tohoto důvodu jsem se snažil do algoritmu provozu integrovat předpověď venkovní teploty a díky tomu optimalizovat chod těchto zařízení.

V dnešní době dochází k poměrně masivnímu nárůstu instalací fotovoltaických elektráren (FVE) jak v komerčních, tak i bytových objektech. Zakomponování FVE do systému měření a regulace (MaR) je dnes velice potřebné z důvodu maximalizace využití vyrobené elektrické energie v rámci daného objektu. Vzájemná spolupráce mezi zdrojem elektrické energie (FVE) a spotřebiči (rekuperační jednotka, TČ, spojité řízení odporových spotřebičů, bazénová technologie atd.) může potom vytvořit kompaktní celek, který sníží provozní náklady objektu. V rámci svých návrhů jsem vycházel z funkcí komerčně dostupných zařízení, které jsem rozšířil o další funkčnosti vycházející z mých zkušeností. Díky tomu jsem vytvořil dílčí části systému, které jsou schopny například optimalizovat chod tepelného čerpadla v závislosti na předpokládané výrobě z FVE či přetoku elektrické energie, najít ideální interval pro přípravu teplé užitkové vody (PHW) a rozvrhnout dílčí chod jednotlivých spotřebičů v průběhu dne. V současné době dochází k značnému rozvoji elektromobility a proto jsem do svého návrhu systému zakomponoval i možnosti integrace a optimalizace nabíjení elektromobilů v návaznosti na výrobu FVE.

Další oblastí, která výraznou měrou vstupuje do spotřeby elektrické energie, je oblast osvětlení. Proto jsem vytvořil vlastní systém adaptivního osvětlení s řadou inovativních funkcí vedoucích k dalšímu výraznému snížení spotřeby elektrické energie v rámci objektu.

Vzhledem k tomu, že jsem jednotlivé části řídicího systému vytvořil od začátku sám, je možné z nich vytvořit jeden funkční celek, který umožňuje efektivní kooperaci jednotlivých dílčích částí. Díky tomu je možné zvýšit uživatelský komfort, snížit provozní náklady objektu a zvýšit využití vyrobené elektrické energie z obnovitelných zdrojů (v našem případě FVE).

1.1 Analýza současného stavu poznání

V objektech je velká část elektrické energie spotřebována na vytápění, ventilaci a chlazení (HVAC) či osvětlení. Proto je zde velká snaha tyto náklady značně redukovat, jak z pohledu úspory elektrické energie, tak z pohledu snížení dopadu na životní prostředí. V České republice míru automatizace v budovách hodnotí norma ČSN EN 15232-1 Vliv automatizace, řízení a správy budov [24].

V současné době se problematikou regulace TZB v kombinaci s obnovitelnými zdroji energie zabývá celá řada renomovaných pracovišť a firem v České republice i zahraničí. Ve většině případů jsou jednotlivé systémy vyvíjeny separátně různými institucemi či soukromými společnostmi. Propojení těchto systémů v jeden funkční celek je často velmi komplikované či technicky náročné.

Pro větší objekty je vhodné vytvořit přesný termodynamický model budovy, který je schopen popsat reálné chování objektu v kombinaci s MPC (Model Predictive Control) regulátorem. Problematikou MPC se zabývají například tyto publikace [14-17]. Vytvořit kvalitní model je však poměrně časově a finančně náročné. To limituje jeho masivnější rozšíření pro menší objekty, na které jsem se ve své práci zaměřil.

Rekuperační jednotky pro rozsáhlé objekty se často začleňují do řídicího systému budov. Díky tomu může být jejich chod optimalizován i v návaznosti na predikci venkovní teploty či osvětlení. Pro menší objekty se však převážně využívá vlastní řídicí jednotka rekuperace, která má omezené možnosti nastavení a její chod není nijak optimalizován z hlediska budoucího vývoje venkovní teploty či osvětlení (z důvodu integrace FVE). Systémy zpravidla fungují zcela autonomně tak, aby dodržely požadované parametry vnitřního prostředí [32, 40]. Nicméně velice často v reálném provozu nevyužívají svůj potenciál a jsou spínána (používána) v nevhodných intervalech, kdy jsou jejich provozní náklady vyšší, než by ve skutečnosti mohly být.

Někteří výrobci tepelných čerpadel vzduch-voda již pracují s předpovědí počasí (teploty), ale pouze v omezené míře. Jedná se například o společnost NIBE [34]. Kombinaci predikce teploty, osvětlení, optimalizaci ohřevu PHW a on-line výpočtu tepelné ztráty objektu v řízení tepelných čerpadel žádné komerčně dostupné tepelné čerpadlo nepoužívá. Problematikou řízení tepelného čerpadla v závislosti na teplotě se zabývají například tyto publikace [18, 21].

Regulaci tepelných čerpadel vzduch-voda v závislosti na aktuální výrobě elektrické energie z FVE v České republice používá několik výrobců [36]. Zpravidla se ale jedná

o řízení otáček kompresoru (u tepelných čerpadel s dvojitým rotačním kompresorem) pomocí analogového signálu na základě přetoku elektrické energie či o spínání beznapětového kontaktu pro ovládání tepelného čerpadla. Pro regulaci přebytků z FVE pomocí plynulé regulace výkonu lze použít například systém Wattrouter [37] či BreenBonO [38]. Plynulá regulace výkonu se používá např. pro ohřev PHW či otopné vody v kombinaci s akumulací nádržemi. Toto řešení je vhodné především pro rodinné domy či menší objekty (jednoduchá instalace a příznivá cena). Nicméně u areálů, kde je potřeba spojitě řídit výkon do odporové zátěže v rámci několika objektů, či umístit měřicí modul od řídicího modulu ve větší vzdálenosti, není možné tato řešení aplikovat. Pro tyto aplikace je nutné použít sofistikovanější řešení, které ovšem vyžaduje naprogramování řídicího systému dle potřeb daného objektu [39].

Další možností akumulace vyrobené elektrické energie z obnovitelných zdrojů je využití řízeného nabíjení elektromobilů, které se budou v následujících letech stále výrazněji podílet na spotřebě elektrické energie v budovách [22, 23].

Systémů zabývajících se adaptivním osvětlením je opět na trhu celá řada. Zpravidla se jedná o systémy, které jsou vyvinuty přímo výrobcem hardwaru a jedná se o kompaktní řešení do jejíž struktury se může více či méně zasahovat. Systémy adaptivního osvětlení jsou nejčastěji založeny na sběrnici DALI (Digital Addressable Lighting Interface) a jsou koncipovány tak, aby byly co nejvíce variabilní a umožnily použití pro co největší spektrum zákazníků. Jedná se například o systém WAGO Lighting Management [33] či řešení od firmy FOXTRON [42]. V rámci používání standardních řešení jsem narazil na celou řadu vlastností, které tyto systémy pro mnou navržené aplikace limitovaly. Jednalo se zejména o důraz na úspory energií při vypnutém svítidle (odpínání napájení driverů svítidel) či omezenou možnost úpravy způsobu řízení zón.

1.2 Cíle disertační práce

Hlavním cílem této disertační práce je posouzení stávajících možností řízení rekuperačních jednotek, tepelných čerpadel, umělé osvětlovací soustavy, výroby elektrické energie z FVE, nabíjení elektromobilů a spotřeby elektrické energie, a na základě zjištěných poznatků navrhnout řídicí systémy pro tyto jednotlivé části systému TZB, které by bylo možno propojit do jednoho komplexního řídicího systému. Vzhledem k rozsahu a náročnosti vytvoření komplexního řídicího systému a zejména k jeho nesnadné verifikaci v praxi, je tato práce zaměřena pouze na jednotlivé řídicí systémy, které je možné posléze propojit mezi sebou.

K dosažení hlavního **cíle disertační práce** je potřeba splnit dílčí cíle disertační práce, které jsem shrnul do následujících bodů:

- a) Vytvořit spolehlivý systém predikce teploty s ohledem na budoucí využití v TZB (rekuperační jednotky, tepelná čerpadla vzduch-voda) – off-line predikce teploty a předpověď počasí.
- b) Vytvořit spolehlivý systém predikce výroby elektrické energie z FVE pro různé konfigurace systému TZB (napájení elektromobilů, různý charakter zátěže, řízený provoz tepelného čerpadla či rekuperační jednotky).
- c) Zhodnotit chod a způsob řízení rekuperačních jednotek (získat hlubší představu o chování zařízení).
- d) Vytvořit řídicí systém pro optimalizaci chodu tepelného čerpadla, který by umožňoval implementaci poznatků z bodu a) a b).
- e) Vytvořit systém pro optimalizaci spotřeby energie v objektu s FVE.
- f) Vytvořit systém řízení pro adaptivní osvětlení, který by umožňoval snížit provozní náklady v porovnání s ostatními (dostupnými) systémy.

Nejvýznamnější pracovní hypotézy disertační práce jsem shrnul do následujících bodů:

- a) U zařízení jako je rekuperační jednotka nebo tepelné čerpadlo (vzduch-voda) bude ve většině případů dostačující využít off-line predikce venkovní teploty.
- b) Správně zvolená rekuperační jednotka umožní udržet koncentraci CO₂ ve stanoveném limitu při nízkých provozních nákladech.
- c) Predikce venkovní teploty a výroby FVE umožní u tepelného čerpadla vzduch-voda výrazně snížit jeho provozní náklady.

- d) Vyrobenou elektrickou energii z FVE lze v místě spotřeby plynule akumulovat v bateriích elektromobilu.
- e) Běžně dostupné systémy adaptivního osvětlení nepracují s odpínáním driverů svítidel v době jejich nečinnosti.

1.3 Metody řešení disertační práce

V rámci řešení disertační práce jsem využil různé vědecké metody zkoumání. Při řešení jednotlivých bodů disertační práce jsem použil především logické metody zkoumání. Stěžejním bodem byly poznatky získané k dané problematice v odborné literatuře či publikacích. Jako neméně důležité považuji poznatky, které jsem získal v technické praxi, které mi umožnily získat mnoho cenných informací z reálného provozu a tyto poznatky následně aplikovat při tvorbě disertační práce.

První část disertační práce je věnována úvodu do problematiky termodynamiky vlhkého vzduchu, která je důležitá pro výpočtový software. Dále obsahuje predikci venkovní teploty v tzv. off-line režimu, která umožní vytvořit teplotní profily na základě údajů z předchozích let (vytvořeno v programu Wolfram Mathematica) [44]. Pro předpověď venkovní teploty byla použita předpověď počasí ze dvou nezávislých zdrojů [41, 43].

Další část disertační práce je věnována problematice řízeného větrání a vytápění budov. V této části jsem se zaměřil především na problematiku zařízení, jejichž provozní náklady jsou značně závislé na venkovní teplotě. Jedná se především o rekuperační jednotky a tepelná čerpadla vzduch-voda. V rámci této kapitoly jsem vytvořil systém pro sběr a analýzu provozních parametrů rekuperační jednotky (LabView [30], UNI-PRO 3), systém pro sběr dat z decentrální rekuperační jednotky (LabView) a systém pro řízení centrální rekuperační jednotky v programovacím prostředí e!COCKPIT [33], kde jsem si mohl vyzkoušet dílčí úpravy s ohledem na spotřebu elektrické energie a udržení požadovaných parametrů prostředí. Další část je věnována prediktivnímu řízení tepelného čerpadla, kde jsem využil poznatky z první kapitoly týkající se předpovědi teploty. Vytvořený systém prediktivního řízení (e!COCKPIT) umí na základě předpovědi počasí analyticky určit tepelnou ztrátu objektu, určit vhodné topné intervaly dle výkonu tepelného čerpadla a optimalizovat ohřev PHW. Veškerý vytvořený software jsem se snažil otestovat v reálném provozu tak, aby ho bylo možné nasadit bez větších problémů do komerčního provozu.

Následně jsem se zaměřil na optimalizaci spotřeby budovy s FVE, kde jsem navázal na předchozí kapitoly týkající se optimalizace chodu rekuperační jednotky a tepelného

čerpadla vzduch-voda. V rámci této kapitoly jsem rozšířil řídicí software o část, která zahrnuje predikci výroby FVE na základě předpovědi osvitů z PVForecast (e!COCKPIT). Předpověď osvitů pro danou lokalitu byla použita na základě PV Forecast od UCEEB [41]. Detailní simulace výroby FVE byla provedena v software PVSol [45]. Díky předpovědi osvitů a měření aktuální výroby FVE, je možné rozložit chod rekuperační jednotky či tepelného čerpadla do oblastí s největším osvitem, a zvýšit tak vlastní spotřebu v době, kdy je předpokládána největší výroba FVE. Systém je dále doplněn o plynulé řízení přebytků do PHW, či otopného systému a optimalizované nabíjení elektromobilu s ohledem na aktuální výrobu (využití) FVE.

Poslední kapitola je věnována problematice adaptivního osvětlení, kde jsem vytvořil kompletní systém pro řízení osvětlovacích soustav v software e!COCKPIT s důrazem na jeho hospodárný chod. Tento systém je již uveden do praxe a proběhlo jeho první nasazení v prostorách jídelny Technické univerzity v Mnichově.

V rámci zkoumané problematiky jsem vytvořil celou řadu programů pro průmyslová PLC v programovacím prostředí e!COCKPIT zejména z důvodu nasazení do reálného provozu.

2 Řízené větrání a vytápění budov

V úvodní části této kapitoly jsou uvedeny základní vztahy problematiky vlhkého vzduchu, které jsem ve své práci využíval. Tyto vztahy byly použity zejména v kapitole 2.3, která se věnuje vyhodnocování provozu rekuperačních jednotek při jejich vývoji a optimalizaci. Dále jsou uvedeny možnosti predikce venkovní teploty, kterou jsem ve své práci hojně využíval.

V minulosti byl kladen důraz zejména na snižování energetické náročnosti zateplením obvodového pláště budovy a výměnou oken. To často způsobí, při nedostatečném větrání budovy okny, zhoršení kvality vzduchu uvnitř budovy. Pro zajištění požadované kvality vzduchu je vhodné objekty vybavit systémem nucené ventilace vzduchu. V ideálním případě by se mělo jednat o zařízení s rekuperací vzduchu, které umožní hospodárnější chod celého systému. Hospodárnost provozu rekuperační jednotky primárně závisí na použité technologii, konstrukci a řídicím systému.

V průběhu vývoje rekuperačních jednotek je nezbytné provádět kontrolní měření a simulovat jejich provozní stavy. Díky tomu je již při vývoji jednotek možné provést příslušné optimalizace s ohledem na hospodárnost jejich provozu. V rámci spolupráce s firmou Südluft Systemtechnik jsem vytvořil specializovaný měřicí software, který byl za tímto účelem vytvořen. Komerčně dostupná řešení byla pro danou aplikaci nevyhovující.

Obecně lze rekuperační jednotky rozdělit na centrální a decentrální. V rámci své práce jsem se zabýval oběma druhy těchto jednotek. Nejprve jsem se zaměřil na to, jakým způsobem decentrální rekuperační jednotka může ovlivnit kvalitu vnitřního prostředí v místnosti (v mém případě učeben). Pro tuto aplikaci jsem navrhnul a vytvořil měřicí systém, který slouží k vyhodnocení kvality vzduchu vnitřního prostředí a hospodárnosti chodu rekuperační jednotky.

Následně jsem se zaměřil na problematiku řízení centrální rekuperační jednotky v rámci školní budovy. Navržený systém zahrnuje přímé řízení rekuperační jednotky, řízení rekuperačních klapek a otopných těles v jednotlivých místnostech. Díky získaným informacím z reálného provozu byla do systému řízení implementována předpověď venkovní teploty, která umožňuje optimalizovat zejména noční ochlazování budovy.

Na závěr této kapitoly jsem se věnoval optimalizaci chodu tepelného čerpadla vzduch-voda, jehož účinnost je závislá na venkovní teplotě. V rámci této kapitoly byla využívána predikce venkovní teploty, která umožňuje snížit provozní náklady na chod tepelného čerpadla.

2.1 Termodynamika vlhkého vzduchu

2.1.1 Základní pojmy a vztahy termodynamiky vlhkého vzduchu

Vzhledem k tomu, že jsem se v této práci do značné míry zabýval problematikou ventilačních a rekuperačních jednotek a vytvořil měřicí systémy pro vyhodnocování jejich provozních stavů, jsou v této kapitole stručně popsány základní vztahy termodynamiky vlhkého vzduchu, které jsou použity ve výpočtech v následujících kapitolách. Pro tuto kapitolu byly použity zdroje [1, 2, 3, 6, 24, 25].

Tlak syté vodní páry

Zvětšováním množství vodní páry ve vzduchu se zvyšuje i její parciální tlak p_p na úkor tlaku suchého vzduchu p_v (protože celkový barometrický tlak je konstantní), ale jen do hodnoty p_p'' , která odpovídá tlaku syté vodní páry při teplotě atmosférického vzduchu ϑ . V případě, že se při dosažení maximálního tlaku p_p'' přidá do vzduchu další množství vodní páry (při konstantní teplotě), vysráží se a setrvá ve vzduchu v podobě mlhy ($\vartheta > 0$ °C) nebo jinovatky ($\vartheta < 0$ °C). Tlak se přidáním vodní páry již nezvětší. Tlak syté vodní páry nad vodní hladinou závisí na teplotě a může být stanoven dle následujícího vztahu (při teplotě od 0 °C do 80 °C).

$$p_p'' = \exp\left(23,58 - \frac{4044,6}{235,628 + \vartheta}\right) \quad (Pa) \quad (2.1.1)$$

Vodní pára se může mísit v libovolném poměru se vzduchem pouze při teplotě větší, než je výparná teplota při daném tlaku (při $\vartheta > 100$ °C a $p_b = 101$ Pa). Nachází se poté v přehřátém stavu a nemůže tedy zkondenzovat.

Parciální tlak vodní páry

Parciální tlak vodní páry je úměrný množství vodních molekul obsažených ve vzduchu a je způsobený jejich tlakem. Pokud ve vzduchu nejsou obsaženy žádné vodní páry, je parciální tlak vodní páry $p_p = 0$ Pa. Se zvyšujícím počtem molekul vodní páry vzrůstá i parciální tlak vodní páry až do maximální hodnoty $p_p = p_p''$. Parciální tlak vodní páry lze vypočítat z relativní vlhkosti a tlaku syté vodní páry dle rovnice (2.1.2), nebo pomocí barometrického tlaku a měrné vlhkosti dle vztahu (2.1.3).

$$p_p = \frac{\varphi}{100} p_p'' \quad (Pa) \quad (2.1.2)$$

$$p_p = \frac{x p_b}{0,622 + x} \quad (Pa) \quad (2.1.3)$$

Barometrický tlak vzduchu dle nadmořské výšky

Se zvyšující se nadmořskou výškou NV barometrický tlak klesá. Barometrický tlak v určité nadmořské výšce se vypočítá dle vztahu (2.1.4). Konstanta 101 325 Pa představuje průměrný barometrický tlak na hladině moře.

$$p_b = 101\,325 \frac{16000 - \Delta NV}{16000 + \Delta NV} \quad (Pa) \quad (2.1.4)$$

Absolutní vlhkost

Vyjadřuje hmotnost vodní páry (kg), která se nachází v 1m^3 objemu bez ohledu na přítomnost vzduchu. Dá se říci, že je to hustota vodní páry. Při známé teplotě a parciálním tlaku vodní páry ji lze určit ze stavové rovnice vodní páry (2.1.5). Dosazením měrné plynové konstanty vodní páry $r_p = 461,5 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ a převodem teploty na termodynamickou dostáváme rovnici (2.1.6).

$$\rho = \frac{p_p}{T r_p} \quad \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \quad (2.1.5)$$

$$\rho = \frac{p_p}{(\vartheta + 273,15) \cdot 461,5} \quad \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \quad (2.1.6)$$

Relativní vlhkost

Vyjadřuje míru nasycení vzduchu vodní parou. Je definována podílem hustoty vodní páry ve vzduchu a její maximální možné hustoty při stejné teplotě (2.1.7). V praxi se relativní vlhkost vzduchu určuje podílem parciálního tlaku vodní páry a tlaku syté vodní páry při konstantní teplotě (2.1.8).

$$\varphi = \frac{\rho_p}{\rho_p''} \quad (-) \quad (2.1.7)$$

$$\varphi = \frac{\frac{p_p}{r_p T}}{\frac{p_p''}{r_p T}} = \frac{p_p}{p_p''} \quad (-) \quad (2.1.8)$$

Měrná vlhkost

Vyjadřuje hmotnost vodní páry ve vzduchu na 1 kg suchého vzduchu. Veličina je využívána pro přesnou kvantifikaci množství vodní páry a je vhodná pro výpočty spojené s úpravou vlhkosti vzduchu. Pokud do rovnice (2.1.9) dosadíme hodnotu plynové konstanty suchého vzduchu $r_v = 287,11 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, hodnotu plynové konstanty vodní páry $r_p = 461,5 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, za parciální tlak vodní páry a suchého vzduchu výrazy $p_p = \varphi p_p''$ a $p_v = p_b - p_p$, dostaneme výraz (2.1.10).

$$x = \frac{m_p}{m_v} = \frac{\frac{p_p V}{r_p T}}{\frac{p_v V}{r_v T}} = \frac{\rho_p}{\rho_v} = \frac{r_v p_p}{r_p p_v} \left(\frac{kg}{kg_{sv}} \right) \quad (2.1.9)$$

$$x = 0,622 \frac{p_p}{p_b - p_p} = 0,622 \frac{\varphi p_p''}{p_b - \varphi p_p''} \left(\frac{kg}{kg_{sv}} \right) \quad (2.1.10)$$

Teplota rosného bodu

Teplota rosného bodu představuje teplotu, při které vodní pára při ochlazování vzduchu za stálého tlaku dosáhne stavu sytosti. Na odmaštěném povrchu se při teplotě rosného bodu začne tvořit rosa a vlhký vzduch je nasycený. Parciální tlak vodní páry se při této teplotě rovná tlaku syté vodní páry.

$$\vartheta_r = \frac{4044,6}{23,58 - \ln(p_p)} - 235,6 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (2.1.11)$$

Měrná entalpie vlhkého vzduchu

Je dána součtem entalpie suchého vzduchu a entalpie vodní páry a vztahuje se na 1 kg suchého vzduchu. Dle mezinárodně uznávaného pravidla je hodnota entalpií při 0 °C ($T_0=273,15 \text{ K}$) $h_{v(0^\circ\text{C})} = 0$ a $h_{p(0^\circ\text{C})} = 0$.

$$h = h_v + x h_p \left(\frac{kJ}{kg_{sv}} \right) \quad (2.1.12)$$

Měrná entalpie suchého vzduchu

Entalpie suchého vzduchu se stanoví jako součin měrné tepelné kapacity suchého vzduchu a teploty. V teplotním rozsahu -30 až 100 °C lze uvažovat hodnotu $c_{pv} = 1,004 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

$$h_v = c_{pv} (T - T_0) = 1,004 (T - 273,15) \left(\frac{kJ}{kg_{sv}} \right) \quad (2.1.13)$$

Měrná entalpie vodní páry

Entalpie vodní páry je závislá na teplotě a tlaku. Pro oblast větrání a klimatizace (do teploty 90 °C a tlaku 10 kPa) ji lze vyjádřit jako lineární závislost teploty (2.1.14). Dosazením výparného tepla vody $I_0 = 2500 \text{ kJ.kg}^{-1}$ a měrné tepelné kapacity vodní páry $c_{pp} = 1,840 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ dostáváme vztah (2.1.15).

$$h_p = I_0 + c_{pp} (T - T_0) \left(\frac{kJ}{kg_{sv}} \right) \quad (2.1.14)$$

$$h_p = 2500 + 1,840 (T - 273,15) \left(\frac{kJ}{kg_{sv}} \right) \quad (2.1.15)$$

Hustota vlhkého vzduchu

Udává celkovou hustotu vzduchu včetně vodní páry, která je ve vzduchu obsažena.

$$\rho = \frac{p_b}{r T} = \frac{p_b}{T} \frac{1+x}{r_v + x r_p} = \frac{p_b}{r_p T} \frac{1+x}{0,622+x} \quad \left(\frac{kg}{m^3} \right) \quad (2.1.16)$$

Hmotnostní průtok

Jako hmotnostní průtok se označuje hmotnost vzduchu, který za jednotku času projde průtočným průřezem v určitém systému. Hmotnostní průtok vzduchu je násobkem hustoty vlhkého vzduchu a objemového vzduchového množství \dot{V} (m³/h).

$$\dot{M} = \rho \dot{V} \quad \left(\frac{kg}{h} \right) \quad (2.1.17)$$

Standardní objemové vzduchové množství

Standardní vzduchové množství se stanoví jako přepočtení objemového vzduchového množství na předem definované hodnoty barometrického tlaku při mořské hladině 101,325 kPa a teplotě 20 °C.

$$\dot{V}_{st} = \dot{V} \frac{p_b 293,15}{(\vartheta + 273,15) p_n} = \dot{V} \frac{p_b 293,15}{(\vartheta + 273,15) 101325} \quad \left(\frac{m^3}{h} \right) \quad (2.1.18)$$

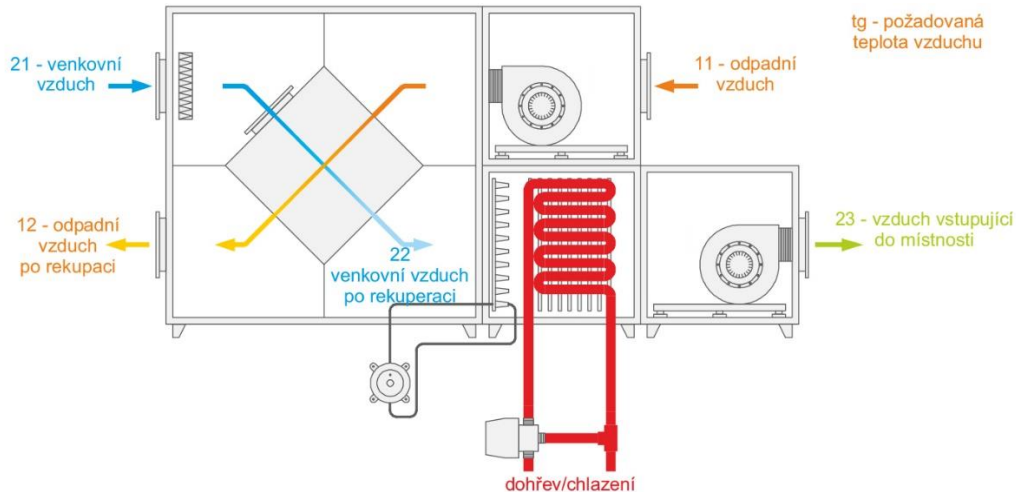
Měrná tepelná kapacita vlhkého vzduchu

Měrná tepelná kapacita udává teplo, které přijme nebo odevzdá těleso z dané látky o hmotnosti 1 kg při zahřátí o 1 °C.

$$c_p = \frac{c_{pv} + c_{pp} x}{1+x} = \frac{1,004 + 1,84 x}{1+x} \quad \left(\frac{J}{kg K} \right) \quad (2.1.19)$$

2.1.2 Výpočet výkonů

Pro stanovení úspor energií a pro celkový přehled o rekuperačním zařízení je nutné vypočítat výkony v jednotlivých částech zařízení. Tyto výkony se počítají z kalorimetrické rovnice, kde se za hmotnost dosazuje hmotnostní průtok \dot{M}_{21} v m^3/s . Na Obr. 2.1 zobrazeno schéma jednoduché rekuperační jednotky s přehřevem/chlazením.



Obr. 2.1 Schéma rekuperační jednotky

Požadovaný výkon ohřevu bez rekuperace

Představuje výkon, který by bylo nutné dodat na ohřátí přívodního venkovního vzduchu z venkovní teploty ϑ_{21} na požadovanou teplotu v místnosti t_g .

$$P_{BR} = \dot{M}_{21} c_{p21} (\vartheta_g - \vartheta_{21}) \quad (W) \quad (2.1.20)$$

Požadovaný výkon dohřevu s rekuperací

Udává výkon, který je nutný dodat na dohřátí venkovního vzduchu po rekuperaci ϑ_{22} na požadovanou teplotu v místnosti ϑ_g .

$$P_{SR} = \dot{M}_{21} c_{p21} (\vartheta_g - \vartheta_{22}) \quad (W) \quad (2.1.21)$$

Ušetřený výkon použitím rekuperace

Ušetřený výkon při použité rekuperace tepla je dán rozdílem požadovaného výkonu ohřevu bez rekuperace a požadovaného výkonu dohřevu vzduchu po rekuperaci.

$$P_U = P_{BR} - P_{SR} \quad (W) \quad (2.1.22)$$

Termický výkon dohřevu

Termický výkon dohřevu udává, jaký výkon bylo nutné dodat na dohřátí vzduchu z teploty po rekuperaci ϑ_{22} na teplotu vyfukovaného vzduchu do místnosti ϑ_{23} .

$$P_{dohř} = \dot{M}_{21} c_{p21} (\vartheta_{23} - \vartheta_{22}) \quad (W) \quad (2.1.23)$$

Termický výkon rekuperátoru

Představuje výkon, který je dodáván v rekuperátoru nasávanému venkovnímu vzduchu o vstupní teplotě ϑ_{21} , aby bylo možné na výstupu z rekuperátoru dosáhnout teploty ϑ_{22} . Jedná se tedy o výkon, který jsme schopni ušetřit při použití rekuperačního zařízení. Uvedený vztah (2.1.24) lze použít pouze u rekuperátorů, které nepřenáší vlhkost.

$$P_{rek} = \dot{M}_{21} c_{p21} (\vartheta_{22} - \vartheta_{21}) \quad (W) \quad (2.1.24)$$

Teplotní účinnost rekuperátoru

Za předpokladu stejných hmotnostních průtoků vzduchu nasávanou a odtahovanou větví, který je splněn při rovnotlakém větrání, je možné stanovit teplotní účinnost rekuperátoru ze vztahu (2.1.25). Tento výpočet účinnosti lze použít při ohřevu vzduchu a jeho ochlazování bez vzniku kondenzace. Jedná se tedy pouze o změnu teploty vzduchu (citelného tepla).

$$\mu_{t_rek} = \frac{\vartheta_{22} - \vartheta_{21}}{\vartheta_{11} - \vartheta_{21}} 100 \quad (\%) \quad (2.1.25)$$

Entalpická účinnost rekuperátoru

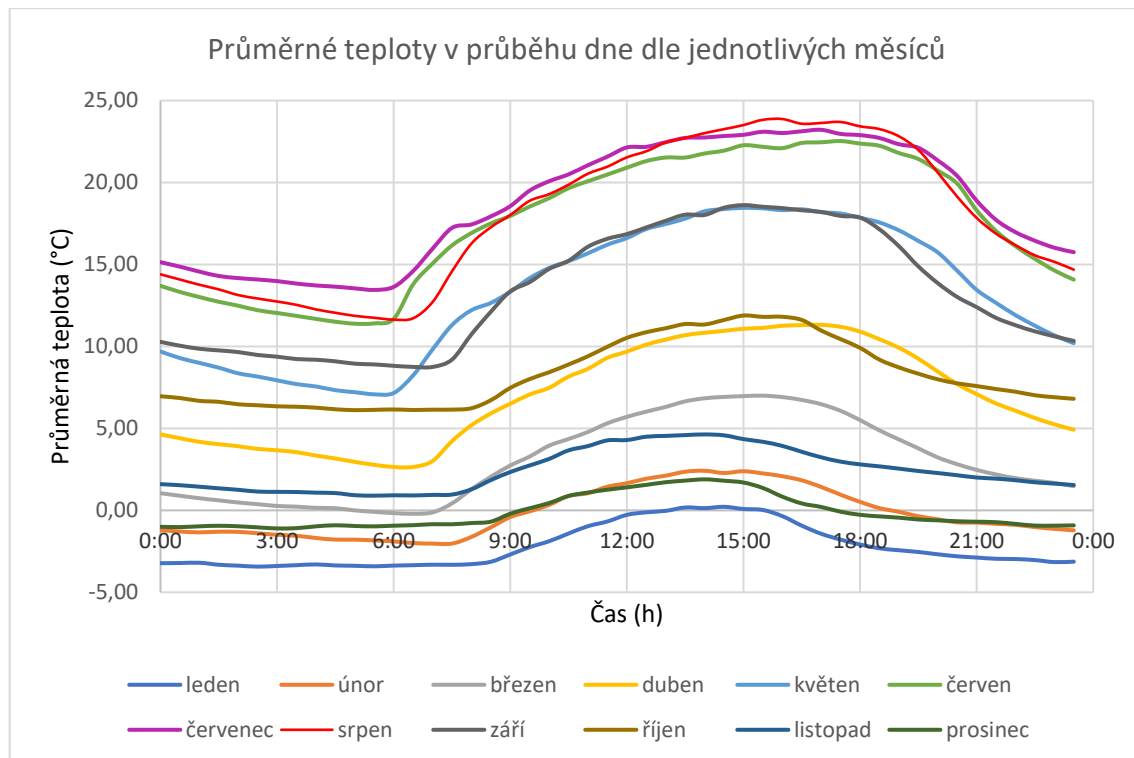
Pokud dochází při ochlazování vzduchu ke změně skupenství (kondenzaci), není možné použít teplotní účinnost rekuperátoru dle vztahu (2.1.26). Při změně skupenství dochází k odebrání latentního tepla ze vzduchu, při zachování stejné teploty, a je tedy nutné počítat s entalpiemi místo teplot.

$$\mu_{h_rek} = \frac{h_{22} - h_{21}}{h_{11} - h_{21}} 100 \quad (\%) \quad (2.1.26)$$

2.2 Predikce venkovní teploty

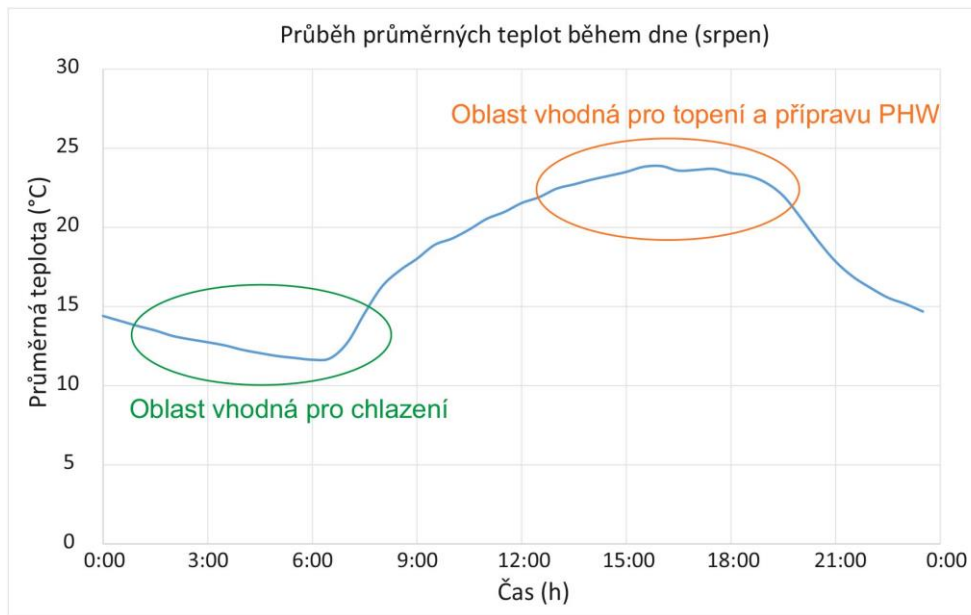
U rekuperačních jednotek, tepelných čerpadel vzduch-voda a u dalších ventilačních jednotek je účinnost těchto zařízení ovlivněna venkovní teplotou vzduchu. Venkovní teplota vzduchu se během dne mění a tím dochází i ke změně účinnosti těchto zařízení. Provozováním zařízení při vysokých účinnostech lze uspořit finanční náklady a tím zvýšit jejich návratnost. Standardní topné systémy reagují pouze na aktuální venkovní teplotu a neumožňují tak využít tento potenciál. Řešením je prediktivní řízení, které by bralo v potaz budoucí vývoj venkovní teploty a optimalizovalo tím chod celého zařízení (jedná se především o rekuperační jednotky, tepelná čerpadla vzduch-voda a další ventilační systémy). Pro jednoduchá zařízení (např. malé chladicí systémy), která je obtížné připojit k internetu, se jeví jako vhodné řešení off-line predikce venkovní teploty.

Pro stanovení vývoje venkovní teploty v průběhu dne byla použita data z meteorologické stanice WARIOWEATHER umístěné v polyfunkčním objektu v Domažlicích. Za účelem testování a vyhodnocování navržených způsobů regulace TZB je tento objekt osazen rozsáhlým systémem měření a regulace, do kterého bude stanice začleněna. Meteorologická stanice ukládá každou minutu informace o teplotě, relativní vlhkosti, rychlosti a směru větru atd. Naměřená data jsou z období leden 2016 až březen 2018. Z naměřených hodnot byly stanoveny průměrné teploty v průběhu dne po 30 minutách pro jednotlivé měsíce. Tyto průběhy jsou znázorněny na Obr. 2.2. Průběh denní teploty se pro jednotlivé oblasti může velice lišit. V praxi by bylo možné importovat průběhy teploty pro jednotlivé oblasti například ze softwaru Wolfram Mathematica. Zde je možné zjistit průměrné denní teploty pro libovolné místo na naší planetě (dle nejbližší meteorologické stanice).



Obr. 2.2 Průměrné denní teploty dle měsíců

Z Obr. 2.2 je patrné, že jsou si jednotlivé tvary průběhů průměrných denních teplot v jednotlivých měsících velice podobné. Průměrná nejmenší hodnota teploty v průběhu dne je okolo šesté hodiny ráno, což představuje oblast výhodnou pro chlazení. V oblasti mezi třetí a šestou hodinou ranní může být například v letních měsících spuštěna rekuperační jednotka, která při otevřeném bypassu (přírodní vzduch neprochází přes rekuperátor a nedochází k jeho ohřívání) vymění teplý vzduch v místnosti za studený venkovní. Přes den již rekuperace může zajišťovat ventilování místnosti dle hygienických norem, ale díky tomu, že počáteční teplota v místnosti bude nízká, může odpadnout potřeba danou místnost klimatizovat (alespoň pro část dne). Průběh s vyznačenými oblastmi je znázorněn na Obr. 2.3.



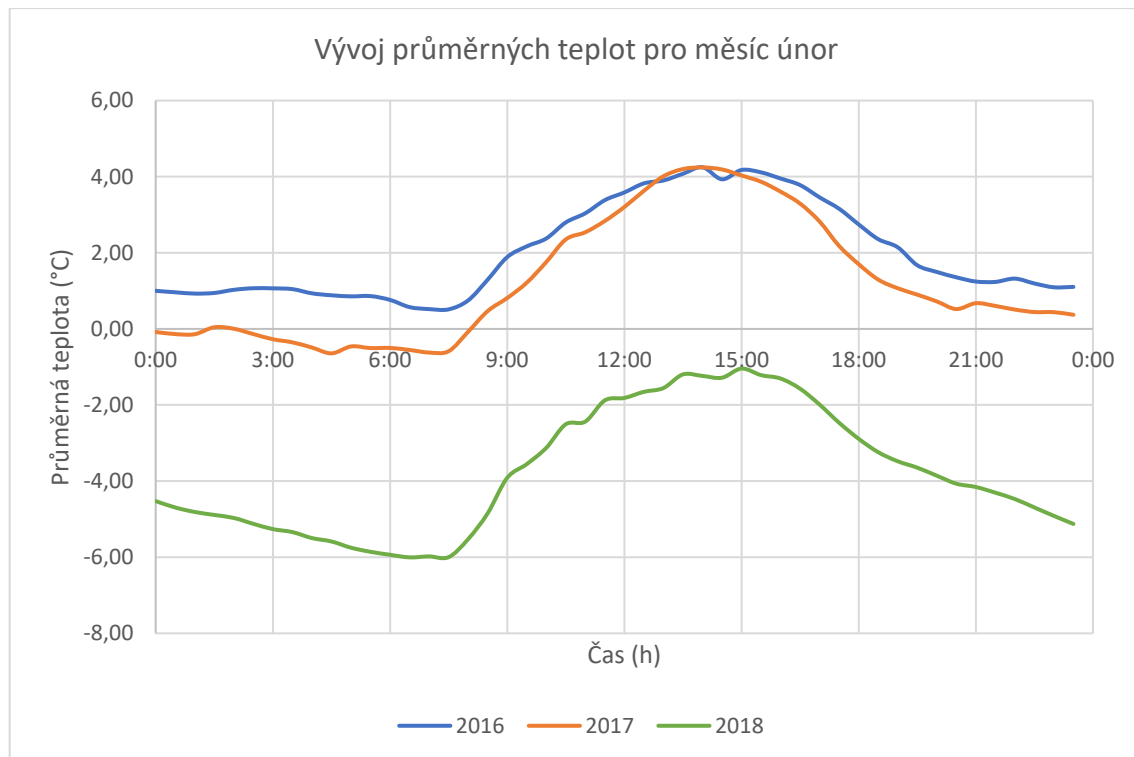
Obr. 2.3 Průměrné teploty během dne (srpen)

Naopak nejvyšší průměrná teplota nastává okolo třetí hodiny odpoledne. V případě požadavku na topení nebo přípravu PHW je tedy neoptimálnější provoz jednotek závislých na venkovní teplotě kolem třetí hodnoty odpoledne. V případě tepelných čerpadel vzduch-voda je optimální jejich provoz s akumulací nádrží a podlahovým vytápěním (pro zamýšlený systém regulace). Tepelné čerpadlo může v oblasti vhodné pro topení pracovat na maximální výkon (při vysoké účinnosti) a naakumulovat potřebné teplo do akumulací nádrže, zásobníku TUV a také do betonu v podlaze nebo dalších stavebních konstrukcích. Díky velké setrvačnosti podlahového vytápění lze v přechodných obdobích provozovat jednotky pouze v optimální oblasti. Důležitou roli hraje také velikost akumulací nádrže. Se snižující se teplotou rostou i tepelné ztráty budovy a provoz jednotky je nutný i mimo optimální oblast. Vhodným návrhem otopného a řídicího systému lze chod jednotky v oblasti s nejnižší účinností eliminovat.

Nejideálnějším způsobem prediktivního řízení je využití předpovědi počasí pro dané umístění instalace. Předpověď počasí dokáže reagovat na příchod teplé nebo studené fronty a tím zpřesní denní předpověď vývoje teploty. Řídicí jednotky mohou být připojené do cloud aplikace, která slouží jako uživatelské rozhraní a zároveň poskytuje informace o předpovědi počasí pro řídicí jednotku. Nevýhodou tohoto systému je nutnost připojení řídicího systému k internetu, což může být pro jednoduché zařízení problematické. Mnohdy je nutné celkové přepracování koncepce a výměna použitého hardwaru.

2.2.1 Off-line predikce venkovní teploty

Pokud není možné řídicí systém připojit k předpovědi počasí, bylo by výhodné průběh teploty během dne nějakým způsobem predikovat off-line. Z průměrných denních teplot je zřejmé, že jsou si průběhy velice podobné. Oblast maxima a minima nastává přibližně ve stejný čas. Průběhy se liší minimální a maximální teplotou a jsou posunuty nahoru nebo dolů po teplotní ose dle jednotlivých měsíců. Pro predikci denní teploty je tedy nutné zohlednit, v jakém měsíci se systém právě nachází. Obr. 2.4 znázorňuje průběh průměrných naměřených teplot během dne pro měsíc únor. Z grafu je patrné, že průběh je pro jednotlivé roky podobný a nedochází k výrazné změně rozdílů maxima a minima. Průběhy se liší převážně posunem bodů po teplotní ose. Průměrný vývoj teplot pro jednotlivé měsíce byl stanoven zprůměrováním naměřených hodnot v roce 2016, 2017 a 2018.



Obr. 2.4 Vývoj průměrných teplot pro měsíc únor

Průměrné hodnoty pro jednotlivé měsíce však nezohledňují, jestli je daný den teplota větší nebo menší než průměrná. Z tohoto důvodu do predikce vývoje teploty vstupuje i aktuální měřená teplota, která zohledňuje rozdíl oproti stanovené průměrné teplotě.

Pro snadnou implementaci off-line predikce venkovní teploty i do jednoduchých řídicích systémů byly stanoveny průměrné denní teploty dle měsíců po 30 minutách, které se do systému zadají v podobě tabulky. Tato tabulka bude samozřejmě odlišná dle zeměpisného umístění. Pro oblast České republiky by měly být tyto hodnoty dostačující.

System každých 30 minut stanoví odhadovaný vývoj teploty pro následující hodiny. Tabulka 2.1 znázorňuje vypočítané průměrné hodnoty teploty pro měsíc červen (ϑ_p) a teplotní konstanty (ϑ_k), které jsou použity pro stanovení odhadovaného vývoje teploty. Příklad výpočtu teplotní konstanty (ϑ_k) pro čas 7:00 je uveden v rovnici (2.2.1).

Tabulka 2.1 Ukázka hodnot pro stanovení vývoje teploty

Čas	Index	ϑ_p (°C)	ϑ_k (°C)
7:00	7	15,1	1,1
7:30	7,5	16,2	0,7
8:00	8	16,9	0,6
8:30	8,5	17,5	0,5
9:00	9	18	0,5
9:30	9,5	18,5	0,6
10:00	10	19,1	-

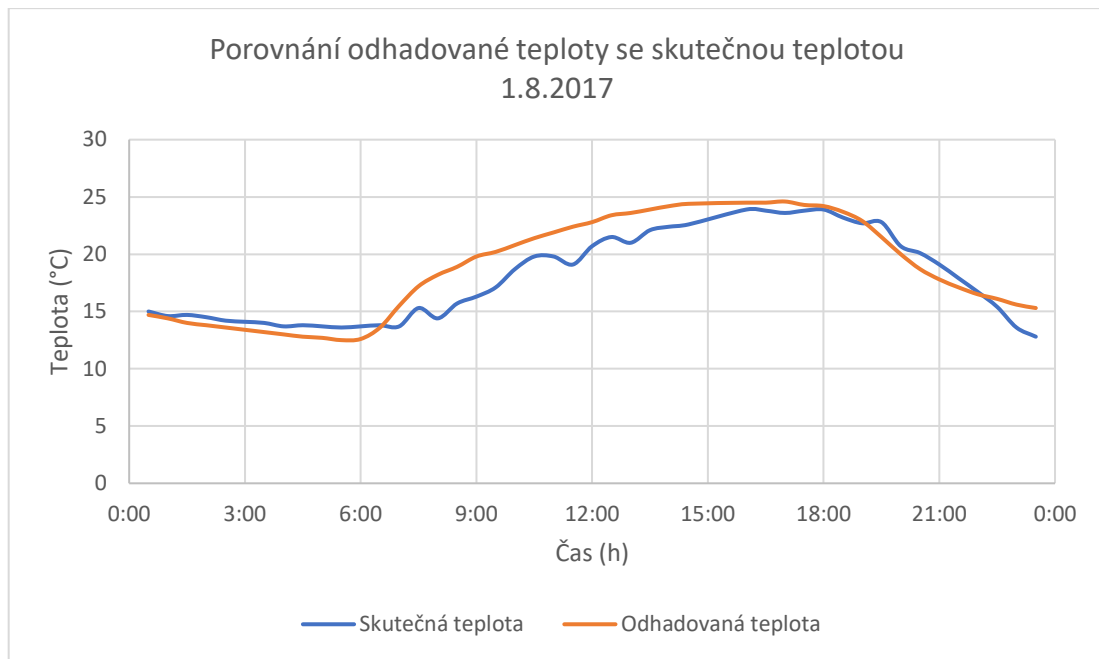
$$\vartheta_{k7} = \vartheta_{p7,5} - \vartheta_{p7} = 16,2 - 15,1 = 1,1 \quad (^\circ\text{C}) \quad (2.2.1)$$

Budoucí odhadovaná teplota za 30 min je dopočtena z aktuální naměřené teploty, ke které se přičte teplotní konstanta pro daný čas. Další hodnota teploty se vypočítá jako součet odhadnuté teploty za 30 min a teplotní konstanty pro čas ϑ_{+30min} . Výpočet dalších hodnot probíhá stejným způsobem. Jako příklad může být uvedena aktuální naměřená hodnota teploty 16 °C v čase 7:00. Pro čas 7:30 se odhadovaná teplota stanoví jako součet naměřené teploty a teplotního konstanty pro čas 7:00 dle rovnice (2.2.2). Stejným způsobem se pokračuje i pro výpočet odhadu dalších teplot, například viz rovnice (2.2.3).

$$\vartheta'_{7,5} = \vartheta_7 + \vartheta_{k7} = 16 + 1,1 = 17,1 \quad (^\circ\text{C}) \quad (2.2.2)$$

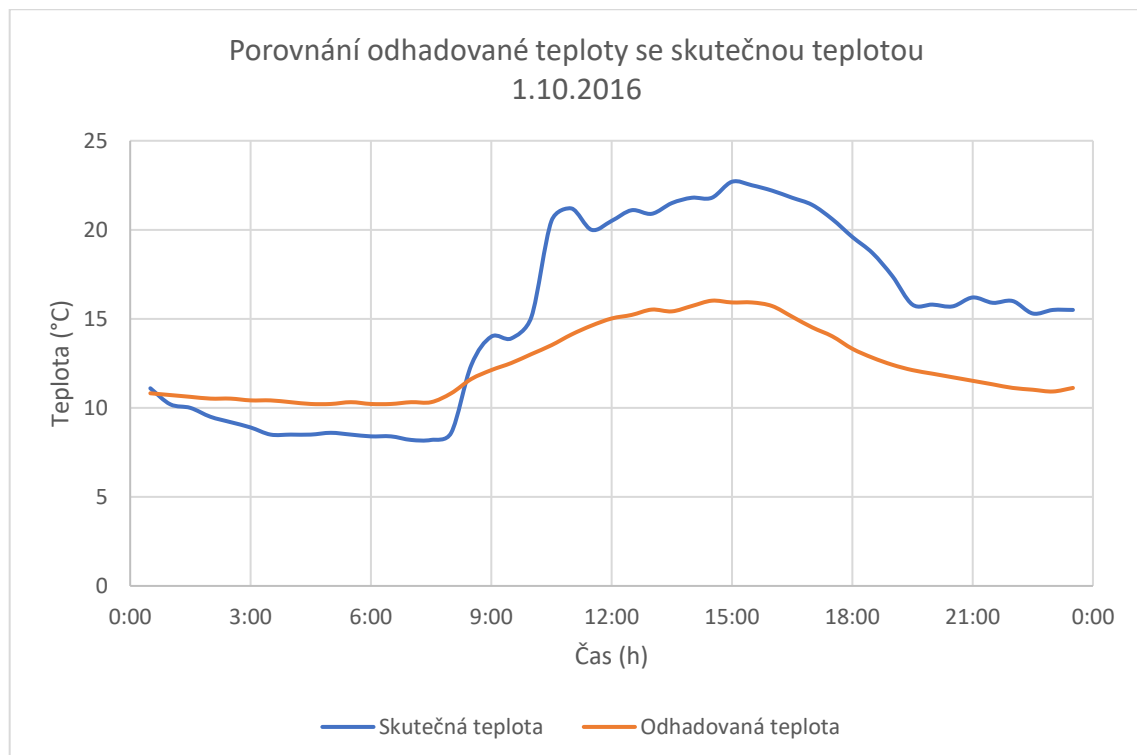
$$\vartheta'_8 = \vartheta_{7,5} + \vartheta_{k7,5} = 17,1 + 0,7 = 17,8 \quad (^\circ\text{C}) \quad (2.2.3)$$

Pro snadný výpočet odhadované teploty a porovnání skutečné naměřené venkovní teploty byl vytvořen program v LabVIEW. Do programu se nahrají data obsahující teplotní konstanty ϑ_k pro jednotlivé měsíce a hodnoty teplot pro daný testovaný den. Program provede výpočet odhadované teploty v čase 0:00 na následujících 24 h. V průběhu dne by samozřejmě docházelo k jeho zpřesňování dle aktuální teploty. Grafický průběh výsledných hodnot z vytvořeného programu pro vybrané dny je zobrazen na níže uvedených grafech. Z Obr. 2.5 je patrné, že se pro daný den odhadovaná teplota v průběhu dne blíží ke skutečně změřené hodnotě. Jednotlivé odchylky jsou zanedbatelné. Pro další náhodně vybrané dny se již odhadovaná teplota výrazněji lišila od skutečné.



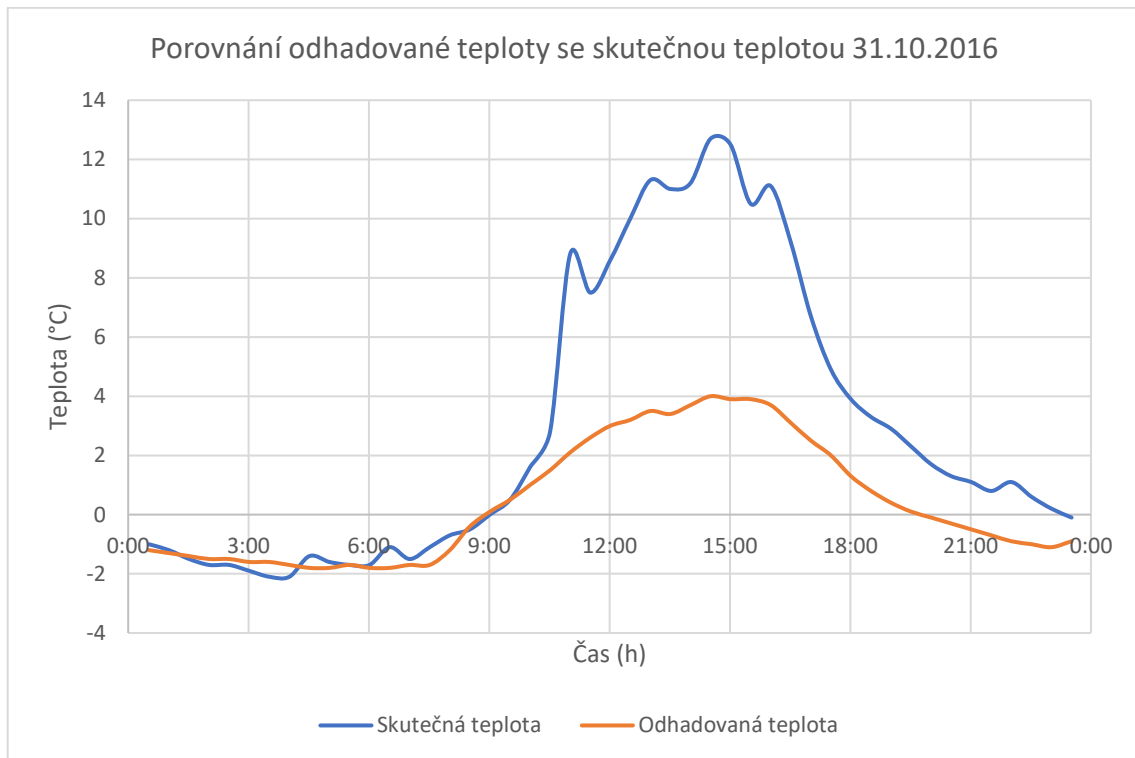
Obr. 2.5 Porovnání odhadované teploty se skutečnou teplotou (1. 8. 2017)

Na Obr. 2.6 je vidět zvýšení skutečné teploty oproti odhadované zhruba o 5 °C. Oblast maxima a minima však zůstává stejná.



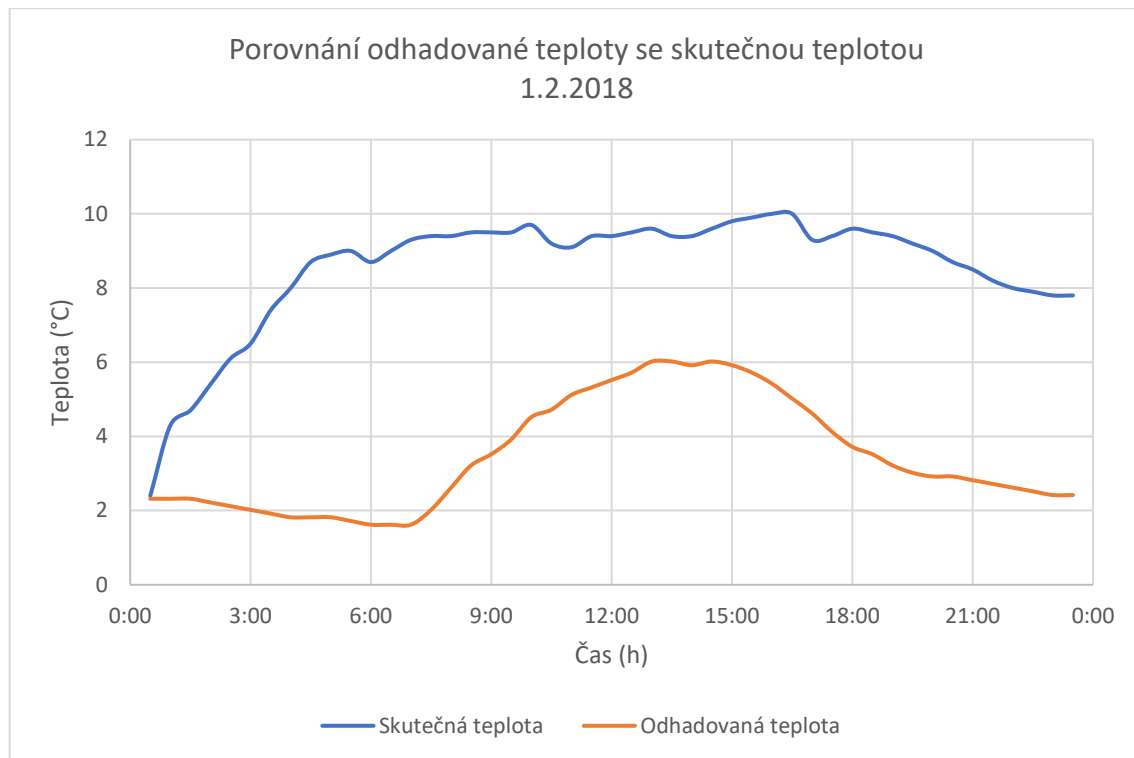
Obr. 2.6 Porovnání odhadované teploty se skutečnou teplotou (1. 10. 2016)

U dalšího testovaného dne (Obr. 2.7) došlo k podstatnému zvýšení maximální denní teploty o 8 °C. Do desáté hodiny ranní jsou průběhy téměř totožné, ale poté se od sebe začínou značně lišit. V nočních hodinách dochází ke snížení rozdílu na 1 °C.



Obr. 2.7 Porovnání odhadované teploty se skutečnou teplotou (31. 10. 2016)

U posledního vybraného dne (Obr. 2.8) je znatelný příchod teplé fronty, při které se teplota během pěti hodin zvýšila na hodnotu kolem 9 °C a na této hodnotě se ustálila téměř po celý den. V tomto případě neodpovídá ani oblast maximální a minimální teploty během dne.



Obr. 2.8 Porovnání odhadované teploty se skutečnou teplotou (1. 2. 2018)

Z výše uvedených průběhů odhadované teploty vyplývá, že takovéto určování budoucí teploty během dne je nedostačující a vykazuje příliš velké odchylky. Pokud se průběh teploty odhadovaného dne blíží průměrným hodnotám v měsíci, je predikce poměrně přesná. Z testovaných dnů však vyplývá, že se ve většině případů průměrné teploty od skutečných značně liší. Z těchto důvodů je tento způsob predikce teploty nevyhovující. Pokud by měl systém spolehlivě fungovat dle predikce teploty, bylo by nutné jej propojit s předpovědí počasí, která zaručí její zpřesnění.

Při porovnání všech testovaných dnů je patrné, že časové oblasti maximální a minimální naměřené teploty během dne jsou téměř totožné. Bylo by tedy možné použít systém off-line řízení pomocí časových intervalů, který by bylo vhodné aplikovat především pro ventilační a rekuperační jednotky, mrazicí jednotky a přípravu PHW pomocí tepelného čerpadla (vzduch-voda). Zejména pak u systémů, které není možné z nějakého technického důvodu připojit na on-line předpověď. Díky tomu, by bylo možné zefektivnit chod těchto zařízení tak, aby fungovala na plný výkon jen ve vybraném časovém pásmu, kdy je jejich chod optimální, a naopak v oblasti, kde účinnost zařízení je nižší, by pracovala pouze v omezeném režimu.

U tepelných čerpadel (vzduch-voda) by bylo možné provozovat ohřev PHW pouze v časovém období s nejvyšší průměrnou denní teplotou. V případě dobře navrženého

objemu nádrže TUV by ohřev probíhal převážně v tomto časovém období a při vyšší účinnosti.

U rekuperačních jednotek by bylo možné v letních měsících využít nižší venkovní teploty v ranních hodinách pro ochlazení vzduchu a stěn v místnosti. Při otevřeném bypassu (vzduch neprochází přes rekuperátor) proudí chladný venkovní vzduch do místnosti a teplý vnitřní vzduch je odváděn ven. Při dosažení požadovaného ochlazení místnosti by došlo k vypnutí ventilátorů, systém by měřil koncentraci CO₂ a při překročení maximální dovolené hodnoty by začal místnost ventilovat standardním způsobem s použitím rekuperátoru (teplý venkovní vzduch je ochlazován studeným odpadním vzduchem z místnosti). Díky tomuto opatření by bylo možné snížit teplotu v místnosti a snížit tak případnou spotřebu energie potřebné na chlazení (klimatizování). Výše představený návrh principu řízení provozu bude testován a vyhodnocován v následujících kapitolách.

2.2.2 Předpověď počasí – venkovní teplota

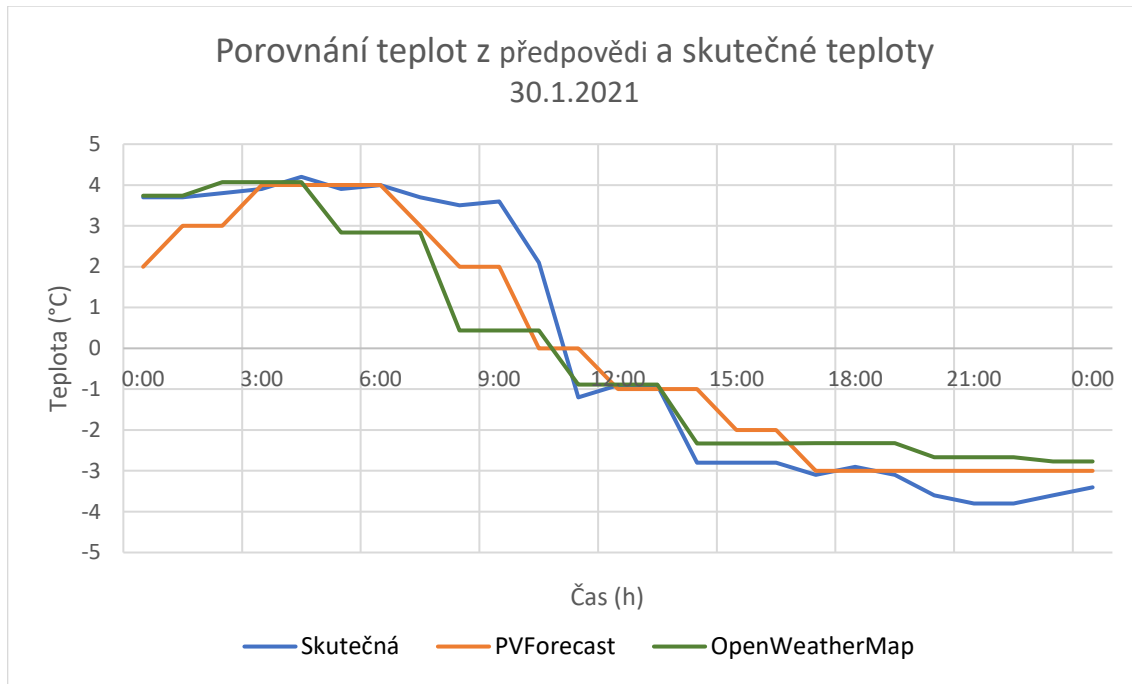
Aby bylo možné co nejpřesněji stanovit vývoj venkovní teploty v následujících hodinách a dnech, je nutné řídicí systém připojit k předpovědi počasí. Systém může získávat informace z různých serverů, které umožňují stahování předpovědi počasí pro danou lokalitu. Jelikož byly mnou navržené systémy postaveny převážně na PLC od společnosti WAGO [33], snažil jsem se využít předpovědi počasí ze serverů, s kterými umožňuje PLC standardně komunikovat. Pro tyto aplikace jsem zvolil server OpenWeatherMap [43], který umožňuje bez poplatku stahovat předpověď počasí na následujících pět dní ve tříhodinových intervalech (server vyžaduje registraci uživatele a zadání GPS souřadnic). Pro zpřesnění předpovědi venkovní teploty a zejména slunečního osvětlení jsem k systému připojil ještě server PVForecast [41], který provozuje Univerzitní centrum energeticky efektivních budov Českého vysokého učení technického v Praze. Tento server umožňuje bezplatně stahovat předpověď teploty, slunečního osvětlení a srážkového úhrnu pomocí webového API rozhraní až na 72 hodin v hodinových intervalech. Díky tomu je možné zpřesnit vstupní data do navrhovaného systému regulace.

V případě chlazení pomocí rekuperační jednotky je výhodné řídit provoz nočního chlazení v závislosti na předpovědi počasí. Pokud má být následující pracovní den venkovní teplota nad stanovenou teplotou, systém může automaticky spustit proces nočního chlazení. Navržený systém zohledňuje i čas, po který venkovní teplota překročí nastavenou mez. Dle této informace určí délku nočního chlazení (ideálně noční hodiny s nejnižší venkovní teplotou) a teplotu, na kterou má být vzduch v místnosti chlazen.

Předpověď počasí je také výhodné použít pro řízení vzduchového tepelného čerpadla, kde je jeho účinnost (COP - coefficient of performance) závislá na teplotě. Díky předpovědi počasí je možné provozovat tepelné čerpadlo převážně ve vyšších denních teplotách a tím optimalizovat jeho spotřebu elektrické energie.

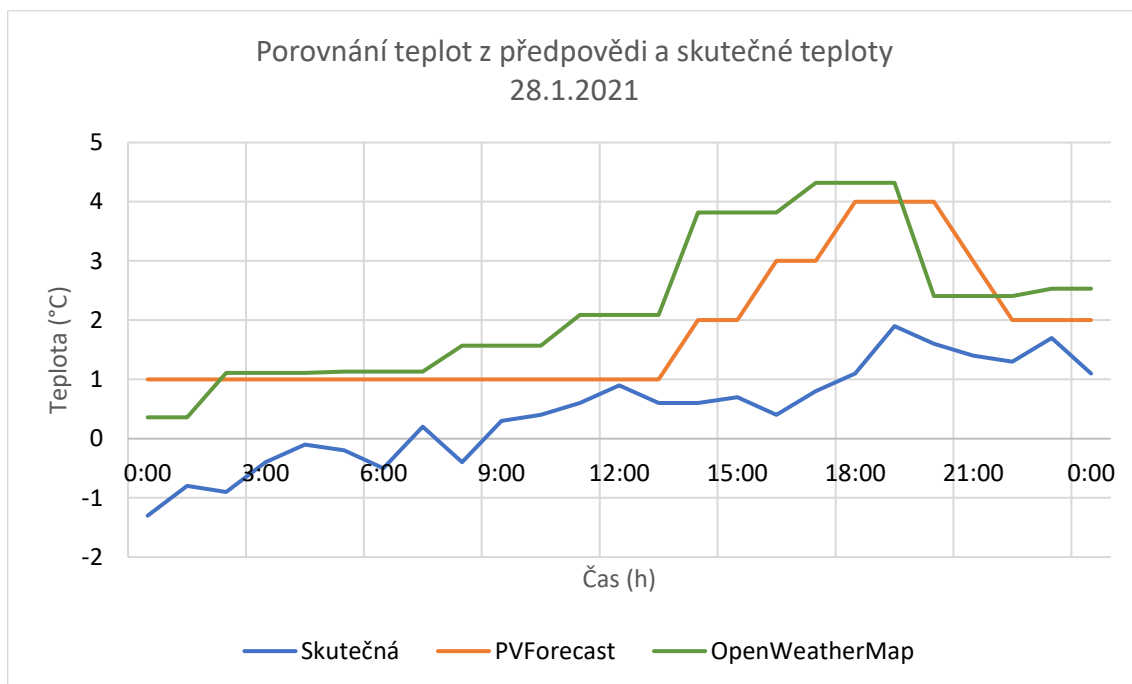
Pokud je do systému zakomponována i fotovoltaická elektrárna, může být provoz jednotlivých spotřebičů optimalizován i dle předpovědi osvětlení tak, aby byla maximálně využita vyrobená elektrická energie.

Pro zjištění přesnosti předpovědi jsem provedl měření, kde jsem porovnával skutečnou venkovní teplotu a osvětlení s předpokládanými hodnotami z předpovědi. Měření probíhalo v polyfunkčním objektu v Domažlicích pomocí meteorologické stanice WARIOWEATHER. Tato meteorologická stanice umožňuje měřit i hodnotu osvětlení. V tomto případě byla načtena předpověď o půlnoci na celý následující den. Ukázky z průběhů teploty pro vybrané dny jsou na Obr. 2.9 a na Obr. 2.10.



Obr. 2.9 Porovnání venkovní teploty z předpovědi s naměřenou teplotou 30. 1. 2021

Z porovnání teplot je patrné, že se předpokládané teploty mírně liší. Pro zpřesnění je možné provádět průběžné načítání předpovědi v průběhu dne (např. po 3 hodinách). Nebo je možné využít placené předpovědi, která umožňuje i častější načítání teploty. Jelikož je pro mnou navržené systémy důležitý zejména trend vývoje teploty, tak jsem již nezkoušel zpřesnit předpověď použitím placených služeb poskytovatelů předpovědi počasí.



Obr. 2.10 Porovnání venkovní teploty z předpovědi s naměřenou teplotou 28. 1. 2021

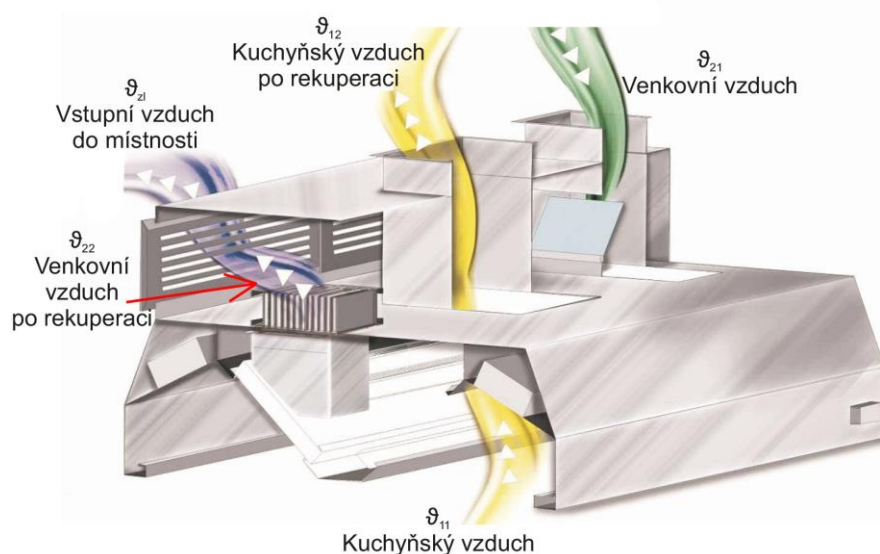
2.3 Měření parametrů rekuperačních jednotek

Účinnost rekuperačních jednotek ovlivňuje zejména jejich konstrukce a řídicí systém. Pro jejich optimalizaci je nejdříve nutné detailní proměření jednotlivých částí rekuperační jednotky, zjištění slabých míst a zvolení vhodných opatření pro jejich minimalizaci. Z tohoto důvodu jsem vytvořil měřicí systém pro různé druhy rekuperačních jednotek, který lze použít pro měření v laboratorních podmínkách nebo v reálném provozu. Pro tento program byly použity rovnice uvedené v kapitole 2.1 [24, 25].

Měřicí systém pro měření parametrů rekuperačních jednotek byl navržen pro produkty společnosti Südluft Systemtechnik. Tato společnost se zabývá ventilačními systémy pro průmyslové kuchyně, které musí být vybaveny ventilačními prvky dle VDI 2052 [35]. V průmyslových kuchyních vzniká velké množství tepla a vlhkosti, které musí být odváděno z daného prostoru a zároveň musí být do prostoru přiváděn venkovní vzduch.

2.3.1 Návrh měřicího systému

Jednoduchá nucená ventilace bez zpětného získávání tepla by vedla, zvláště v zimních měsících, k velkým tepelným ztrátám. Dále by zde nastal problém s nízkou teplotou vstupního vzduchu, a proto by musel být vzduch dodatečně ohříván. Tento problém může být odstraněn pomocí nucené ventilace se zpětným získáváním tepla (rekuperační jednotkou). Díky rekuperaci vzduchu je přívodní vzduch ohříván odváděným vzduchem a tím je dosaženo požadované úspory energie. Ventilační jednotka se zpětným získáváním tepla je znázorněna na Obr. 2.11.



Obr. 2.11 Rozmístění čidel v rekuperační jednotce [46]

Všechna ventilační zařízení se vzduchovým množstvím větším než 4000 m³/h musí být vybavena zařízením se zpětným získáváním tepla dle § 15 Energy Savings Directive EnEV 2009. V zimních měsících je nutné ohřát přívodní chladný vzduch z teploty kolem – 5 °C na teplotu okolo 22 °C. Použitím rekuperační jednotky může být spotřeba energie, potřebné na ohřátí přívodního vzduchu, snížena až o 80 %. Zařízení pro zpětné získávání tepla v průmyslových kuchyních se stává stále častějším i z důvodu zvyšujících se cen různých druhů energie. Společnost Südluft disponuje softwarem, který umožňuje stanovit ušetřenou energii při použití rekuperační jednotky dle zeměpisné polohy instalace. Výsledky z měření na reálných aplikacích jsem porovnal s úsporami stanovenými pomocí softwaru.

Měřicí systém má dva hlavní cíle:

- Měření rekuperačních jednotek, jejich hodnocení a optimalizace v průběhu vývoje a inovačního procesu
- Praktické měření parametrů rekuperační jednotky v reálném provozu (účinnost rekuperátoru a úspory energie)

Pro ověření účinnosti rekuperační jednotky je nezbytné měřit její parametry v laboratorních podmínkách a především v reálném provozu. Z tohoto důvodu jsem v rámci této práce navrhl měřicí systém s ohledem na jednoduchost, robustnost, kompaktní rozměry a pořizovací cenu. Měřicí systém se skládá z teplotních a vlhkostních čidel, průmyslového PLC a programu vytvořeného v software LabVIEW [30]. Pozice jednotlivých senzorů v rekuperační jednotce je zobrazena na Obr. 2.11 a bližší popis uveden v Tabulka 2.2.

Tabulka 2.2 Rozmístění senzorů

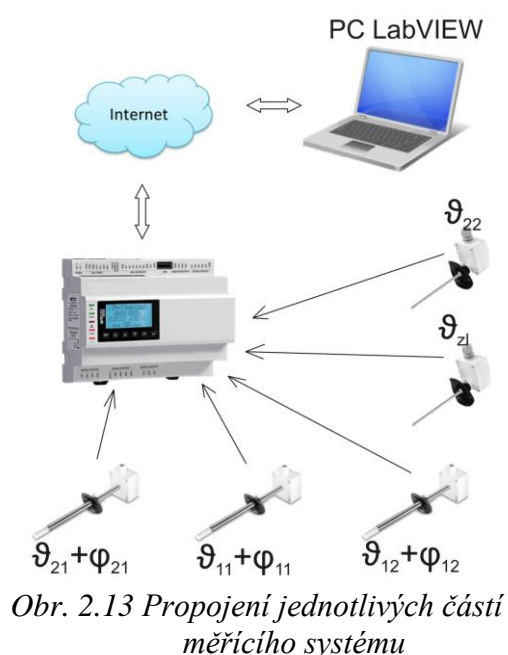
Popis	Označení	Jednotka	Typ senzoru
Venkovní vzduch	\dot{V}_{21}	(m ³ /h)	Standardní vzduchové množství
	ϑ_{21}	(°C)	Teplota
	φ_{21}	(%)	Relativní vlhkost
Kuchyňský vzduch	\dot{V}_{11}	(m ³ /h)	Standardní vzduchové množství
	ϑ_{11}	(°C)	Teplota
	φ_{11}	(%)	Relativní vlhkost
Kuchyňský vzduch za rekuperátorem	ϑ_{12}	(°C)	Teplota
	φ_{12}	(%)	Relativní vlhkost
Venkovní vzduch za rekuperátorem	ϑ_{22}	(°C)	Teplota

Kabelová teplotní čidla Pt1000 (EATEC SC2_5) s měřicím rozsahem od -35 °C do 105 °C s krytím IP 67 byla použita pro měření teploty. Pro měření vlhkosti a teploty byl použit převodník (EATEC TTHDV) s nastavitelným měřicím rozsahem.

Použité PLC disponuje integrovaným displejem díky kterému je možné zkontrolovat měřené veličiny a nastavit požadované parametry. Uživatel může změnit jazyk, nastavit parametry Ethernetového připojení, rychlost ukládání dat a nastavit ukládání do vnitřní paměti PLC. Z důvodu omezené paměti PLC jsou ukládána pouze měřená data a ostatní požadované veličiny jsou dopočítávány ve vytvořeném programu v počítači. Měřicí sestava pro měření rekuperačních jednotek je zobrazena na Obr. 2.12. Na Obr. 2.13 je znázorněno propojení jednotlivých částí měřicího systému.

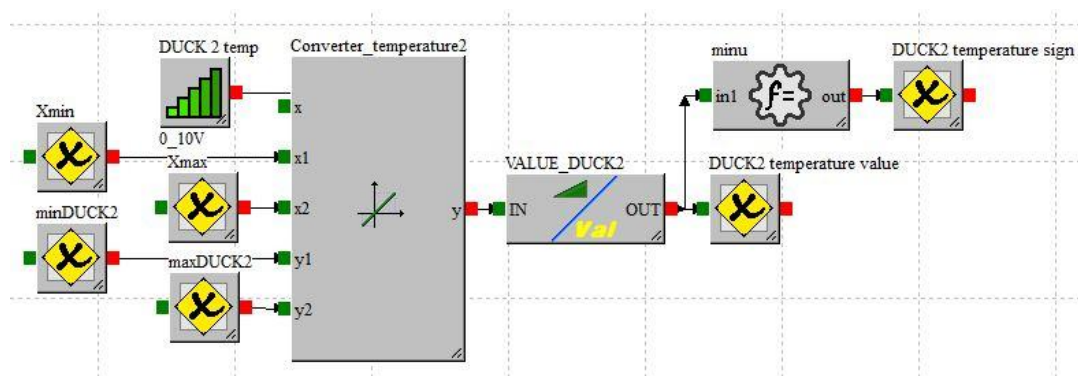


Obr. 2.12 Měřicí sestava pro rekuperační jednotku



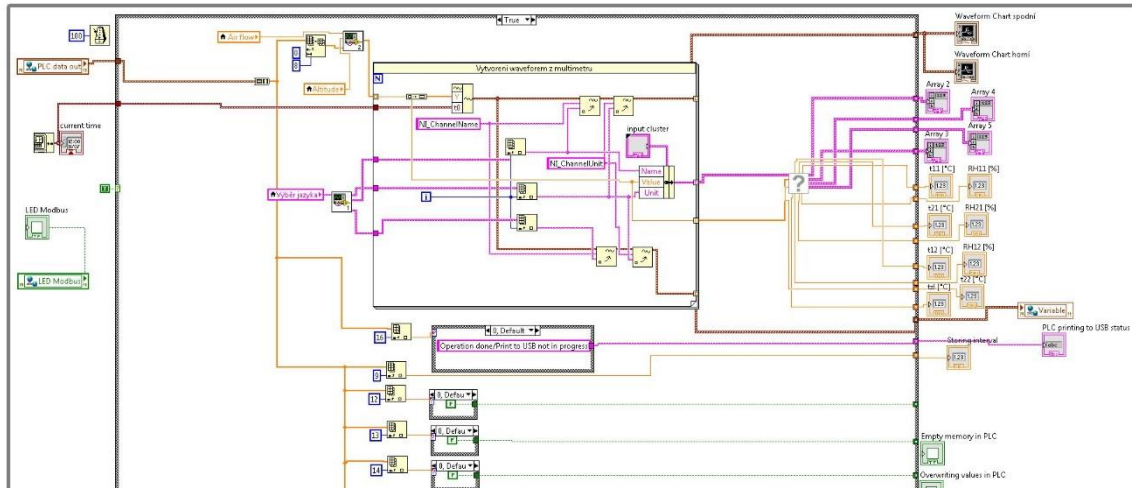
Obr. 2.13 Propojení jednotlivých částí měřicího systému

Program pro PLC EVCO byl vytvořen v programovacím prostředí UNI-PRO 3, ukázka tohoto programovacího prostředí je zobrazena na Obr. 2.14.



Obr. 2.14 Ukázka programovacího prostředí UNI-PRO 3 pro programování PLC

Pro lepší přehlednost aktuálně měřených dat, jejich vizualizaci a snadné nastavení, jsem vytvořil počítačový program pomocí software LabVIEW, který se propojí s PLC pomocí Ethernetu. Měřicí systém byl navržen tak, aby bylo možné měřit různé druhy rekuperačních jednotek bez nutnosti jeho velkých modifikací. Ukázka části programu v programovacím prostředí LabVIEW je zobrazena na Obr. 2.15.



Obr. 2.15 Ukázka programovacího prostředí LabVIEW

Hlavní stránka uživatelského rozhraní (Obr. 2.16) obsahuje dva grafy, kde si uživatel může vybrat, jaké hodnoty chce zobrazit. Měření a vypočtené hodnoty jsou přehledně rozděleny do pěti tabulek. V prvních třech tabulkách jsou zobrazeny následující veličiny:

- Teplota (°C)
- Relativní vlhkost (%)
- Absolutní vlhkost (kg/m³)
- Měrná vlhkost (kg/kg_{sv})
- Měrná entalpie (kJ/kg)
- Parciální tlak vodní páry (Pa)
- Teplota rosného bodu (°C)
- Hustota vzduchu (kg/m³)
- Standardní vzduchové množství (m³/h)
- Hmotností průtok (kg/h)

Teplota venkovního vzduchu po rekuperaci, vstupní teplota do místnosti, regenerativní účinnost, vzduchové množství a množství kondenzátu jsou zobrazeny ve čtvrté tabulce. V páté tabulce jsou zobrazeny hodnoty výkonu rekuperátoru a dohřevu, výkony bez použití

rekuperace a také ušetřený výkon při použití rekuperace. V této záložce může uživatel také zvolit místo ukládání měřených veličin do PC a zapnout nebo vypnout jejich ukládání.

V dalších částech programu může uživatel nastavit jazykovou mutaci, interval ukládání dat do PC a PLC. Dále je zde možné využít funkci pro přepočítání změřených hodnot (dle rovnic uvedených v kapitole 2.1) uložených do paměti PLC.

The screenshot displays the SUDLUFT SYSTEMTECHNIK software interface. At the top, there is a header with the company logo and a status bar showing the time (15:41:52) and date (13.6.2018). Below the header, there are several panels and graphs:

- Top Panel:** Includes fields for 'IP adresa PLC' (147.228.93.219), 'Připojit PLC', and 'Odpojit PLC' buttons. A menu bar contains 'Měření', 'Schéma', 'Ukládání do PLC', and 'Přepočítat dat'.
- Left Panel (1):** 'Venkovní vzduch' (Outdoor air) data table:

21 Teplota	5,7	°C
21 Rel. vlhkost	77,4	%
21 Absol. vlhkost	0,00550891	kg/m ³
21 Měrná vlhkost	0,00466751	kg/kg
21 Entalpie	17,4756	kJ/kgv
21 Parciální tlak vodní páry	709,337	Pa
21 Teplota rosného bodu	2,0	°C
21 Hustota	1,18378	kg/m ³
21 St. vzduch, množství	1777,6	m ³ /h
21 Hmotnostní průtok	2134,4	l/h
- Middle Panel (2):** 'Kuchynský vzduch' (Kitchen air) data table:

11 Teplota	47,7	°C
11 Rel. vlhkost	19,9	%
11 Absol. vlhkost	0,0147689	kg/m ³
11 Měrná vlhkost	0,0146267	kg/kg
11 Entalpie	86,0459	kJ/kgv
11 Parciální tlak vodní páry	2386,86	Pa
11 Teplota rosného bodu	18,8	°C
11 Hustota	1,02449	kg/m ³
11 St. vzduch, množství	1544,91	m ³ /h
11 Hmotnostní průtok	1844,08	l/h
- Bottom Left Panel (3):** 'Kuchynský vzduch po rekuperaci' (Kitchen air after recuperation) data table:

12 Teplota	35,6	°C
12 Rel. vlhkost	26,6	%
12 Absol. vlhkost	0,0108598	kg/m ³
12 Měrná vlhkost	0,0102793	kg/kg
12 Entalpie	53,3163	kJ/kgv
12 Parciální tlak vodní páry	1546,11	Pa
12 Teplota rosného bodu	13,4	°C
12 Hustota	1,16737	kg/m ³
12 St. vzduch, množství	1605,46	m ³ /h
12 Hmotnostní průtok	1921,27	l/h
- Top Graph:** 'Teplota (°C)' vs 'Čas'. Shows a step function where temperature drops from approximately 35°C to 5°C.
- Middle Graph:** 'Relativní vlhkost (%)' vs 'Čas'. Shows a step function where relative humidity drops from approximately 19% to 26%.
- Right Panel:** A list of variables for monitoring and control, including '12 Teplota', '12 Rel. vlhkost', '12 Absol. vlhkost', '12 Měrná vlhkost', '12 Entalpie', '12 Parciální tlak vodní páry', '12 Teplota rosného bodu', '12 Hustota', '12 St. vzduch, množství', '12 Hmotnostní průtok', '122 Teplota po rekuperaci', 't21 Přivodní teplota', 'Účinnost rekuperátoru', 'Vzduchové množství', 'Množství kondenzátu', 'Výkon rekuperátoru', 'Výkon dohřev', 'Výkon bez rekuperace', 'Výkon dohřev požad.', 'Úspora rekuperaci', 'Požadovaná teplota', and 'Požadovaná vlhkost'.
- Bottom Right Panel (4):** Summary of key values:

t22 Teplota po rekuperaci	16,2	°C
t21 Přivodní teplota	17,3	°C
Účinnost rekuperátoru	75	%
Vzduchové množství	1800	m ³ /h
Množství kondenzátu	0,000132961	l/min
- Bottom Right Panel (5):** Summary of power and efficiency:

Výkon rekuperátoru	6248,75	W
Výkon dohřev	654,631	W
Výkon bez rekuperace	6903,1	W
Výkon dohřev požad.	4344,37	W
Úspora rekuperaci	6248,75	W
- Bottom Right Panel (6):** Control parameters:

Požadovaná teplota [°C]	23,5
Vzduchové množství [m ³ /h]	1800
Nedržákové výška [m]	500

Obr. 2.16 Uživatelské rozhraní

2.3.2 Testovací provoz

Pro ověření správné funkčnosti navrženého měřicího systému jsem provedl zkušební měření nového druhu rekuperační jednotky SL-Thermo. Toto měření probíhalo ve zkušební laboratoři firmy Südluft Systemtechnik (Obr. 2.17). Měřicí čidla byla instalována na požadovaná místa a připojena k PLC (čidla byla umístěna v potrubí přímo v místě připojení rekuperační jednotky a před a za rekuperátor). Měřené hodnoty byly ukládány do vnitřní paměti PLC každých 10 s.

Výkon ventilátorů zajišťující přívod a odvod vzduchu byl regulován v laboratoři externím řídicím systémem pomocí analogového signálu 0-10 V. Vzduchové množství bylo měřeno pomocí čidla rozdílového tlaku (BELIMO ZTH). Díky tomu bylo možné regulovat množství přiváděného a odváděného vzduchu. Pro zajištění provozních podmínek blízkých reálnému provozu bylo nezbytné vytvořit velké množství vlhkosti a tepla.



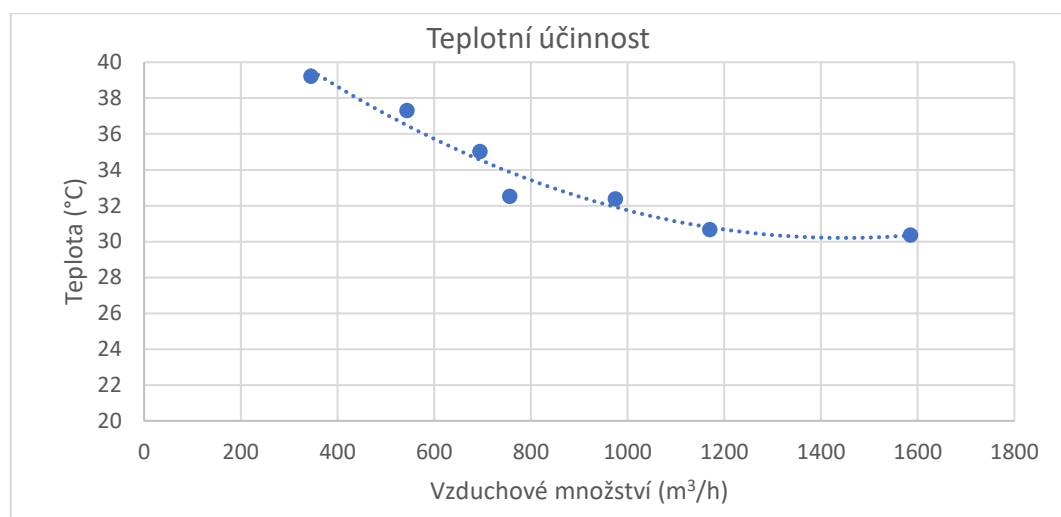
Obr. 2.17 Měření rekuperační jednotky v laboratorních podmínkách

Hlavním úkolem bylo ověření funkčnosti navrženého měřicího systému na novém typu rekuperátoru a kalkulace jeho teplotní účinnosti a energetických úspor. V průběhu měření docházelo ke změně vnitřní teploty díky rozdílnému vzduchovému množství vstupního a výstupního vzduchu. Zároveň nebylo možné dodávat potřebný tepelný výkon použitými přímotopnými tělesy. Vlastní měření probíhalo po dobu dvou dnů, kdy docházelo také ke změně venkovní teploty. Ukázka naměřených hodnot je zobrazena v Tabulka 2.3. Naměřené hodnoty popisují změnu teplotní účinnosti rekuperační jednotky v závislosti na rozdílných teplotách a vzduchovém množství. Z hodnot je patrné, že při zvyšování vzduchového množství (vyvážený stav) dochází ke snížení teplotní účinnosti.

Tabulka 2.3 Ukázka naměřených hodnot z rekuperační jednotky

\dot{V}_{21} (m ³ /h)	ϑ_{21} (°C)	φ_{21} (%)	ϑ_{11} (°C)	φ_{11} (%)	\dot{V}_{22} (m ³ /h)	ϑ_{12} (°C)	φ_{12} (%)	ϑ_{22} (°C)	Teplotní účinnost (%)
345	22,89	27,25	36,25	21,04	344	30,63	25,78	28,13	39,22
416	16,80	35,76	32,86	47,17	379	27,02	62,56	23,41	41,16
544	21,90	28,09	36,75	20,76	535	30,76	26,06	27,44	37,31
592	16,20	36,47	32,58	47,37	502	26,33	62,65	22,69	39,62
667	13,80	40,45	31,34	49,17	1290	24,00	62,78	20,32	37,17
695	20,69	30,78	32,65	21,21	675	27,44	26,32	24,88	35,03
667	18,74	33,72	34,12	19,73	1288	31,32	22,00	26,17	48,31
756	20,61	30,11	33,09	21,48	725	27,52	27,14	24,67	32,53
869	18,67	33,64	33,63	19,87	1319	30,11	22,84	25,21	43,72
975	19,80	31,76	30,42	21,49	990	26,08	25,88	23,24	32,39
1160	18,79	33,62	31,43	21,20	350	23,68	28,94	21,04	17,80
1170	18,97	33,46	29,21	21,72	1151	24,93	26,18	22,11	30,66
1163	18,44	33,92	32,26	20,65	640	25,28	27,60	21,62	23,01
1170	18,20	34,89	32,60	20,49	743	25,70	27,29	22,00	26,39
1170	18,10	34,36	32,77	20,39	755	25,81	27,25	21,96	26,31
1374	11,02	47,45	25,59	81,23	367	18,89	79,29	15,87	33,29
1585	18,10	34,78	27,78	22,40	1595	24,16	26,29	21,04	30,37

Závislost teplotní účinnosti rekuperační jednotky na vzduchovém množství ve vyváženém stavu je pro lepší představu znázorněno na Obr. 2.18.

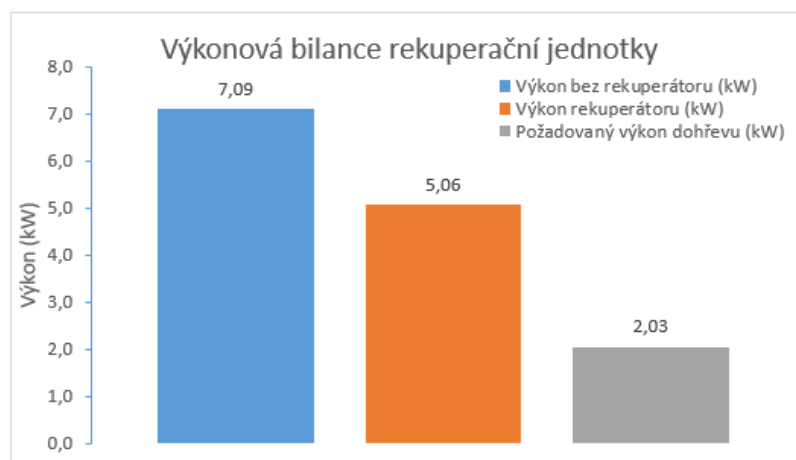


Obr. 2.18 Závislost teplotní účinnosti na vzduchovém množství

V Tabulka 2.4 jsou zobrazeny naměřené hodnoty při teplotě venkovního vzduchu 5,7 °C a vzduchovém množství 1500 m³/h. V návaznosti na naměřené hodnoty jsem vypočetl teplotní účinnost, požadovaný výkon k ohřátí 1 500 m³/h z 5,7 °C na 20 °C bez použití rekuperace, výkon rekuperátoru pro ohřátí z 5,7 °C na 16,2 °C a výkon dohřevu pro ohřátí vzduchu z 16,2 °C na teplotu 20 °C. Z výsledků (Obr. 2.19) je zřejmé, že při použití rekuperace je možné ušetřit až 5,06 kW.

Tabulka 2.4 Ukázka naměřených hodnot

Název	Teplota (°C)	Relativní vlhkost (%)
Venkovní vzduch	5,7	77,4
Kuchyňský vzduchu	47,7	19,9
Kuchyňský vzduch po rekuperaci	35,6	26,6
Venkovní vzduch po rekuperaci	16,2	
Vzduch vstupující do místnosti	17,3	
Požadovaný vzduch do místnosti	20,0	
Nasávané vzduchové množství	1 500 m ³ /h	
Vyfukované vzduchové množství	1 500 m ³ /h	
Teplotní účinnost	25 %	



Obr. 2.19 Výkonová bilance rekuperační jednotky

2.3.3 Shrnutí poznatků a přínosů

Komerčně dostupné systémy nelze jednoduše použít pro specifické požadavky v rámci měření provozních stavů rekuperačních jednotek. Měření prokázalo, že mnou navržený měřicí systém je vhodný pro měření rekuperačních jednotek a může být nasazen v reálných podmínkách pro vyhodnocování jejich funkčnosti. Získaná data mohou být také použita pro vylepšení programu na výpočet úspory energií, kterým společnost disponuje. V případě nutnosti může být program rozšířen o další potřebné výpočty. Měřicí systém je využíván také v rámci návrhu a optimalizaci rekuperačních jednotek. Pokud je dobře navržená rekuperační jednotka provozována efektivně, je dosaženo snížení provozních nákladů. Měření, optimalizaci a vyhodnocení chodu rekuperačních jednotek se věnují následující kapitoly.

2.4 Měření parametrů prostředí v místnosti s rekuperační jednotkou

Pro získání informací o tom, jakým způsobem může ovlivnit rekuperační jednotka vnitřní prostředí budov, bylo provedeno dlouhodobé měření parametrů vnitřního prostředí v zasedací místnosti katedry elektroenergetiky na ZČU v Plzni osazené rekuperační jednotkou Whisperair od společnosti 2VV (Obr. 2.20). Hlavním sledovaným parametrem byl vývoj koncentrace CO₂ a teploty v různých částech místnosti. Jednotka byla provozována v režimu konstantních otáček a v režimu řízení dle koncentrace CO₂. Díky komunikačnímu protokolu Modbus TCP/IP bylo možné využít čidla umístěná přímo v jednotce a dále také načítat nastavení a aktuální provozní stav rekuperační jednotky. [31, 32]



Obr. 2.20 Instalace rekuperační jednotky v zasedací místnosti

2.4.1 Návrh měřicího systému

V zasedací místnosti byla naistalována čidla teploty, vlhkosti a koncentrace CO₂ pro měření parametrů prostředí v pracovním prostoru sedících posluchačů. Dále byla osazena čidla prašnosti a čidlo přítomnosti. Jednotka byla připojena přes analyzátor sítě Nemo 96HDLe od společnosti IME. Díky tomuto zařízení lze monitorovat aktuální příkon rekuperační jednotky a měřit její zpětný vliv na síť. Jako řídicí jednotka systému bylo použité C-RIO od společnosti National Instruments, které bylo naprogramováno pomocí programu LabVIEW. C-RIO zajišťuje komunikaci s rekuperační jednotkou a analyzátozem sítě, ukládání měřených dat a jejich vizualizaci. Samotný program je rozdělen na několik částí:

- Sběr dat ze slotů C-RIO
- Sběr dat z jednotky WHISPER AIR
- Sběr dat z analyzátoru sítě
- Vizualizace a ukládání naměřených dat

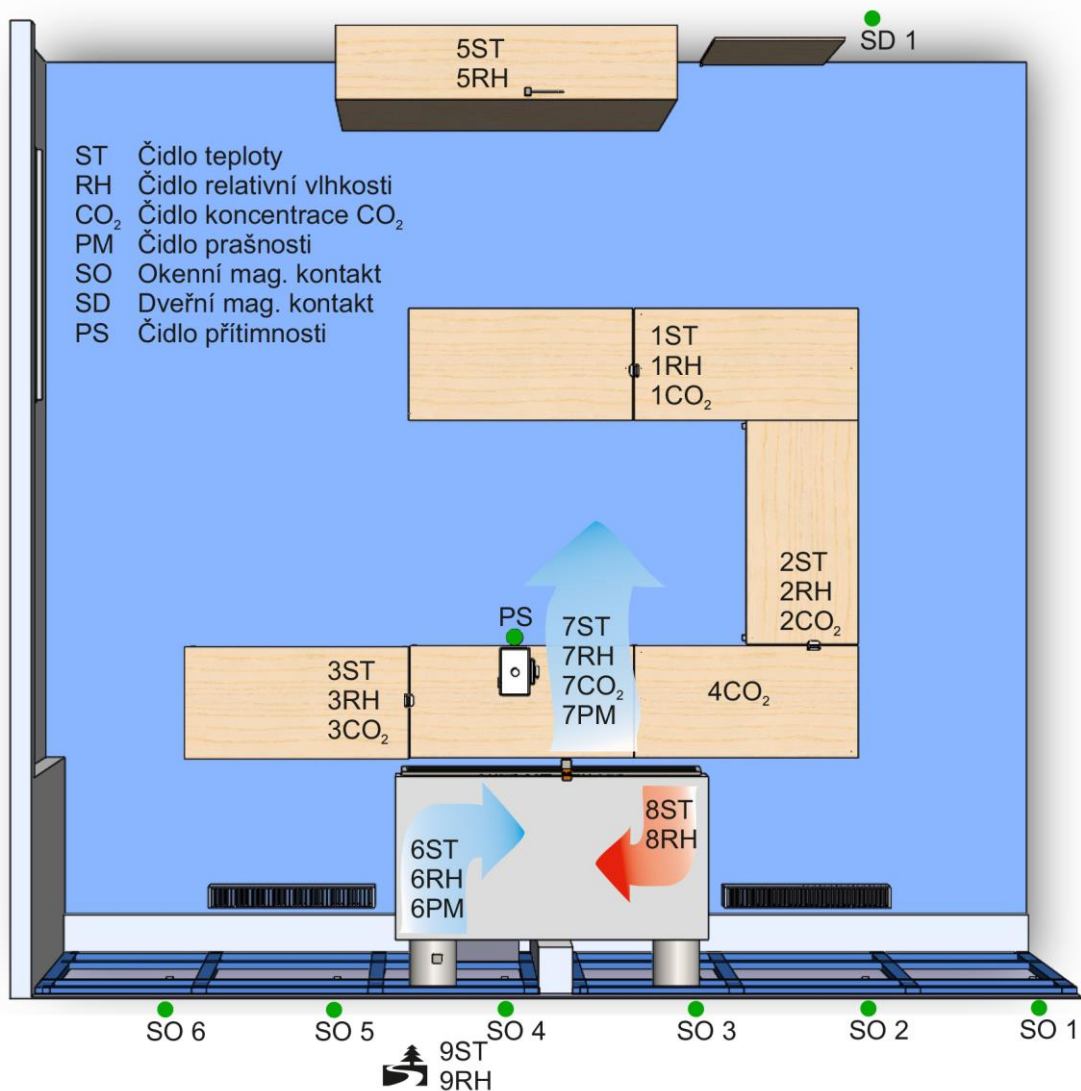
Sběr dat z karet C-RIO

Řídicí jednotka C-RIO disponuje možností připojení měřicích karet pro měření různých typů signálu z měřicích čidel. V tomto případě byly použity karty NI 9205 (analogový vstup 0-10 V) a NI 9035 (digitální vstupy/výstupy). Všechna měřicí čidla byla vybrána s výstupem 0-10 V tak, aby nebylo zapotřebí dalších měřicích karet. Měření teploty a vlhkosti v prostoru učebny zajišťují čidla EATEC TTHIV. Čidla jsou instalována na stolech učebny a umístěna na držácích vytištěných na 3D tiskárně, které byly navrženy pro danou aplikaci s ohledem na vhodné proudění vzduchu okolo měřicích čidel. K čidlu teploty a vlhkosti bylo z druhé strany instalováno čidlo koncentrace CO₂ od společnosti 2VV (CI-CO2-M).

Přívodní potrubí venkovního vzduchu bylo osazeno čidlem teploty a vlhkosti (EATEC TTHDV). Stejně čidlo bylo instalováno na jednotku v místě výfuku čerstvého vzduchu do místnosti a na protější skříň v místnosti. Pro měření parametrů odpadního vzduchu bylo osazeno čidlo EATEC TTHIV do prostoru nasávání odpadního vzduchu.

Do nasávacího potrubí přívodního vzduchu a do prostoru vyfukovaného vzduchu do místnosti byla instalována čidla prašnosti. Díky tomuto měření lze stanovit účinnost zachycení prachových částic pomocí filtru přívodního vzduchu umístěného v rekuperační jednotce. Řídicí systém jednotky disponuje měřením rozdílového tlaku před a za filtrem, který slouží k měření zanesení filtru.

Všechna okna v místnosti byla osazena magnetickými kontakty, které slouží k identifikaci otevřeného okna. Magnetickým kontaktem byly osazeny i vstupní dveře do místnosti. Díky tomuto opatření je možné analyzovat data i s ohledem na otevřené okno či dveře. Pro snadnou identifikaci osob v místnosti bylo do systému instalováno čidlo přítomnosti. Vhodnost čidla se projevila zejména při analýze dat, kdy je možné jednoduše zjistit, zda se při změnách hodnot jednotlivých čidel pohybovaly v dané místnosti nějaké osoby. Pro určení přesného počtu osob je učebna vybavena IP kamerou, která ukládá snímky na datové uložení každých 30 minut. Umístění jednotlivých čidel je znázorněno na Obr. 2.21.

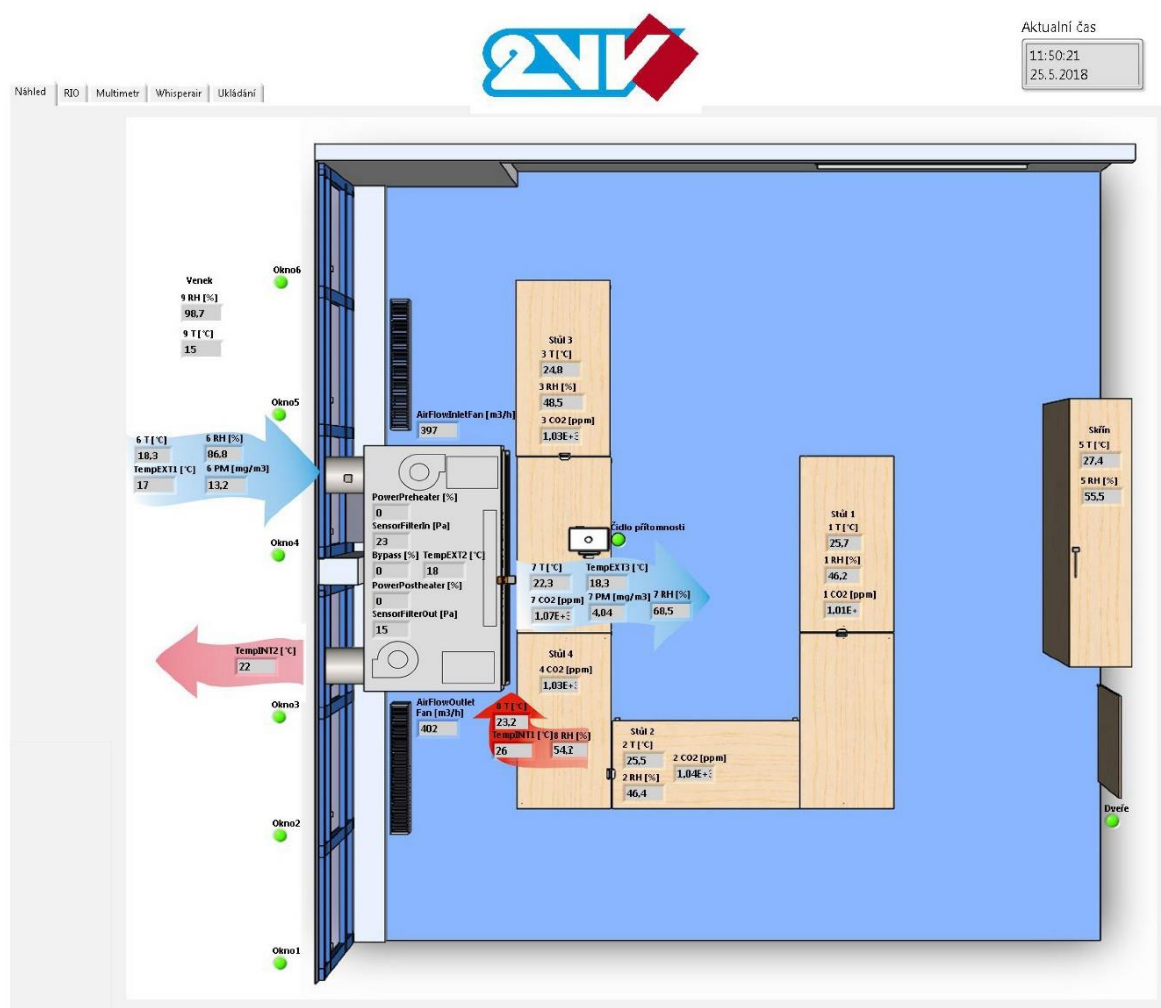


Obr. 2.21 Rozmístění čidel v místnosti

Sběr dat z rekuperační jednotky WHISPER AIR

Rekuperační jednotka disponuje možností komunikace pomocí Modbus RS485 nebo Modbus TCP/IP. V našem případě byla jednotka připojena k C-RIO pomocí Modbus TCP/IP. Toto propojení dovoluje čtení potřebných hodnot přímo z řídicího systému rekuperační jednotky. Dále je možné tuto jednotku na dálku řídit a upravovat tak její provoz a nastavení. Jednotlivé rozmístění měřicích čidel v jednotce a jejich popis je znázorněn na Obr. 2.22. Jednotka disponuje měřením rozdílového tlaku před a za filtrem přívodního a odvodního vzduchu. Díky tomu je možné sledovat zanášení filtru a provádět jeho výměnu pouze v případě nutnosti. Pro zjištění provozních stavů jednotky a poruch jednotlivých prvků jsou tyto stavy vizualizovány. Díky tomu je možné případný problém včas odhalit.

parametry celkem do pěti záložek. První záložka “Náhled“ slouží k rychlé vizualizaci dat ve schématickém obrázku učebny a rekuperační jednotky. V záložce “RIO“ jsou zobrazeny veškeré hodnoty měřené pomocí analogových a digitálních vstupů C-RIO. Pro lepší přehlednost je zde umístěn graf, který slouží ke sledování požadovaných veličin v čase. Záložka “Multimetr“ slouží k zobrazování dat měřených pomocí analyzátoru sítě. Data je možné také zobrazit v grafu. Záložka “Whisperair“ slouží k zobrazování dat čtených z jednotky přes Modbus TCP/IP. Poslední záložka “Ukládání“ slouží k zapnutí nebo vypnutí ukládání měřených dat do paměti C-RIO a flash disku. Zároveň může uživatel daný soubor pojmenovat dle potřeby. Jako jednoduchá kontrola správné funkčnosti ukládání slouží zelená LED kontrolka. Veškerá měřená data jsou každou minutu ukládána do vnitřní paměti C-RIO a zároveň na flash disk, který je k měřicímu systému připojený. Pro zajištění dat před případným selháním měřicího systému dochází každý den k nahrání dat na server. Celkem dochází k zaznamenávání 114 hodnot z měřicího systému.

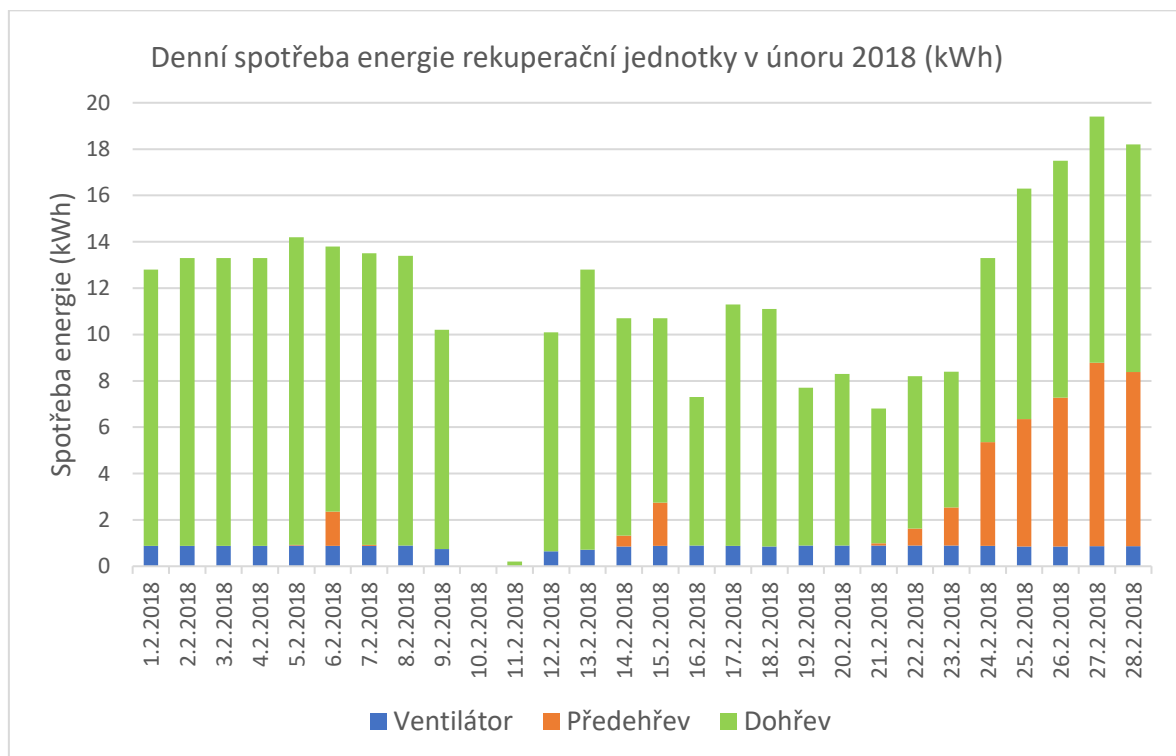


Obr. 2.24 Ukázka uživatelského rozhraní

2.4.2 Testovací provoz

Měření spotřeby elektrické energie

Pro vyhodnocování spotřeby rekuperační jednotky je každou minutu ukládána i informace o spotřebované energii naměřené analyzátořem sítě. Je tedy možné stanovit denní spotřebu rekuperační jednotky. Jedná se o energii potřebnou na chod ventilátorů a řídicí elektroniky, přehřev nasávaného vzduchu a dohřev vzduchu po rekuperaci. Naměřené denní spotřeby elektrické energie jsou znázorněny na Obr. 2.25. Jedná se o nejvyšší naměřené hodnoty spotřeby rekuperační jednotky, které byly způsobeny nepřetržitým ventilováním místnosti i v nočních hodinách na minimální hodnotu 300 m³/hod. Venkovní teploty v tomto měsíci klesaly až na -13 °C. Bylo tedy nutné nasávaný vzduch elektricky přehřívát a po výstupu z rekuperátoru dohřívát na požadovanou vnitřní teplotu kolem 23 °C.



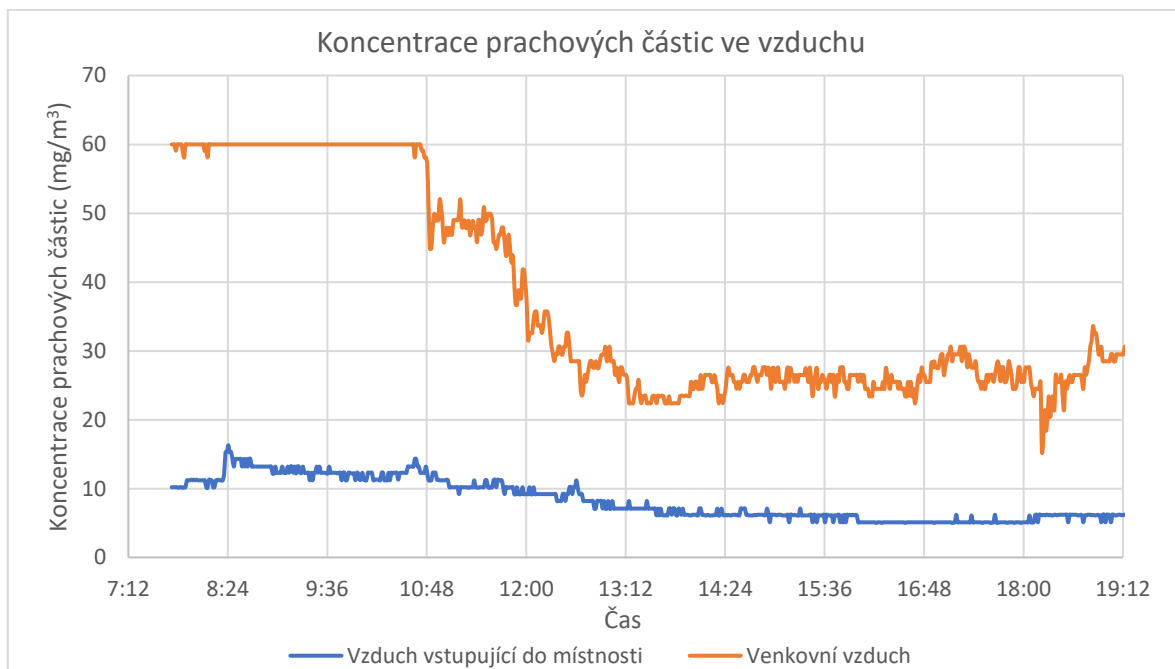
Obr. 2.25 Denní spotřeba elektrické energie v únoru 2018

Z grafu je patrná nulová spotřeba 10. 12. 2018 a 11. 2. 2018, které byly způsobeny výpadkem měřicího systému a rekuperační jednotky. Nejvyšší denní spotřeba byla 27. 2. 2018 a činila 19,4 kWh. Energetickou náročnost rekuperační jednotky je možné snížit vypínáním jednotky v nočních hodinách, kdy v místnosti nejsou přítomny žádné osoby. Dále by bylo možné zapínat rekuperační jednotku dle externího čidla CO₂ v místnosti pouze při překročení stanoveného limitu. Rekuperační jednotka má instalované čidlo koncentrace CO₂

v nasávacím otvoru odváděného vzduchu z místnosti a z tohoto důvodu je nutný neustálý chod ventilátorů na minimální otáčky (300 m³/hod). Díky externímu čidlu instalovanému přímo v místnosti by bylo možné přivádět čerstvý vzduch do místnosti pouze při překročení limitu koncentrace CO₂ a tím docílit dalšího snížení nákladů, zejména v zimních měsících, spojených s predehříváním a dohříváním přiváděného venkovního vzduchu.

Měření koncentrace prachu ve vzduchu

Rekuperační jednotka nasává venkovní vzduch přes filtry, které čistí přírodní vzduch a tím snižují koncentraci prachových částic vyfukovaných do místnosti. Pro ověření filtrační schopnosti byla rekuperační jednotka osazena čidly prašnosti. Na Obr. 2.26 je zobrazen průběh koncentrace prachových částic během dne. Z grafu je patrné, že vstupní filtry zachytávají částice prachu a dochází tak k čištění vzduchu vstupujícího do místnosti. To může být výhodné zejména v oblastech s velkou koncentrací prachových částic. Pro správnou funkčnost je nutné udržovat prachové filtry dostatečně čisté. K tomu slouží měření rozdílového tlaku před a za filtrem. Díky tomu je možné přesně indikovat zanesení filtru a upozornit tak uživatele na nutnost jeho výměny.

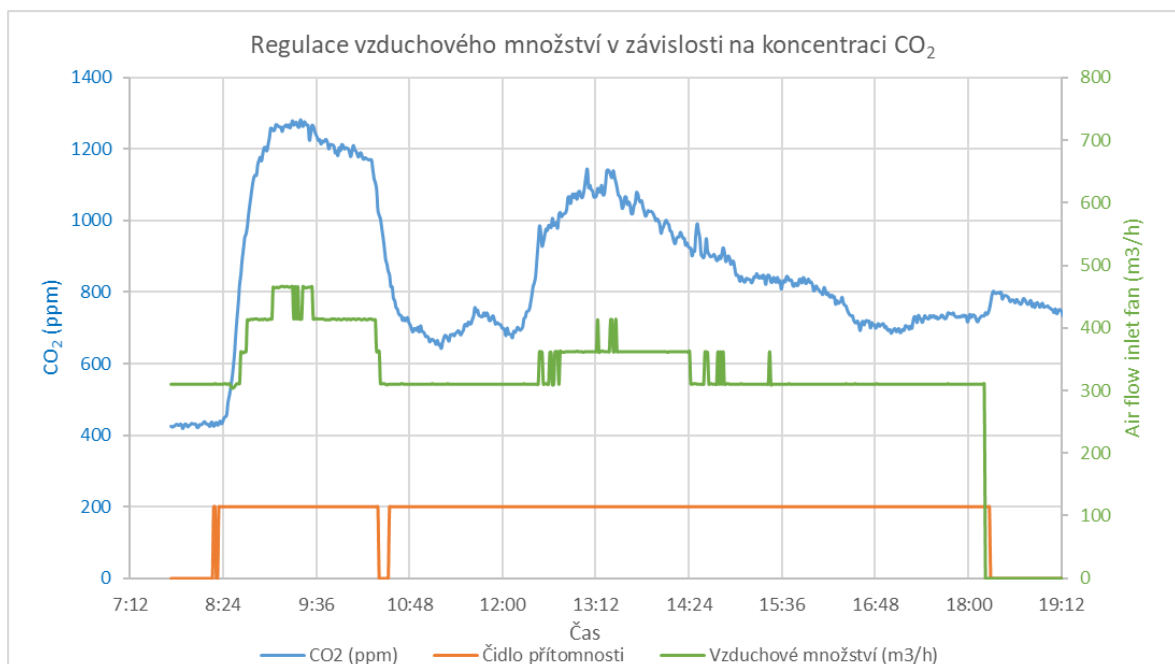


Obr. 2.26 Koncentrace prachových částic ve vzduchu

Měření koncentrace CO₂

Rekuperační jednotky se primárně instalují z důvodu vysoké koncentrace CO₂ v interiérech. Jejich hlavním úkolem je zajištění dostatečné výměny vzduchu v místnosti a tím udržení koncentrace CO₂ v předepsaných limitech. Z tohoto důvodu bylo v místnosti rozmístěno několik měřicích čidel. Rekuperační jednotka byla nastavena na automatickou regulaci otáček ventilátorů dle koncentrace CO₂. Jednotka tedy automaticky reguluje množství vzduchu přiváděného do vnitřního prostoru. Minimální hodnota vzduchového množství je 300 m³/h.

Z Obr. 2.27 je patrné zvýšení koncentrace CO₂ při příchodu lidí do místnosti. Při překročení určité koncentrace dojde k automatickému zvýšení množství vzduchu vstupujícího do místnosti a tím i ke snížení koncentrace CO₂ v místnosti. Modrý průběh v grafu zobrazuje koncentraci CO₂ měřenou čidlem umístěným na lavici přímo u sedících osob. Snížení vzduchového množství na nulovou hodnotu je způsobeno časovým plánem, na kterém je nastaveno vypnutí rekuperační jednotky po 18:00.



Obr. 2.27 Vývoj koncentrace CO₂

2.4.3 Shrnutí poznatků a přínosů

Mnou navržený měřicí systém pro monitorování chodu rekuperační jednotky a měření jejího vlivu na vnitřní prostředí prokázal přínos instalace rekuperačních jednotek. Díky její instalaci je možné udržet koncentraci CO₂ v požadovaných limitech a snížit koncentraci prachových částic. Zároveň je možné v letních měsících ochladit vnitřní prostor díky režimu nočního ochlazování, kdy přiváděný vzduch neprochází přes rekuperátor a vstupuje přímo do místnosti. Z měření také vyplývá, že i dobře konstruovaná jednotka, která prošla optimalizací v rámci výrobního procesu, může při špatném nastavení způsobit zvýšení nákladů spojených s provozem rekuperační jednotky. Jedná se zejména o provoz v zimních měsících, kdy je nutné provoz rekuperační jednotky řídit dle koncentrace CO₂.

V návaznosti na zjištěné skutečnosti jsem se v kapitole 2.5 zaměřil na optimalizace provozu centrální rekuperační jednotky s ohledem na její hospodárny provoz.

2.5 Řízená ventilace vnitřních prostor pomocí centrální rekuperační jednotky

Velice rozšířeným způsobem větrání vnitřních prostor pro rozsáhlejší objekty je použití centrální rekuperační jednotky. Využití nachází zejména v nových objektech nebo při rekonstrukci budov, do kterých je možné bez větších problémů instalovat vzduchotechnické potrubí. Centrální jednotka se zpravidla instaluje na střechu nebo do technické místnosti objektu. Vývody do jednotlivých místností by měly být osazeny vzduchotechnickými klapkami, které regulují množství přiváděného/odebíraného vzduchu do místnosti. Oproti decentralizované rekuperační jednotce, která byla blíže popsána v kapitole 2.4, je nutné systém vybavit řídicím systémem, který bude řídit jednotlivé části ventilačního systému. Tyto řídicí systémy jsou buď dodávány výrobcem rekuperačních jednotek nebo častěji odbornými firmami, které se specializují na řízení rekuperačních jednotek, vytápění a chlazení (HVAC) v budovách. [24, 25, 40]

Níže je popsán mnou vytvořený řídicí systém pro komerční, školní nebo kancelářské objekty, kde jsem se snažil minimalizovat provozní náklady při dodržení předepsaných limitů pomocí efektivního řízení množství vzduchu do jednotlivých místností. Zároveň jsem na tomto systému otestoval účinnost nočního ochlazení budovy v letních měsících a možnosti využití navržené predikce venkovní teploty během dne viz kapitola 2.2.

Navržený systém byl instalován v MŠ a ZŠ pro sluchově postižené v Plzni. V rámci rekonstrukce budovy byla v celém komplexu budov vyměněna okna, zateplena obálka budovy a ve dvou částech instalována aktivní centrální rekuperační jednotka (učebny mateřské a základní školy). Původně měly být vzduchotechnické klapky na přívodu a odvodu vzduchu z a do místnosti regulovány nespojitě (ZAP/VYP) přímo regulátorem CO₂ osazeným v místnosti. Regulace radiátorových těles měla zůstat původní, pomocí termostatických ventilů. Poté, co se začalo uvažovat i o možnosti chlazení, bylo zapotřebí navrhnout celkové řízení HVAC. V rámci spolupráce s instalační firmou jsem navrhl a vytvořil dva totožné řídicí systémy pro budovu školky a školy. Oddělené systémy byly navrženy z důvodu velké vzdálenosti mezi budovami (cca. 70 m), což by přinášelo větší nároky na kabeláž a instalační problémy s kabelovými cestami.

2.5.1 Návrh systému

Hlavní částí systému je aktivní rekuperační jednotka (Obr. 2.28) od společnosti NILAN VPM1000, která zajišťuje přívod venkovního vzduchu přes vzduchové filtry do objektu základní školy (Obr. 2.29) a zároveň odvádění vnitřního vzduchu z objektu. Slovo aktivní znamená, že rekuperační jednotka dále obsahuje výměník a kompresor, pomocí kterého je v letních měsících ochlazován přívodní vzduch a teplo je předáváno výstupnímu vzduchu z budovy. Díky tomu je možné v letních měsících touto jednotkou chladit vnitřní prostory. V zimních měsících je přiváděný vzduch ohříván pomocí odváděného vzduchu z budovy tak, aby přiváděný vzduch do jednotlivých tříd nezpůsobil jejich podchlazení a teplotní diskomfort. Další výhodou tohoto řešení je, že nedochází k mísení odváděného a přiváděného vzduchu vlivem netěsností jednotky. Rekuperační jednotka je vybavena komunikačním rozhraním Modbus RTU, pomocí kterého komunikuje s centrálním řídicím PLC. Díky této komunikaci je možné řízení rekuperační jednotky a zároveň čtení provozních parametrů. Systém umožňuje i dálkovou správu rekuperační jednotky a její diagnostiku.



Obr. 2.28 Centrální rekuperační jednotka



Obr. 2.29 Pohled na budovu základní školy

Pro regulaci přiváděného a odváděného množství vzduchu jsou u každé třídy instalovány regulační klapky, které je možné řídit napěťovým signálem 0-10 V. Systém je koncipován jako rovnotlaký, takže jsou klapky na vstupu a výstupu ze třídy regulovány stejně (jedním signálem 0-10 V) pomocí řídicího systému PLC.

Pro zvýšení úspor spojených s vytápěním objektu jsou do systému implementovány i servopohony pro radiátorová tělesa, která jsou umístěna v jednotlivých třídách. Tyto pohony byly vybrány od společnosti Eatec a jsou ovládány pomocí napětí 230 VAC. Umožňují pouze nespojitě řízení otevření ventilu.

V jednotlivých třídách je snímána teplota vzduchu, relativní vlhkost a koncentrace CO₂ pomocí čidel od společnosti SENSIT (STC102) připojených k řídicímu PLC pomocí

komunikační sběrnice Modbus RTU. Dle aktuálního provozního stavu a nastavení systému je řízeno otevření vzduchotechnických klapek a servopohonu radiátorových těles. Propojení čidel s řídicím PLC pomocí komunikační sběrnice zajišťuje jednoduchou a přehlednou instalaci.

Celý systém je napájen z rozvaděče pro vzduchotechniku, který obsahuje jistící prvky pro jednotlivé zařízení, napájení 24 VDC pro senzory a PLC, elektroměr pro měření spotřeby rekuperační jednotky a řadové svorky pro přehledná zakončení kabelů v rozvaděči. Jako jádro řídicího systému bylo vybráno PLC WAGO s příslušnými rozšiřujícími kartami. PLC komunikuje s jednotlivými komponenty (čidla, elektroměr, rekuperační jednotka) pomocí komunikačního protokolu Modbus RTU. Jedná se o jeden z nejrozšířenějších druhů sběrnice komunikace. Navržený systém je tedy možné používat s různými druhy komponentů od různých výrobců. Značnou výhodou použitého hardwaru je snadná rozšiřitelnost systému a integrace do nadřazených řídicích systémů budov (např. integrace do systémové elektroinstalace komunikující po sběrnici KNX, LON atd.). Při použití nucené ventilace a zejména aktivní rekuperační jednotky se může při špatném nastavení jednotky výrazně zvýšit spotřeba elektrické energie. Z tohoto důvodu byl do celého systému instalován elektroměr, který umožňuje monitorovat spotřebu elektrické energie a zároveň slouží k ověřování provozních stavů rekuperační jednotky pomocí aktuální spotřeby elektrické energie. Elektroměr byl vybrán od Italské společnosti IME, jedná se o typ CONTO D4-Pd MID, který disponuje komunikačním rozhraním Modbus RTU a umožňuje tak snadnou implementaci do řídicího systému.

Výkon rekuperační jednotky je řízen dle aktuálního otevření vzduchotechnických klapek ve čtyřech výkonových stupních (spojité řízení vzduchového množství rekuperační jednotka nedovoluje). Systém každou minutu vypočte procentuální otevření všech klapek a podle výsledné hodnoty řídí výkon jednotky. Řídicí systém také řídí teplotu přiváděného vzduchu do místnosti v závislosti na ročním období (topení/chlazení), požadované vnitřní teplotě a časovém plánu využití místnosti. Pokud je zapotřebí vychladit budovu před pracovní dobou (bez přítomnosti osob), systém nastaví nízkou vstupní teplotu do místností (např. 5 °C), což přispěje k rychlejšímu zchlazení daného prostoru. Se začátkem pracovní doby systém automaticky zvýší vstupní teplotu na požadovanou mez (např. 15 °C).

Do řídicího systému byla také implementována funkce nočního ochlazení, při které dochází k ochlazení místností díky chladnému nočnímu vzduchu. Výkon rekuperační jednotky je regulován dle otevření vzduchotechnických klapek a při tomto provozu nedochází ke zchlazení nasávaného vzduchu pomocí výměníku. Tím se výrazně sníží

spotřeba elektrické energie z důvodu vypnutého kompresoru u rekuperační jednotky. Pokud je v místnosti dosaženo požadované teploty, dojde k uzavření příslušné vzduchotechnické klapky a případnému snížení výkonu jednotky. V případě, že je vstupní teplota vyšší, než je vnitřní teplota v místnostech, dojde k vypnutí nočního chlazení, případně je možné sepnout kompresor a zchladit tak vzduch vstupující do místnosti.

Do systému byla dále implementována předpověď počasí, která vstupuje především do řízení nočního chlazení. Pokud se předpověď aktivuje, dojde ke spuštění nočního chlazení ne podle nastaveného času, ale podle nejnižší předpokládané teploty v jednotlivých nočních hodinách v rozmezí nastavené doby (např. 00:00 až 6:00). Tím dojde k nasátí vzduchu o nižší teplotě do budovy a tím k účinnějšímu chlazení. Pokud má být následující den během pracovní doby teplota nižší než nastavená mez, nedojde k sepnutí nočního ochlazování.

2.5.2 Popis vytvořeného programu

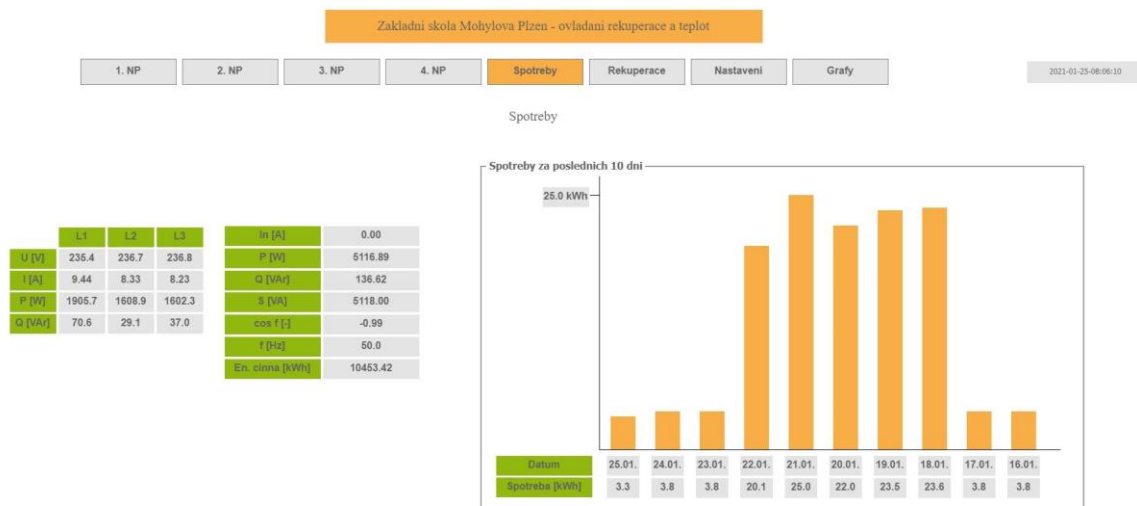
Jako jádro řídicího systému bylo vybráno PLC od společnosti WAGO, které je rozšířeno o potřebné karty. Program pro řízenou ventilaci a vytápění budovy jsem vytvořil v programovacím prostředí e!COCKPIT, které je dodávané firmou WAGO. Program byl koncipován tak, aby bylo možné systém jednoduše rozšířit a aplikovat na další podobné objekty. Díky tomu je možné rychle a efektivně provést instalaci pro různé typy budov pomocí dílčích úprav programu. Připojit se k PLC je možné pomocí webového prohlížeče na PC, mobilním telefonu nebo tabletu. Uživateli je po zadání přístupového hesla umožněno ovládání prvků dle jeho oprávnění (uživatel, servis).

Při přihlášení se uživateli zobrazí stránka pro nastavení požadovaných teplot v rámci daného patra (Obr. 2.30) pro chlazení a topení v rámci pracovní doby a mimo pracovní dobu. Dále je zde možné zvolit začátek a konec pracovní doby, ve které chce uživatel udržovat příslušnou teplotu. Uživateli je také umožněno nastavit minimální koncentraci CO₂, od které má systém začít regulovat vzduchotechnické klapky, a tím pádem přivádět čerstvý vzduch do místnosti a snižovat tak aktuální koncentraci CO₂. Pokud se koncentrace CO₂ zvýší nad maximální nastavenou mez, dojde k otevření vzduchotechnické klapky na 100 %. Pro snížení vnitřní teploty v průběhu letního období lze nastavit ještě teplotu nočního ochlazení, na kterou má systém chladit v průběhu noci. Tato nastavení je možné provádět pro každé patro zvlášť.



Obr. 2.30 Ukázka nastavení systému pro vybrané podlaží

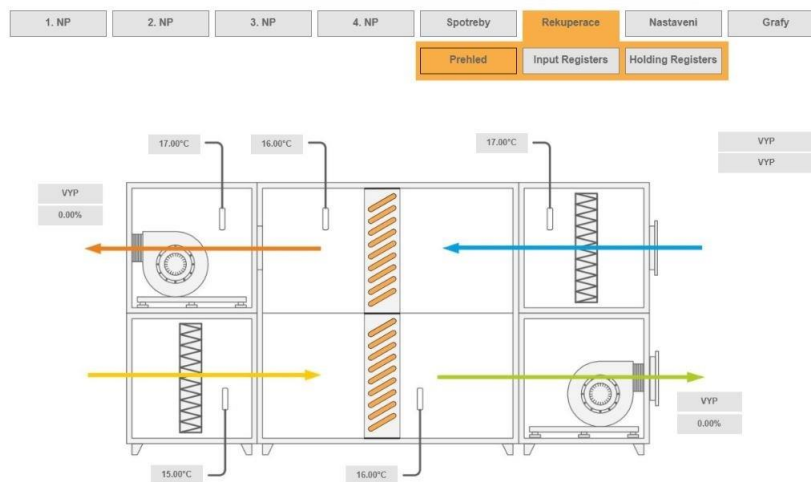
Řídicí systém umožňuje vizualizovat a ukládat spotřeby celého systému pro řízení rekuperační jednotky. Data jsou ukládána v intervalu 10 min a pro dobrou přehlednost v nákladech na provoz po jednotlivých dnech. Na Obr. 2.31 je vidět spotřeba za posledních 10 dní, která umožňuje rychlé zobrazení provozních nákladů během jednotlivých dnů. Dále jsou přenášeny hodnoty o aktuálním napětí, proudu a výkonů v jednotlivých fázích. Tyto hodnoty slouží i pro verifikování aktuálního stavu rekuperační jednotky.



Obr. 2.31 Ukázka naměřených spotřeb elektrické energie

Další okno (Obr. 2.32) uživatelského rozhraní slouží pro rychlý přehled o rekuperační jednotce. Jedná se především o zobrazení výkonu nasávaného a odváděného vzduchu a jeho

teplot. Dále je zde možné vidět aktuální stav rekuperační jednotky a teploty na výparníku a kondenzátoru. Uživatel si také může zobrazit aktuální alarmy a nastavení rekuperační jednotky.



Obr. 2.32 Schématické zobrazení stavu rekuperační jednotky (teplota a výkon)

Na Obr. 2.33 jsou zobrazeny hodnoty, které je možné nastavit pro rekuperační jednotku. Výkon rekuperační jednotky (množství přiváděného vzduchu) je regulováno automaticky pomocí vnitřní logiky PLC, kde se výkon nastavuje dle aktuálního otevření jednotlivých vzduchotechnických klapek. Výkon je řízen ve čtyřech výkonových stupních. Dále je zde možné nastavovat minimální a maximální teplotu pro chlazení a topení a také teplotu pro automatické přepínání režimu topení a chlazení.

Základní škola Molylova Plzeň - ovládání rekuperace a teplot

1. NP				2. NP				3. NP				4. NP				Spotřeby		Rekuperace		Nastavení		Grafy																							
																				Prehled		Input Registers		Holding Registers																					
000	Bus Adresa	Aktuální hodnota	Nová hodnota	30				200	Exhaust fan speed [%]	Aktuální hodnota	Nová hodnota	35.00	0.00	1100	Air Exchange Mode	Aktuální hodnota	Nová hodnota	Comfort	Comfort	1101	Cooling High Ventilation Step	Aktuální hodnota	Nová hodnota	VYP	VYP																				
100	Air Flap	1	0	201	Inlet Fan Speed [%]	35.00	0.00	1200	Cooling Temp. Setpoint	Off (no cooling)	Off (no cooling)	1201	Inlet Temp. Min. Summer	11.00	11.00	1202	Inlet Temp. Min. Winter	21.00	21.00	1203	Inlet Temp. Max. Summer	25.00	25.00	1204	Inlet Temp. Max. Winter	28.00	28.00	1205	Summer/Winter Limit	18.00	18.00														
101	Smoke Flap	1	1	202	Air Heater Capacity [%]	0.00	0.00	1206	Service Mode Select	Off	Off	2090	Key Code	0	0	1002	User Operation Mode Select	Topeni	Topeni	1003	User Ventilation Step Select	Vykon 1	Vykon 1	1004	User Temp. Setpoint [°C]	20.00	20.00	1005	Service Mode Select	Off	Off	1006	Service Mode Capacity [%]	0.00	0.00	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready						
104	Air Heat Circulation Pump	0	0	204	Compressor Capacity [%]	49.00	0.00	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready														
105	Air Heating Selected	0	0	400	Alarm Reset	0	0	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready																		
106	Air Heater Relays 1	0	0	500	Program Select	None	None	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready																		
107	Air Heater Relays 2	0	0	1001	User ON/OFF Select	ZAP	ZAP	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready																		
108	Air Heater Relays 3	0	0	1002	User Operation Mode Select	Topeni	Topeni	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready																		
109	Compressor	0	0	1003	User Ventilation Step Select	Vykon 1	Vykon 1	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready																		
111	4-way valve	0	0	1004	User Temp. Setpoint [°C]	20.00	20.00	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready																		
112	Hotgas valve - heat	0	0	1005	Service Mode Select	Off	Off	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready																		
113	Hotgas Valve - cool	0	0	1006	Service Mode Capacity [%]	0.00	0.00	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready																		
123	User Function Active	0	0	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready																		
125	Defrost Function Active	0	0	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready																		
126	Alarm Relay State	1	1	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready	1007	Req. Preset To Factory Setting	Ready	Ready																		

Obr. 2.33 Nastavení parametrů rekuperační jednotky

Hodnoty v nastavení rekuperace (Obr. 2.34) slouží pro nastavení provozního režimu celého systému (VYP/Topení/Chlazení/Automatika). Lze zde nastavit hysterezi pro topení/chlazení pomocí rekuperace a topných těles. Uživatel může také nastavit požadované otevření vzduchotechnických klapek při topení nebo chlazení. Důležitý parametr je noční ochlazování, kdy dojde v nastavených hodinách k provětrávání prostorů a tím k jejich podchlazení.

Základní škola Mohylova Plzeň - ovládání rekuperace a teplot

2021-01-25 08:21:18

Nastavení systému rekuperace

Nastavení rekuperace

Režim vzduchotechniky	Topení	Hystereze rekuperace [°C]	0.0
Nocní chlazení	VYP	Hystereze topení [°C]	1.0
Nocní chlazení začátek	04:00:00	Klapak otevření topení [%]	0
Nocní chlazení konec	06:00:00		

Obr. 2.34 Nastavení provozu systému

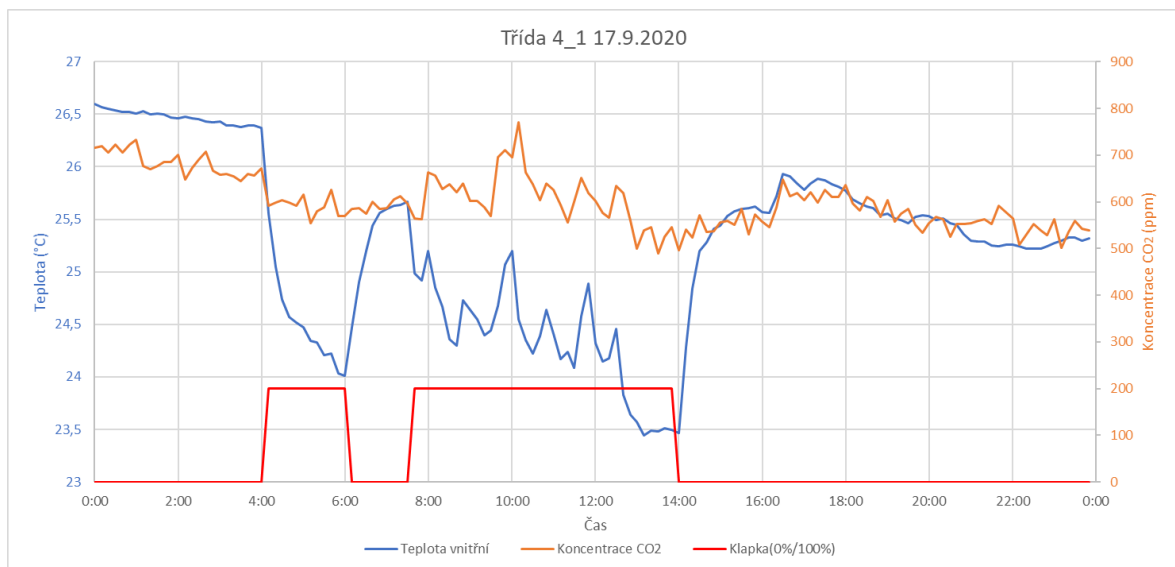
V systému lze nastavit minimální a maximální otevření rekuperačních klapek v jednotlivých místnostech v návaznosti na aktuální změřenou hodnotu koncentrace CO₂. Díky tomu je možné dodatečné přizpůsobení systému dle požadavků jednotlivé instalace. V nastavení čidel teploty, vlhkosti a koncentrace CO₂ jsou vidět aktuálně měřené hodnoty a nastavená korekce v čidle. V případě nutnosti je možné provést softwarovou korekci měřené hodnoty. Jedná se především o korekci teploty vlivem nesprávného umístění čidla.

2.5.3 Provoz navrženého systému

Řídicí systém byl spuštěn v květnu 2020 a byl postupně upravován a doplňován tak, aby co nejvíce vyhovoval potřebám základní a mateřské školy. Z důvodu přehřívání výparníku rekuperační jednotky při malém vzduchovém množství byl do řídicího systému přidán algoritmus pro automatické zvýšení výkonu ventilátorů. Tím bylo zamezeno jeho přehřátí a následné odstavení rekuperační jednotky. Nejprve byl provoz systému testován z hlediska schopnosti udržení předepsané koncentrace CO₂ (rekuperační jednotka byla primárně instalovaná za tímto účelem). Měření probíhalo kontinuálně po celý rok 2020. Vstupní teplota vzduchu do místnosti byla regulována podle požadované vnitřní teploty a provozního stavu rekuperační jednotky (topení/chlazení).

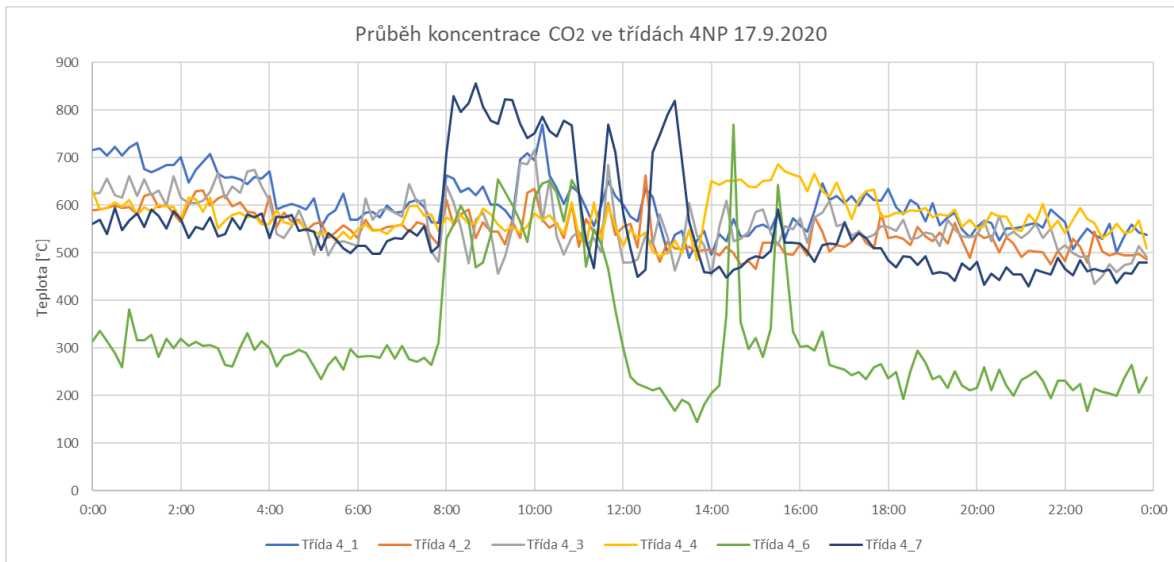
Na Obr. 2.35 je zobrazen průběh teploty a koncentrace CO₂ ve třídě 4_1 pro vybraný den. Vzduchotechnická klapka v tomto případě byla buď uzavřena (0 %) nebo plně otevřena (100 %). To bylo způsobeno tím, že byla rekuperační jednotka nastavena na chlazení a při

tomto požadavku došlo k plnému otevření vzduchotechnické klapky na přívodu a odvodu vzduchu z a do místnosti. První otevření (4:00 až 6:00) bylo způsobeno funkcí nočního provětrávání, které snížilo teplotu v místnosti z 26,4 °C na teplota 24 °C. Poté byla funkce vypnuta a další spuštění rekuperační jednotky nastalo až v 8:00, kdy měla za úkol dosáhnout teploty v místnosti 24 °C. Z průběhu teploty je vidět, že nejnižší dosažená teplota byla 23,5 °C (vypnutí chlazení při 23 °C - nastavená hystereze 1 °C). Při plném otevření klapky koncentrace CO₂ nepřekročila hodnotu 800 ppm.



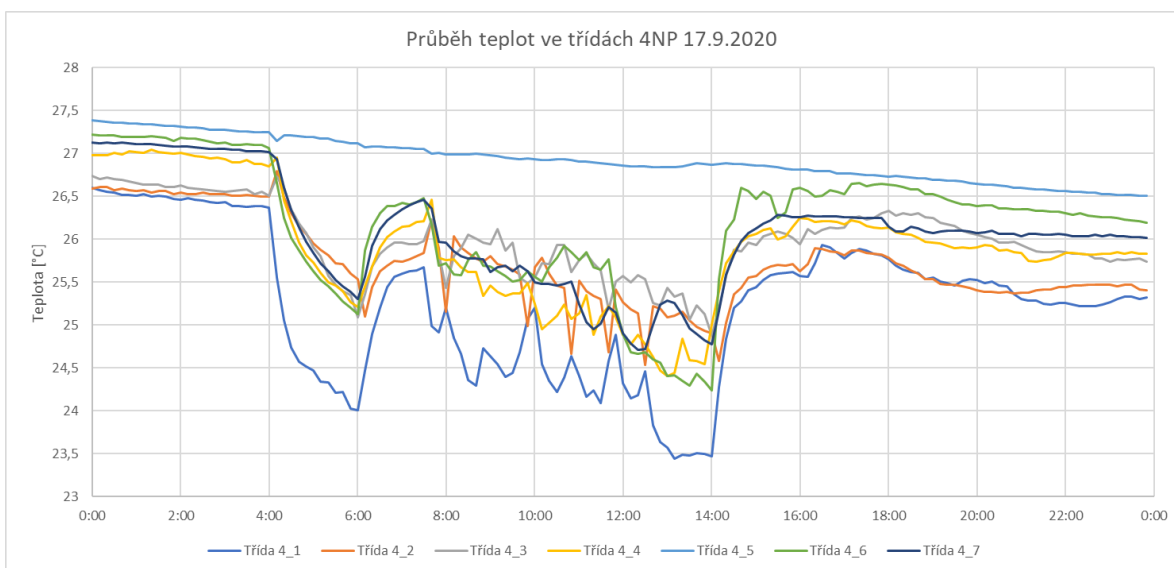
Obr. 2.35 Průběh teploty a koncentrace CO₂ ve třídě 4_1 dne 17.9.2020

Z průběhu koncentrací CO₂ ve třídách ve čtvrtém patře (Obr. 2.36) je vidět, že při plném výkonu ventilace nepřekročila hodnota koncentrace CO₂ 850 ppm. To bylo prokázáno i pro ostatní patra budovy. Navržený systém je tedy schopný dostatečným způsobem zajistit udržení koncentrace CO₂ v požadovaných limitech (1500 ppm).



Obr. 2.36 Průběh koncentrace CO₂ ve čtvrtém patře ze dne 17.9.2020

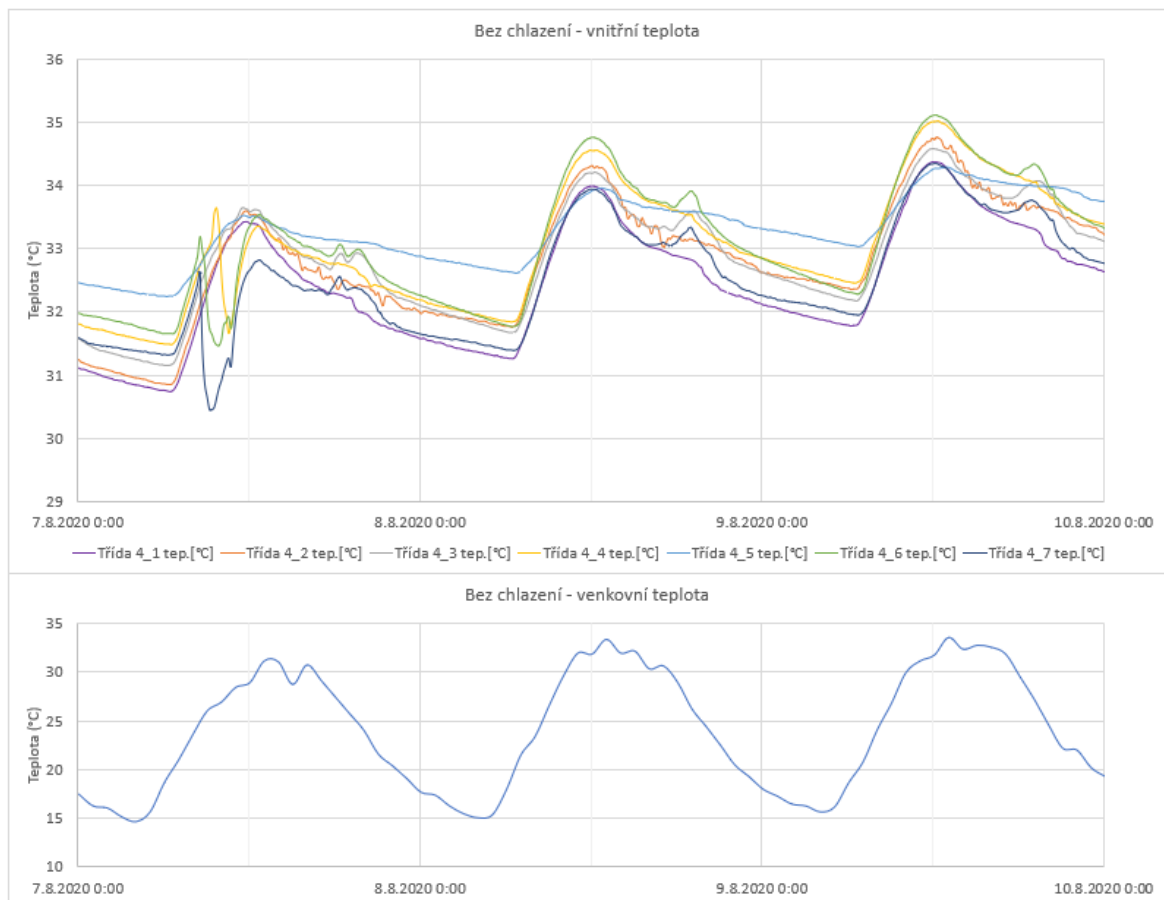
Porovnání průběhu teploty vzduchu ve třídách je zobrazeno na Obr. 2.37. Ani v jedné třídě nedošlo ke snížení teploty na 23 °C, což je dáno nízkým chladícím výkonem rekuperační jednotky. V porovnání s místností, kde není instalována vzduchotechnika (třída 4_5), však došlo ke snížení teploty vzduchu zhruba o 2 °C



Obr. 2.37 Průběh teplot ve čtvrtém patře pro den 19.9.2020

V letních měsících, kdy byla vysoká venkovní teplota, sloužila rekuperační jednotka i k chlazení vnitřních prostorů. Pro získání přehledu o tom, do jaké míry je použitá rekuperační jednotka schopna chladit vnitřní prostory, bylo provedeno měření při teplotách nad 25 °C v měsíci srpnu. Jednalo se o dobu, kdy v budově nebyly přítomny téměř žádné osoby (teplota vstupního vzduchu do místnosti byla nastavena na 5 °C). První tři dny byl

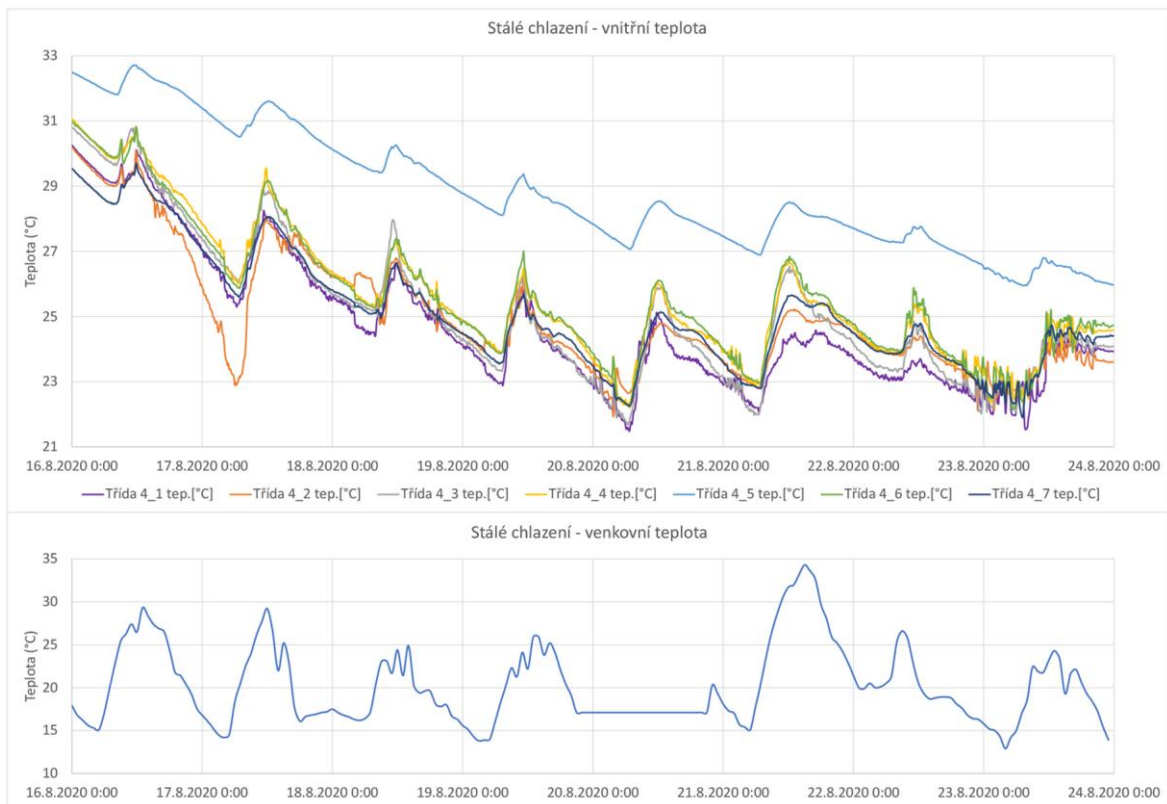
řídící systém vypnut a byly zaznamenávány hodnoty teplot v jednotlivých místnostech. Pro ukázkou byly vybrány místnosti ve čtvrtém patře, ve kterých byla měřena nejvyšší teplota. Z Obr. 2.38 je patrné, že při venkovních teplotách nad 30 °C se teplota v místnostech dostává až k teplotě 35 °C. Velký nárůst teploty v dopoledních hodinách je způsoben východní orientací oken v místnostech. Okna nejsou zastíněna žaluziemi a z tohoto důvodu jsou zde velké sluneční tepelné zisky. Pro jejich eliminaci by bylo ideální instalovat předokenní žaluzie. Z průběhu teplot je patrné, že po dvanácté hodině se teplota v místnosti začne mírně snižovat. Prudký pokles teploty 7. 8. 2020 mezi 9:00 a 9:30 ve třídách 4_4, 4_6 a 4_7 byl způsoben otevřením oken.



Obr. 2.38 Průběh teplot bez chlazení a ventilace v srpnu 2020

V dalších dnech pak probíhalo kontinuální chlazení celé budovy základní školy, kdy bylo zjišťováno, do jaké míry je možné v takto vysokých teplotách budovu chladit. Chlazení probíhalo po dobu osmi dnů. Průběhy teplot v jednotlivých místnostech a vývoj venkovní teploty je zobrazen na Obr. 2.39. Na grafu je vidět, že rekuperační jednotka není schopna účinně vychladit celý prostor budovy. Teplota v místnostech se sice snižuje, ale velice pomalu. To je dáno především vysokou hodnotou tepelné energie, která je akumulovaná v betonové konstrukci budovy. Nicméně se za tuto dobu podařilo snížit maximální teplotu

pro příslušný den z 32,6 °C na 22,6 °C. V průběhu posledního dne došlo ke snížení vnitřní teploty pod stanovenou mez 23 °C a systém začal regulovat otevření vzduchotechnických klapek.



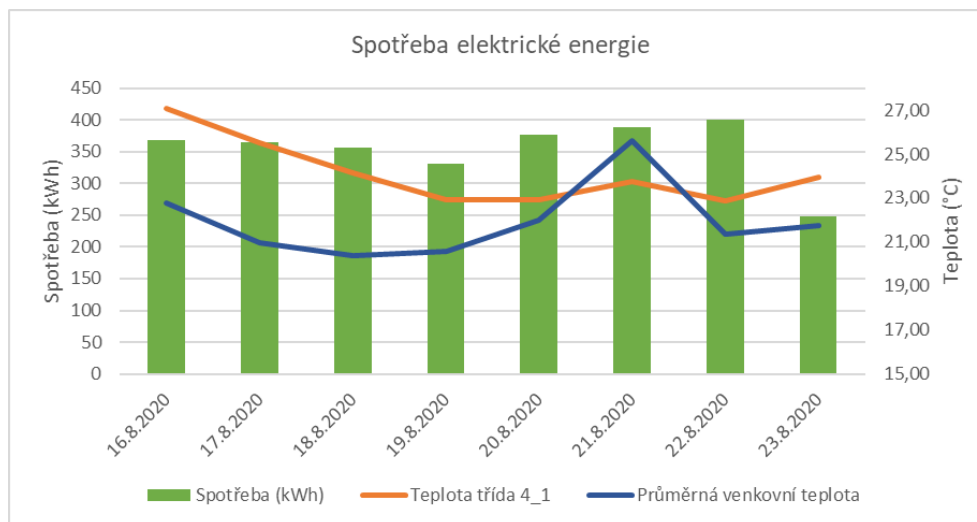
Obr. 2.39 Průběh teplot při spuštění nepřetržitého chlazení v srpnu 2020

Takovýto způsob provozování chlazení je však velice neekonomický. Pokud by měla rekuperační jednotka sloužit k účinnému chlazení celé budovy, bylo by nutné zvýšit její chladicí výkon. Další důležitým prvkem pro snížení spotřeby na chlazení by bylo účinné zastínění oken pomocí předokenních žaluzií, které by eliminovaly tepelné zisky slunečním zářením. Porovnání spotřeb v jednotlivých dnech a vývoj průměrných denních hodnot vybraných parametrů rekuperační jednotky je uveden v Tabulka 2.5.

Tabulka 2.5 Spotřeby a vývoj průměrných denní teplot při spuštění nepřetržitého chlazení

Datum	Spotřeba (kWh)	Průměrné teploty (°C)				
		Třída 4_1	Rekuperace			
		ϑ	ϑ_{venek}	ϑ_{in}	ϑ_{out}	$\Delta \vartheta$
16. 8. 2020	367,99	27,08	22,78	13,92	27,26	13,34
17. 8. 2020	363,90	25,49	20,94	13,24	25,67	12,43
18. 8. 2020	355,86	24,15	20,38	13,31	24,33	11,02
19. 8. 2020	331,31	22,90	20,57	11,98	23,45	11,47
20. 8. 2020	375,93	22,94	22,00	14,08	23,49	9,41
21. 8. 2020	388,60	23,73	25,61	17,13	23,92	6,80
22. 8. 2020	399,79	22,89	21,34	15,33	22,76	7,43
23. 8. 2020	248,10	23,93	21,77	12,51	21,39	8,88

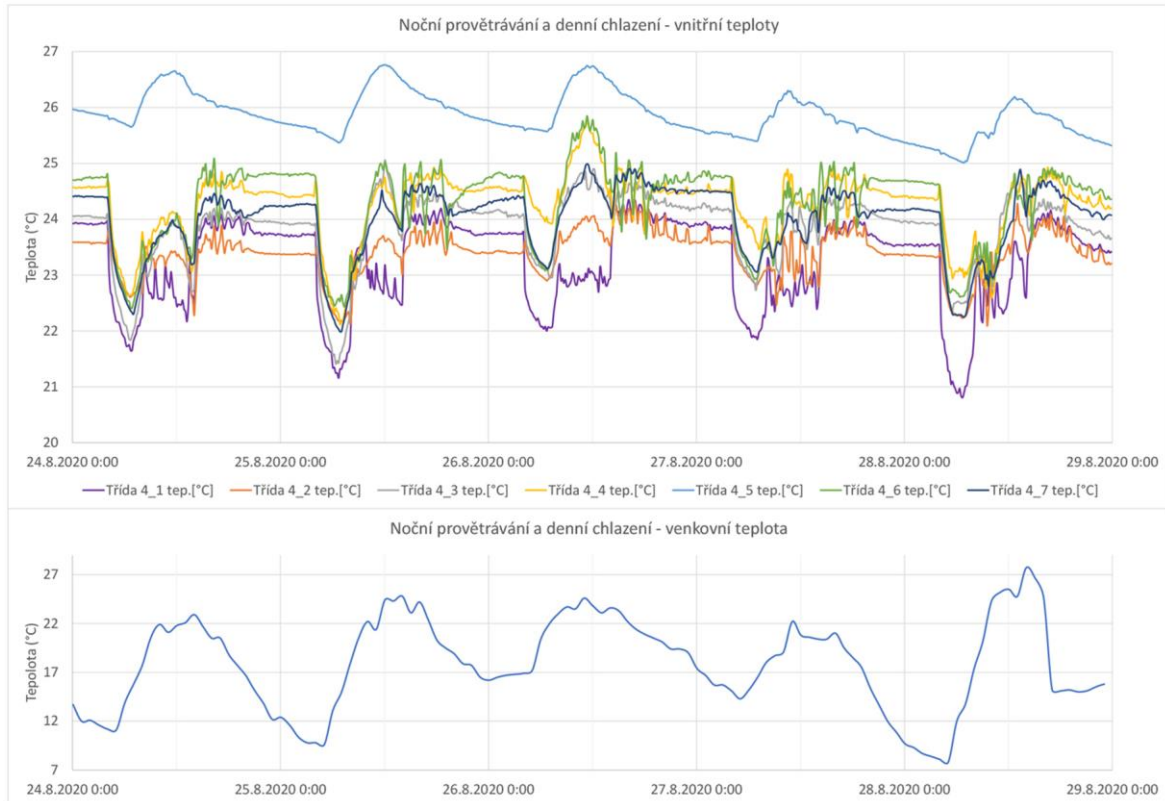
Grafické zobrazení těchto hodnot je na Obr. 2.40. Z průběhu průměrné denní teploty ve třídě 4_1 je vidět, že rekuperační jednotka snížila průměrnou denní teplotu ve třídě z 27 °C na 23 °C.



Obr. 2.40 Spotřeba el. energie a vývoj teplot při spuštění nepřetržitého chlazení

Dalším krokem bylo ověření, do jaké míry může ovlivnit teplotu v místnostech noční provětrávání. Jedná se o nucenou výměnu vzduchu v nočních hodinách, kdy je venkovní teplota vzduchu nižší než vnitřní teplota. Pokud je v místnosti dosažena požadovaná teplota, dojde k uzavření vzduchotechnické klapky pro příslušnou místnost. V případě zvýšení teploty v časovém intervalu nočního chlazení se chlazení místnosti opět aktivuje. V našem případě bylo noční provětrávání nastaveno od 4:00 do 8:00. Na tento interval plynule navazovala pracovní doba, kdy byl požadavek na udržování vnitřní teploty do 23 °C. Z Obr. 2.41 je patrné, že se v měřeném intervalu podařilo udržet tuto maximální teplotu v místnosti jen ve třídě 4_1. V ostatních místnostech docházelo k překročení této hodnoty až o 2,5 °C. Při porovnání místností s rekuperací vzduchu a místností bez

rekuperace (Třída 4_5) je patrné, že teplota v místnosti bez rekuperace vzduchu je zhruba o 2 °C vyšší. V průběhu dne však dochází i k jejímu částečnému chlazení, díky společným stěnám s chlazenými místnostmi.



Obr. 2.41 Průběh teplot při nočním ochlazování a denním chlazení

Pokud se zaměříme na oblast nočního provětrávání, zjistíme, že při spuštění tohoto procesu dojde k poměrně prudkému snížení vnitřní teploty. Systém byl nastaven tak, aby vychladil místnost na hodnotu 21 °C. To se mu téměř podařilo jen poslední den, kdy se při venkovní teplotě 7 °C dostala teplota ve třídě 4_1 pod hodnotu 21 °C. Dále je z průběhu venkovní teploty patrné, že byla chybně zvolena doba nočního provětrávání, jelikož od 5:00 nastávalo zvyšování venkovní teploty. Interval by bylo tedy výhodnější posunout a začít s provětráváním už o půlnoci. Tím by bylo možné účinněji chladit vnitřní prostory a přiblížit se tak požadované vnitřní teplotě 21 °C.

Po zjištění tohoto problému s časovým nastavením nočního ochlazování byla do systému implementována předpověď venkovní teploty, díky které je možné optimalizovat dobu chodu nočního provětrávání. Předpověď dále umožňuje rozhodovat o spuštění nočního chlazení v závislosti na aktuální vnitřní a venkovní teplotě a také s ohledem na předpokládanou venkovní teplotu v průběhu pracovní doby. Předpověď na následující den

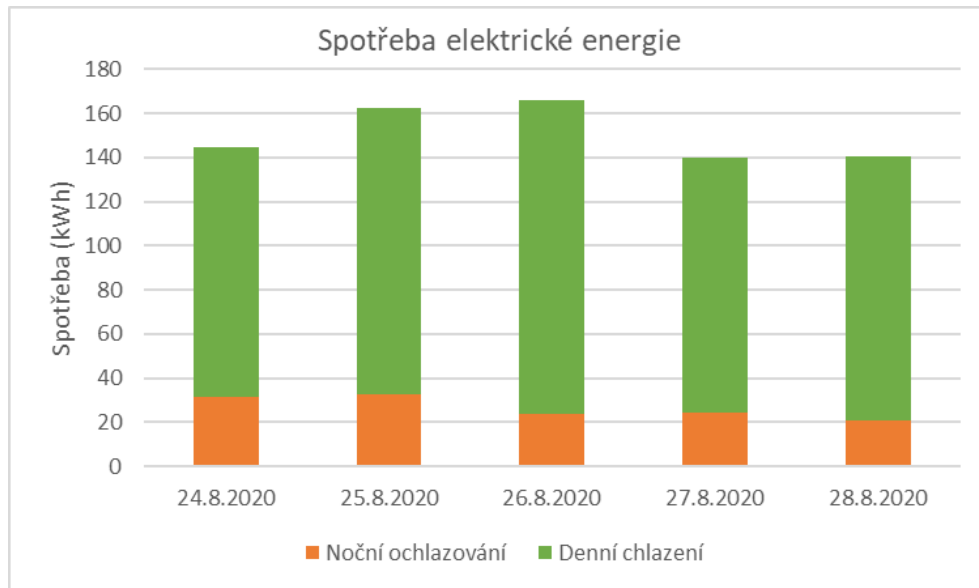
je načítána vždy o půlnoci. Systém stanoví, kolik hodin je v rámci pracovní doby venkovní teplota nad nastaveným limitem teploty. Tato hodnota se následně porovná s maximální nastavenou dobou venkovních teplot. Při překročení této hodnoty se automaticky aktivuje proces nočního ochlazování budovy. Systém dále rozhoduje o tom, kdy bude toto ochlazování probíhat dle aktuální venkovní teploty. Při teplotách nižších, než je nastavená mez dojde v nočních hodinách k automatickému sepnutí ochlazování.

Implementace této funkce je důležitá zejména pro automatický chod navrženého řídicího systému. V přechodném období (na jaře a na podzim) bylo problematické hlídat, kdy se má funkce ochlazování spustit. I přes častou kontrolu systému a jeho nastavování nebylo možné pro každý den zajistit správnou funkčnost. Při nízkých venkovních teplotách docházelo k nežádoucímu podchlazování budovy, naopak při vypnuté funkci a vysokých denních teplotách bylo vhodné tuto funkci použít. Díky automatickému chodu na základě výše uvedených podmínek dojde k přesnějšímu řízení nočního ochlazování, k minimalizaci provozních nákladů a ke zvýšení uživatelského komfortu. Informace o spotřebách rekuperační jednotky při nočním ochlazování (4:00 až 8:00) a denním chlazení (8:00-14:00) jsou zobrazeny v Tabulka 2.6.

Tabulka 2.6 Spotřeby při nočním provětrávání a denním chlazení

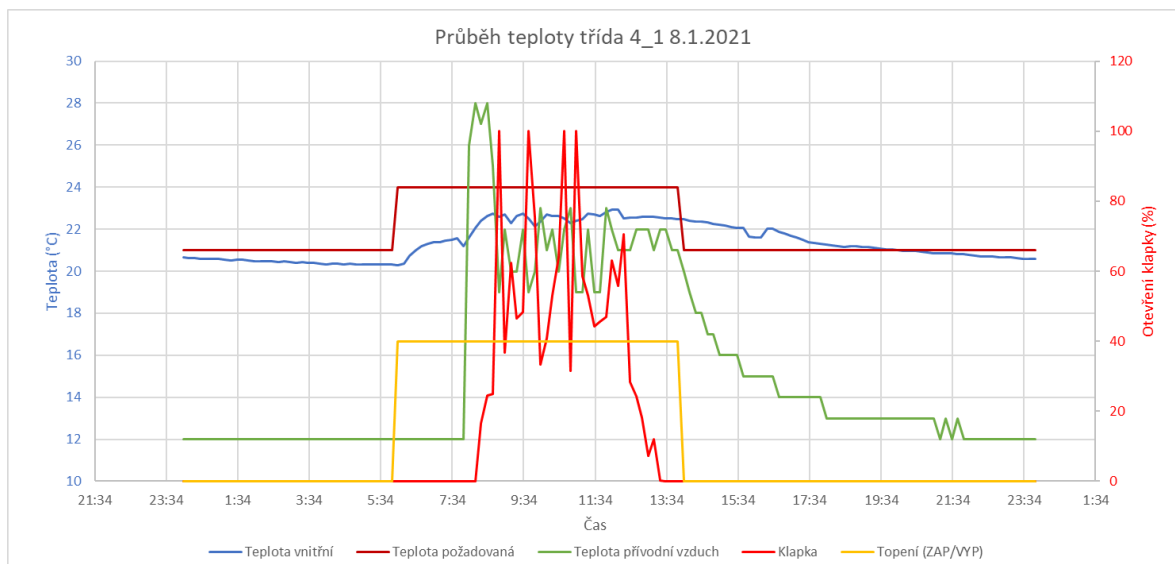
Datum	Spotřeba (kWh)			Teploty – noční ochlazování (°C)					
	Den	Noční větrání	Denní chlazení	Rekuperace			Třída 4_1		
	0 až 24	4 až 8	8 až 14	ϑ_{in}	ϑ_{out}	$\Delta \vartheta$	ϑ_{start}	ϑ_{stop}	$\Delta \vartheta$
24. 8. 2020	144,83	31,65	113,18	11,42	21,17	9,75	23,97	22,21	1,76
25. 8. 2020	162,36	32,79	129,57	10,04	20,67	10,63	23,77	21,63	2,14
26. 8. 2020	166,11	23,89	142,22	16,46	22,04	5,58	23,78	22,70	1,08
27. 8. 2020	140,00	24,25	115,75	14,88	21,83	6,96	23,89	22,25	1,64
28. 8. 2020	140,44	20,78	119,66	12,33	20,54	8,21	23,54	21,58	1,96

Spotřeba se v těchto dnech pohybovala mezi 140 až 166 kWh. Průměrná teplota ve vybrané třídě 4_1 se při spuštění nočního ochlazování snížila průměrně z teploty 23,8 °C na teplotu 22,1 °C. Průměrná spotřeba nočního ochlazování činila 26,67 kWh. Rozdělení spotřeby elektrické energie mezi noční ochlazování a denní chlazení je zobrazeno na Obr. 2.42.



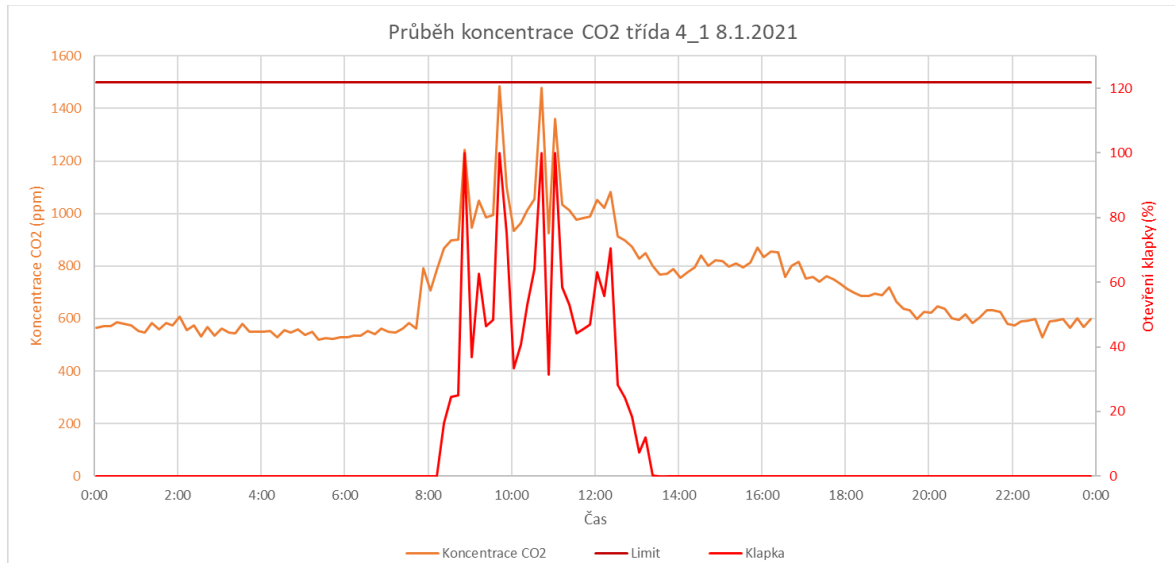
Obr. 2.42 Poměr spotřeb nočního ochlazování a denního chlazení

Provoz navrženého systému byl monitorován i v zimních měsících. Požadovaná teplota v pracovní době byla nastavena na 24 °C a mimo pracovní dobu na 21 °C. Při prvních testech bylo zjištěno, že při nízkých teplotách není schopna rekuperační jednotka dostatečně ohřát studený venkovní vzduch na teplotu vyšší než 24 °C. Z tohoto důvodu byla rekuperační jednotka spouštěna jen dle aktuální koncentrace CO₂ v místnostech. O vytápění místnosti se staraly radiátorová tělesa osazené servopohony. Průběh teploty ve vybraný den je zobrazen na Obr. 2.43.



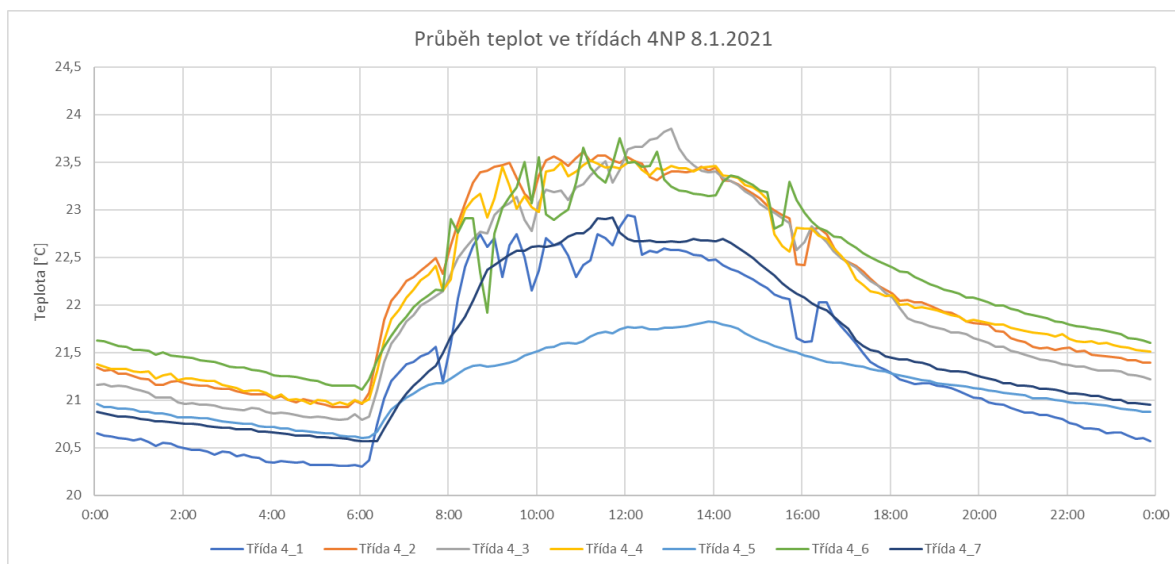
Obr. 2.43 Průběh teplot při zimním provozu

Na Obr. 2.44 je zobrazen průběh koncentrace CO₂. Systém začíná regulovat otevření vzduchotechnických klapek od hodnoty 800 ppm a při hodnotě 1200 ppm je klapka již plně otevřena.



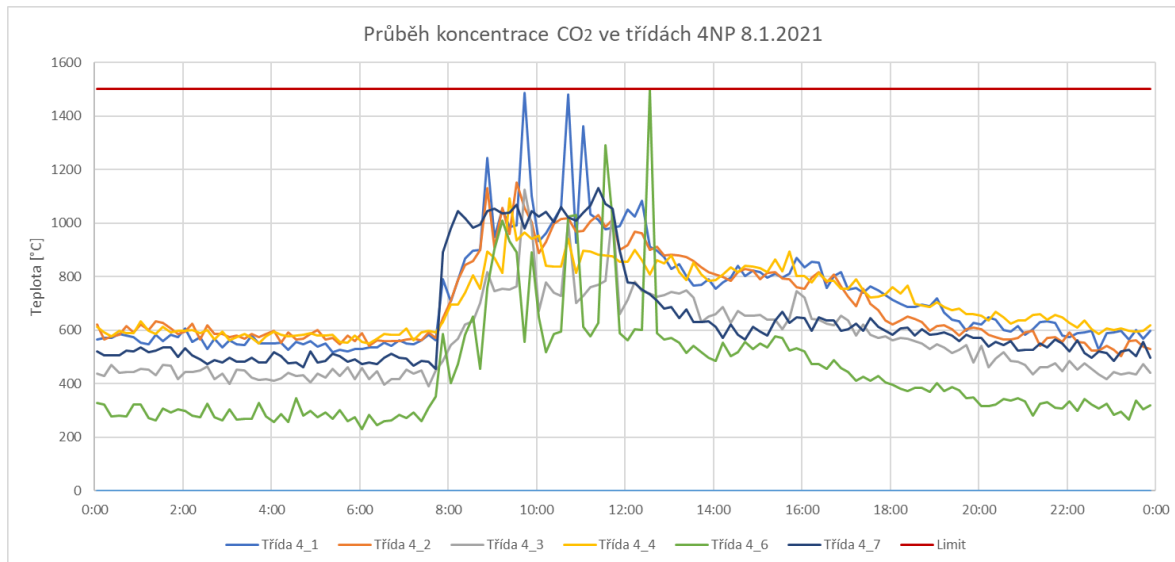
Obr. 2.44 Průběh koncentrace CO_2 při zimním provozu

Porovnání průběhu teploty pro jednotlivé třídy ve čtvrtém patře je zobrazeno na Obr. 2.45. V žádné ze tříd nebylo dosaženo požadované teploty $24\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro dosažení této teploty by bylo nutné zvýšit požadovanou teplotu mimo pracovní dobu nebo posunout začátek pracovní doby. Další možností je přenastavení ekvitermního regulátoru pro regulaci otopné vody (teplo je to objektu školy dodáváno pomocí výměňkové stanice od Plzeňské teplotérenské, a.s.).



Obr. 2.45 Průběh teplot ve čtvrtém patře při zimním provozu

Obr. 2.46 zobrazuje průběh koncentrace CO_2 pro tyto vybrané třídy. Navržený systém i v tomto případě dokázal zajistit koncentraci CO_2 pod požadovaným limitem (1500 ppm).



Obr. 2.46 Průběh koncentrace CO₂ ve čtvrtém patře při zimním provozu

2.5.4 Shrnutí poznatků a přínosů

Dlouhodobé monitorování navrženého systému prokázalo jeho vhodnost pro udržování koncentrace CO₂ v požadovaném limitu. Co se týče účinného chlazení, systém naráží na limity použité rekuperační jednotky, která nedisponuje dostatečným výkonem pro chlazení celé budovy za vysokých venkovních teplot. Tato jednotka ovšem nebyla navrhována pro chlazení celé budovy, proto jsem s tímto výsledkem počítal. Při dlouhodobém chlazení rekuperační jednotkou lze snížit teplotu vnitřních prostor na hodnotu kolem 24 °C.

Důležitým poznatkem z tohoto systému je to, že řízení nočního ochlazování v letních měsících v mnoha případech nebylo při nejnižší venkovní teplotě. Systém byl proto rozšířen o předpověď venkovní teploty, podle které je řízen interval nočního ochlazování tak, aby probíhalo vždy při nejnižších nočních teplotách. Samotné spuštění této funkce je navíc závislé na predikci venkovní teploty a osvětlení v průběhu pracovní doby, při nízkých venkovních teplotách a zatažené obloze nedojde v letních měsících k aktivaci funkce nočního ochlazování.

Měření prokázalo, že danou aplikaci by bylo vhodné kombinovat s instalací FVE, která by výrazně pomohla snížit provozní náklady spojené s provozem rekuperační jednotky. Bližší rozbor dané problematiky je uveden v kapitole 3.2.

2.6 Optimalizace chodu tepelného čerpadla

Instalace tepelných čerpadel jako primárního zdroje vytápění je stále častější v bytových i komerčních objektech. U tepelných čerpadel vzduch – voda je topný faktor (COP) značně závislý na venkovní teplotě vzduchu a tím dochází ke zvyšování provozních nákladů spojených s provozem těchto zařízení. Proto je snahou chod tepelných čerpadel optimalizovat. Touto problematikou se zabývá literatura [18, 21]. Výrobci tepelných čerpadel ve většině případů tuto optimalizaci chodu TČ nevyužívají (například řízení dle předpovědi počasí). Standardně se u řídicího systému TČ využívá ekvitermní regulace.

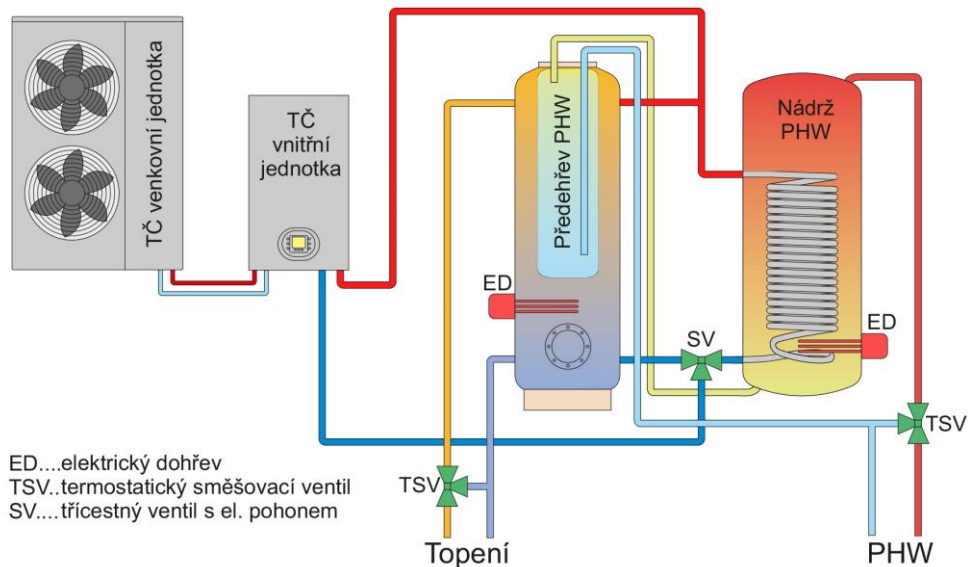
V první fázi této optimalizace jsem se zaměřil na implementaci předpovědi počasí a využití akumulární schopnosti objektu. Pro správnou funkci jsem si zvolil základní předpoklady, které by měl daný objekt splňovat. Jedná se o následující konfiguraci:

- objekt s velkou schopností akumulace tepelné energie
- tepelné čerpadlo vzduch – voda
- teplovodní podlahové vytápění

Tepelné čerpadlo vzduch-voda by mělo být v ideálním případě osazené scroll kompresorem (s fixními otáčkami). V případě použití invertorového tepelného čerpadla, které používá dvojitý rotační kompresor, by docházelo k řízení výkonu v průběhu regulačního cyklu a nemusely by případné predikce dodávaného výkonu TČ být úplně přesné.

Otopný systém musí být založen na podlahovém teplovodním vytápění, díky kterému je možné využít akumulární schopnosti podlahy (betonu). Zároveň je vhodné instalovat akumulární nádobu pro otopnou soustavu, která je schopna vyrovnat případné nepřesnosti systému. V rozdělovačích podlahového topení musí být umístěny servopohony a musí být připojeny k řídicímu systému. Díky tomu je možné regulovat průtok podlahovým vytápěním v jednotlivých větvích a zároveň mít zpětnou vazbu o době sepnutí servopohonu.

V ideálním případě je vhodné instalovat v jednotlivých místnostech prostorové termostaty (ideálně na sběrnici KNX nebo Modbus). Díky tomu je možné využít zpětnou vazbu přímo z místností a rychleji tak reagovat na pokles teploty pod komfortní hodnotu. Příklad zjednodušeného schéma otopného systému je zobrazeno na Obr. 2.47.



Obr. 2.47 Zjednodušené schéma otopného systému testovaného objektu

2.6.1 Popis systému

Z důvodu správné funkce optimalizace chodu tepelného čerpadla a jeho začlenění do reálného objektu, bylo nezbytné vytvořit systém, který by umožnil co nejlépe se tomuto objektu přizpůsobit. Zároveň byl brán ohled na to, aby bylo zadávání vstupních parametrů co možná nejjednodušší a bylo ho možné bez jakýkoliv problémů instalovat do různých objektů. Pro zpřesnění předpokládané venkovní teploty během dne bylo nezbytné do navrženého systému implementovat předpověď počasí, která by respektovala místo instalace.

Na základě vymyšlené struktury regulace jsem stanovil parametry, které jsou nezbytné pro správné nastavení systému regulace. V první řadě je nutné specifikovat tepelnou ztrátu objektu spolu s vnitřní a vnější výpočtovou teplotou nebo měrnou tepelnou ztrátou objektu. Zpravidla k tomu slouží projektová dokumentace objektu. Díky tomu je možné přibližně predikovat tepelnou ztrátu při jednotlivých venkovních teplotách a vypočítat potřebné množství tepelné energie, které je nutné dodat do objektu, aby bylo dosaženo požadovaného tepelného komfortu. Vzhledem k tomu, že systém byl testován na reálném objektu (nová budova) v rámci polyfunkčního areálu v Domažlicích uvádím přímo parametry pro tento objekt.

Z projektové dokumentace otopného systému byly zjištěny následující parametry (Tabulka 2.7), které jsou nezbytné k zadání do navrženého systému regulace. Uživatel může zadat přímo měrnou tepelnou ztrátu objektu nebo zadá projektovanou tepelnou ztrátu s vnitřní a vnější výpočtovou teplotu a systém poté vypočte měrnou tepelnou ztrátu dle vztahu (2.6.1).

Tabulka 2.7 Teplotní parametry objektu

Popis	Označení	Jednotka	Hodnota
Projektovaná tepelná ztráta	Φ	W	13500
Výpočtová teplota venkovní	ϑ_e	°C	-15
Výpočtová teplota vnitřní	ϑ_i	°C	20
Měrná tepelná ztráta	H	W/K	385,71

$$H = \frac{\Phi}{\vartheta_i - \vartheta_e} \quad (\text{W/K}) \quad (2.6.1)$$

Dalším nezbytným parametrem je zadání tepelného výkonu tepelného čerpadla při různých venkovních teplotách. Výrobci tepelných čerpadel zpravidla udávají nominální tepelný výkon při různých teplotách. Díky tomu je možné zadat do systému jednotlivé body výkonové křivky tepelného čerpadla při příslušné výstupní teplotě otopné vody (v našem případě uvažováno 35 °C). Parametry použitého tepelného čerpadla (Carrier 38AW 150H9 + 80AWH 150T9) dle příslušných technických listů pro výstupní teplotu otopné vody 35 °C jsou uvedeny v Tabulka 2.8 [48]. Jedná se o tepelné čerpadlo, které disponuje dvojitým rotačním kompresorem (dochází k řízení výkonu TČ), což není pro náš případ úplně ideální.

Tabulka 2.8 Parametry TČ Carrier 38AW při výstupní teplotě otopné vody 35 °C

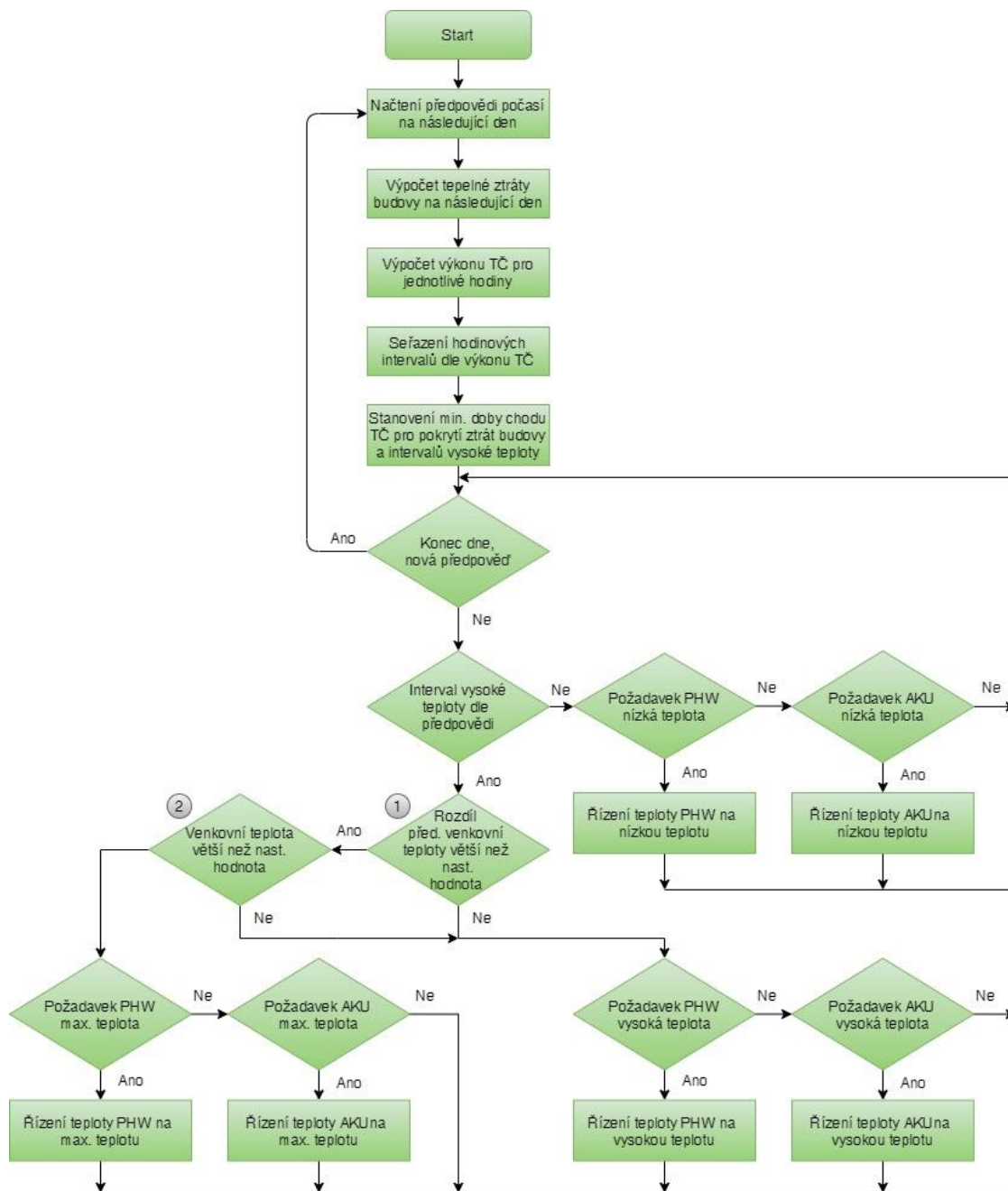
Venkovní teplota (°C)	-20	-15	-7	-3	0	2	7	10	20
COP nominal (-)	1,74	2,19	2,97	2,99	3,01	3,15	4,3	4,96	6
Výkon (kW)	5,54	6,25	8,85	8,88	8,93	9,5	15	16,13	20,24

Na základě zadaných bodů systém vypočte pomocí lineární aproximace výkon tepelného čerpadla při příslušné venkovní teplotě. Tím systém vytvoří výkonovou křivku TČ pro jednotlivé teploty.

Navržený způsob řízení TČ je pro lepší orientaci zobrazen na vývojovém diagramu (Obr. 2.48). V praxi systém funguje tak, že se o půlnoci načte předpověď počasí na příslušný

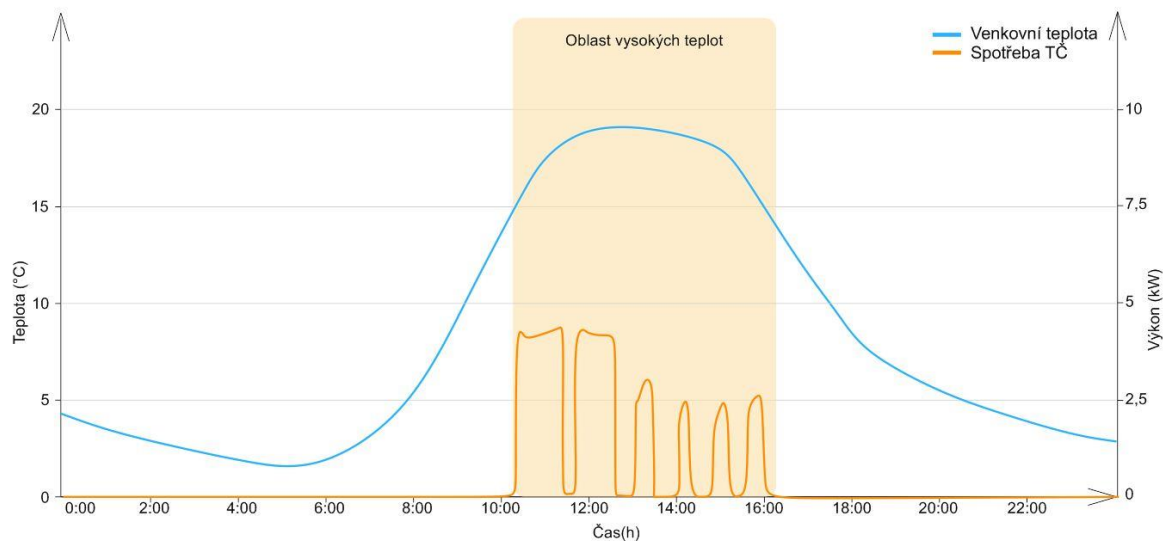
časový interval (24 hodin) v hodinových krocích (blíže popsáno v 2.2.2). Na základě informace z předpovědi venkovní teploty pro danou hodinu ϑ_{i_i} a maximální nastavené vnitřní teploty ϑ_{e_i} (například dle časových intervalů) systém vypočte množství tepelné energie E_t , které je potřeba dodat otopným systémem do objektu, aby byla dosažena/udržena komfortní teplota, dle rovnice (2.6.2).

$$E_t = \sum_{i=1}^{24} H (\vartheta_{i_i} - \vartheta_{e_i}) \quad (Wh) \quad (2.6.2)$$



Obr. 2.48 Zjednodušený vývojový diagram pro řízení TČ

Dále systém provede v hodinových krocích výpočet energie, které je tepelné čerpadlo schopno dodat do otopného systému za uvažovaný časový interval. Vypočtené hodnoty seřadí od nejvyšší venkovní teploty po nejnižší a následně sčítá tyto energie do nejvyšší teploty do té doby, než suma výroby tepelného čerpadla převyší vypočtenou spotřebu objektu dle vztahu (2.6.2). Až se tak stane, hodinové intervaly použité pro tento výpočet představují výhodné časy pro chod čerpadla (interval vysokých teplot), a proto bude v těchto intervalech jeho chod upřednostňován (vyšší teplota v nádrži na PHW a vytápění). Ukázka posunu chodu TČ s dvojitým rotačním kompresorem do oblasti vysokých teplot je zobrazena na Obr. 2.49.



Obr. 2.49 Zobrazení posunu chodu TČ s dvojitým rotačním kompresorem do oblasti vyšších teplot dle predikce počasí

Systém zvolí příslušný časový interval dle aktuálního času a rozhodne, zda se jedná o interval vysokých teplot dle předpovědi. Pokud ne, udržuje teplotu PHW a akumulární nádrže pro topení na nízké teplotě. Pokud se jedná o interval vysokých teplot (Obr. 2.48 - bod 1), dojde k vypočtení rozdílu minimální a maximální hodnoty předpovídané venkovní teploty. Pokud je tato hodnota vyšší než nastavený limit a pokud je aktuální venkovní teplota vyšší než nastavená (Obr. 2.48 - bod 2), dojde k regulaci teploty nádrže PHW a akumulární nádrže pro topení na maximální nastavenou hodnotu (např. 40 °C).

Zároveň v oblasti s nejvyšší venkovní teplotou dá systém povel tepelnému čerpadlu k ohřevu PHW (např. 55 °C). Při ohřevu PHW tepelné čerpadlo pracuje na poměrně vysokou teplotu výstupní vody, což se projeví horším COP. Z tohoto důvodu je vhodné, aby ohřev PHW byl realizován při co nejvyšší venkovní teplotě a byl v co nejvyšší míře využit potenciál tepelného čerpadla. Nicméně i do ohřevu PHW je integrována funkce pro udržení

minimální teploty PHW s ohledem na udržení uživatelského komfortu. Při poklesu teploty na nádrži PHW pod stanovenou mez (např. 45 °C) dojde k sepnutí ohřevu pomocí tepelného čerpadla a udržení teploty na minimální úrovni teploty PHW.

Pokud dojde k výpadku internetového připojení a systém není schopen načíst předpověď venkovní teploty ze serveru, přechází regulace spínání tepelného čerpadla do off-line predikce venkovní teploty, která je blíže popsána v kapitole 2.2.1. Průběhy průměrných teplot během dne pro jednotlivé měsíce jsou nahrány do vnitřní paměti PLC.

Systém dále zaznamenává reálně dodanou energii tepelným čerpadlem v jednotlivých dnech a provede srovnání s předpovídanou spotřebou objektu. Díky tomu je možné stanovit a průběžně zpřesňovat koeficient tepelné ztráty objektu, který respektuje odchylku předpovídané spotřeby objektu od reálné. Tato odchylka je způsobena například rozdílným způsobem větrání objektu či kvalitou provedení stavební konstrukce objektu. Tím dochází k neustálému zpřesňování výpočtu požadované tepelné energie. Vzorec (2.6.2) je upraven o koeficient k , který tuto odchylku zohledňuje (2.6.3).

$$E_t = k \sum_{i=1}^{24} H (\vartheta_{in_i} - \vartheta_{out_i}) \quad (Wh) \quad (2.6.3)$$

Systém disponuje díky předpovědi počasí také funkcí předtopení podlahového topení. Tato funkce byla integrována proto, že zejména u větších objektů (např. bytových domů) při prudkém poklesu teplot trvá poměrně dlouhou dobu, než otopný systém vytopí objekt na komfortní teplotu. Tepelné čerpadlo musí být potom nepřetržitě v provozu a má problém dodat potřebný výkon. Hlavní myšlenka předtopení podlahového topení spočívá v tom, že systém sleduje předpověď počasí na následující den a porovná průměrnou teplotu aktuálního dne s průměrnou teplotou následujícího dne. Zároveň systém zaznamenává v průběhu celého provozu, zda byly jednotlivé servopohony v rozdělovačích podlahového topení v předchozích hodinách (dnech) sepnuty. Jestliže je pokles teploty mezi průměrnou teplotou aktuálního dne a průměrnou teplotou na následující den vyšší než 5 °C a zároveň servopohony pro jednotlivé otopné okruhy nebyly sepnuty, tak dojde k otevření servopohonů dopředu i když systém nemá požadavek na topení v jednotlivých topných okruzích. Tím dojde ke zvýšení teplot v dané místnosti maximálně o 1 °C. Tato funkce má největší význam např. na podzim, když dochází k prvnímu natopení objektu při prudkém poklesu teplot.

2.6.2 Testovací provoz

Jak už bylo zmíněno výše, navržený řídicí systém byl testován pro vytápění nové budovy v rámci polyfunkčního areálu v Domažlicích (Obr. 2.50). Otopný systém sestává z tepelného čerpadla vzduch-voda Carrirer (38AW 150H9 + 80AWH 150T9), akumulární nádrže otopného systému (celkový objem 1000 l, integrovaný předehřev PHW 200 l), akumulární nádrže PHW (objem 500 l) a teplovodního podlahového vytápění. Technická místnost je zobrazena na Obr. 2.51. Konstrukčně je budova tvořena betonovými tvárnicemi s polystyrenem (10 cm), což je vhodné z hlediska naší instalace díky dobré akumulární schopnosti budovy.



Obr. 2.50 Pohled na polyfunkční areál v Domažlicích



Obr. 2.51 Technická místnost budovy

Tato budova disponuje rozsáhlým měřicím systémem, díky kterému je možné ověřit jednotlivé návrhy v reálné aplikaci. Přehledové schéma měřicího systému je zobrazeno na Obr. 2.53. Hlavní řídicí jednotku tvoří PLC od společnosti WAGO, které zajišťuje komunikaci mezi jednotlivými částmi systému, vizualizace a komunikaci se serverem pro předpověď počasí. V rozvaděči technické místnosti jsou umístěny analyzátoři sítě a elektroměry, které měří vybrané elektrické okruhy (jednotlivé sekce, tepelné čerpadlo, nabíjecí stanice elektromobilu, celkovou spotřebu budovy) a jsou propojeny pomocí sběrnice Modbus RTU. Dále je do systému připojen přes sběrnici Modbus TCP/IP analyzátor sítě, který měří elektrické veličiny celého objektu (umístěný v administrativní budově). Vybrané části elektrického rozvaděče jsou zobrazeny na Obr. 2.52.

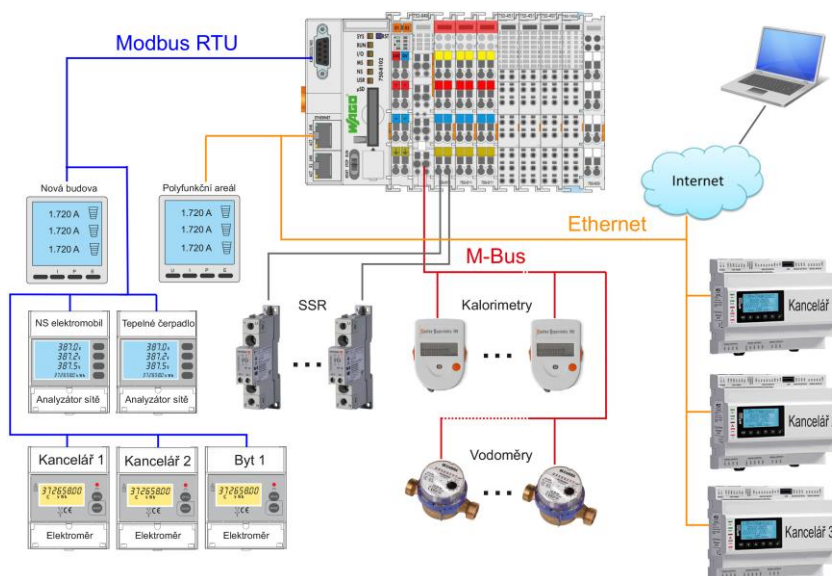
Systém je rozšířen o kalorimetry a vodoměry, které pomocí sběrnice M-bus komunikují s hlavním řídicím PLC WAGO. Díky použitým kalorimetrům je možné monitorovat spotřebu tepla v jednotlivých sekcích a výstupní parametry z tepelného čerpadla (průtok, výkon, spotřeba, vstupní a výstupní teplota). V každé sekci budovy je

osazeno PLC od společnosti EVCO, které řídí teplotu v jednotlivých místnostech. K tomuto PLC jsou připojena odporová teplotní čidla a servopohony. Komunikace mezi tímto PLC a hlavním řídicím PLC WAGO probíhá pomocí protokolu Modbus TCP/IP. Do systému je připojena také meteorologická stanice, která komunikuje s PLC WAGO prostřednictvím protokolu Modbus TCP/IP.



Obr. 2.52 Rozmístění měřících prvků v rozvaděči

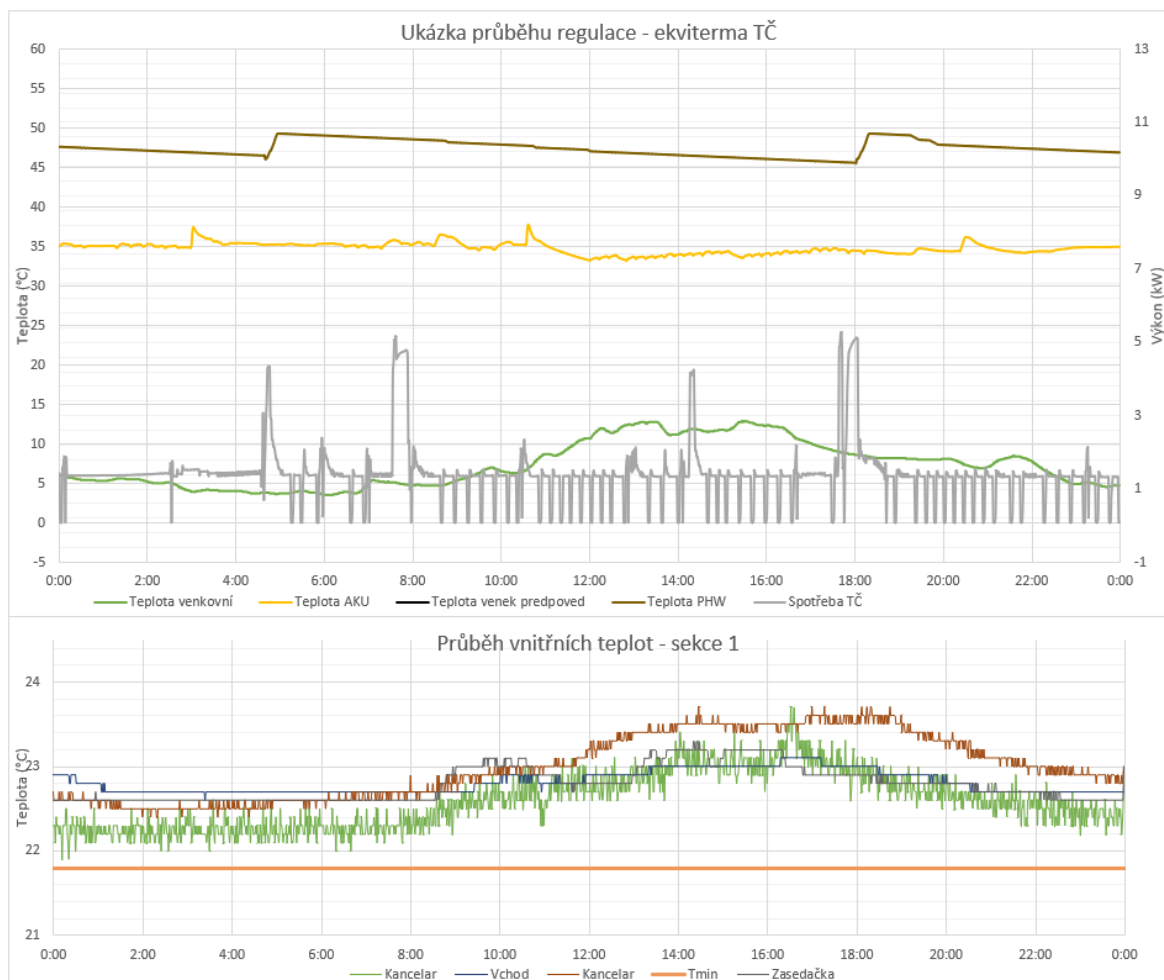
V rámci testovacího provozu byly porovnány jednotlivé způsoby nastavení regulace TČ. Nejdříve byl otestován stávající systém regulace podle nastavené ekvitemní křivky, poté regulace na konstantní výstupní teplotu a dále mnou navržený způsob regulace dle intervalů vyšších teplot s implementovanou předpovědí teploty.



Obr. 2.53 Znáornění propojení jednotlivých prvků systému

Ekvitermní regulace TČ

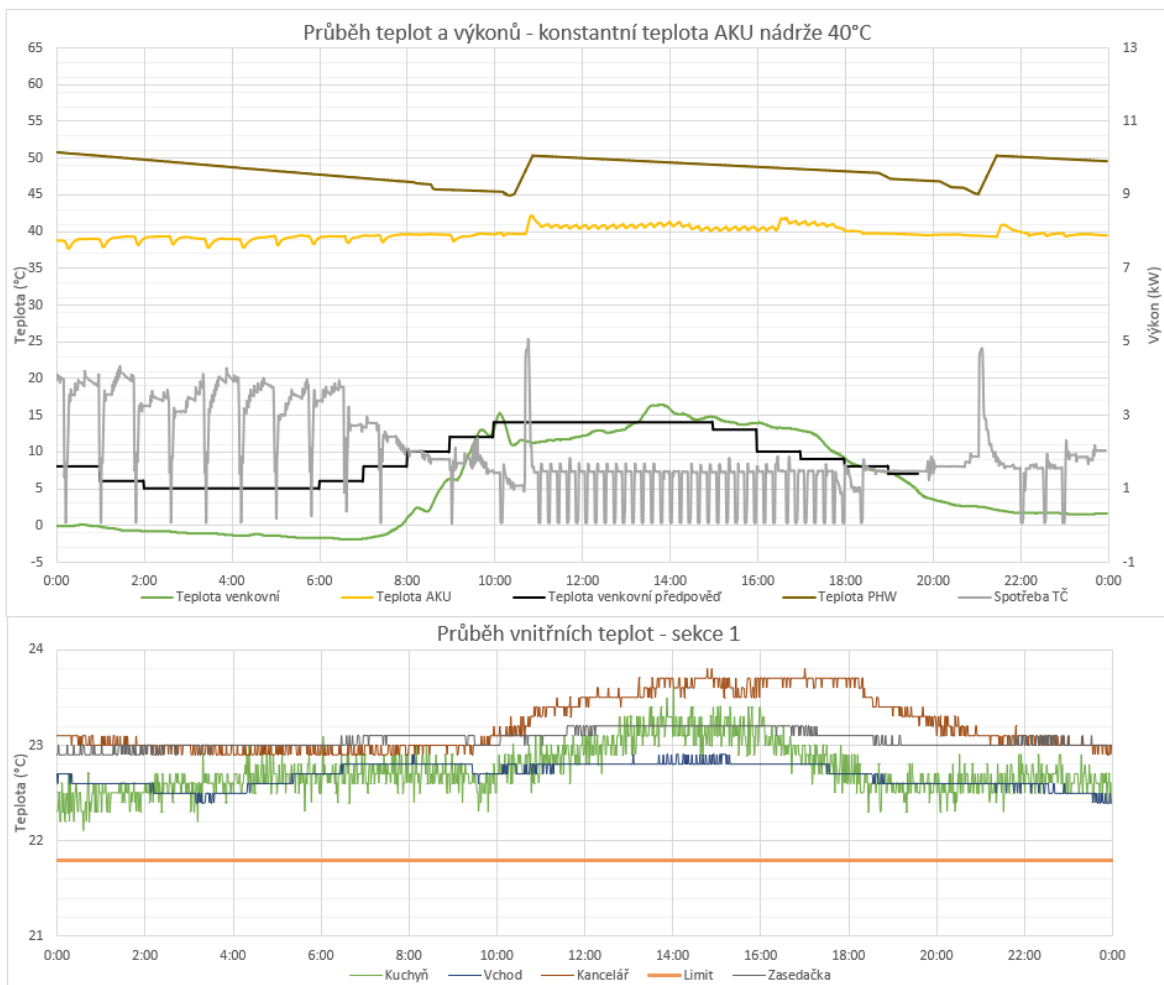
Na Obr. 2.54 je zobrazen průběh teplot a výkonů při použití ekvitermní křivky tepelného čerpadla. Ekvitermní křivka byla zadána pomocí dvou bodů. Při -7 °C byla výstupní teplota 38 °C a při teplotě 18 °C byla výstupní teplota 32 °C . Takto byla nastavena regulace TČ při jeho prvním spuštění. Z průběhu spotřeby TČ je patrné, že je jeho provoz rozložen během celého dne. Proměnný výkon je způsoben vlastní regulací TČ s dvojitým rotačním kompresorem. TČ sloužilo i k přípravě PHW. Z grafu teploty AKU nádrže je patrný pokles teploty vody v nádrži při zvýšení venkovní teploty, který je způsobený ekvitermní regulací TČ. Tuto oblast vyšších venkovních teplot by bylo vhodné využít pro akumulaci tepelné energie zejména ve dnech s velkým rozdílem venkovních teplot. Při vyšších teplotách pracuje TČ s větší COP a jeho chod je hospodárnější. Ve spodní části grafu jsou zobrazeny průběhy teplot ve sledovaných místnostech, ze kterých je patrné, že systém udržel teplotu s malou diferencí mezi minimální a maximální vnitřní teplotou.



Obr. 2.54 Ukázka průběhu měřených parametrů při nastavené ekvitermní regulaci TČ

Konstantní výstupní teplota TČ

Na Obr. 2.55 je zobrazen průběh teplot a výkonů při nastavené konstantní teplotě akumulční nádrže 40 °C. Ekvitermní regulace TČ byla v tomto případě vypnuta a výstupní teplota byla nastavena na 40 °C. Z průběhu výkonu TČ je dobře patrné snížení spotřeby elektrické energie TČ v oblasti vyšších teplot, kdy dochází ke snižování jeho výkonu a snížení dodávky tepelné energie do objektu. I v tomto případě systém dokázal udržet teplotu ve sledovaných místnostech na požadované úrovni s malým rozdílem teplot.



Obr. 2.55 Ukázka průběhu měřených parametrů při konstantní výstupní teplotě TČ 40 °C

Navržený způsob regulace TČ

Na Obr. 2.56 je zobrazen průběh teplot a výkonů při podobném průběhu venkovní teploty jako v předchozím případě. Chod TČ byl řízen dle intervalů s nejvyšší denní teplotou na základě předpovědi počasí. Z průběhu spotřeby TČ je ale zřejmé, že došlo k jeho sepnutí již kolem 5:00. To bylo způsobeno poklesem teploty v akumulární nádrži pro otopný systém, neboť v jedné ze sledovaných místností došlo ke snížení teploty pod stanovený limit. Při poklesu teploty v místnosti dojde ke spuštění oběhového čerpadla (společné pro všechny části budovy). Akumulační schopnost budovy není tedy dostatečná, pro udržení požadované teploty v průběhu celé noci. Dobu chodu TČ by bylo možné eliminovat dodávkou tepla pouze do místnosti s teplotou pod stanovenou mez. Zároveň by bylo vhodné měnit teplotu výstupní vody TČ během dne, tak aby v době nízkých teplot byla nastavena na nižší teplotu, čímž by TČ pracovalo s vyšším COP. To v tomto případě nebylo možné (neumožňuje přenastavení pomocí komunikačního protokolu).

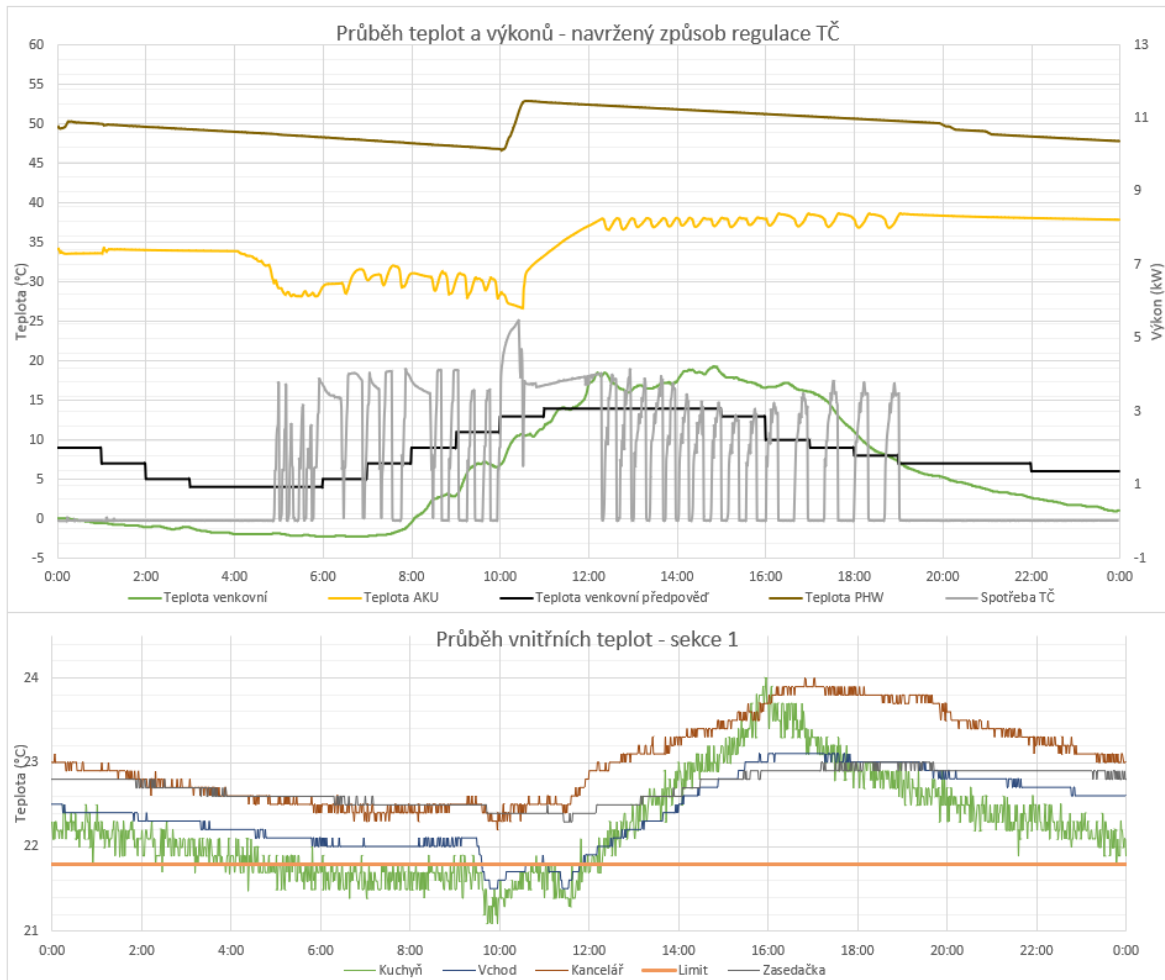
Z průběhu teploty akumulární nádrže je vidět, že systém mimo intervaly vyšších teplot udržuje nižší teplotu akumulární nádrže než v intervalu vyšších teplot. Nastavené teploty ekvitemní regulace jsou zobrazeny v Tabulka 2.9.

Tabulka 2.9 Nastavené hodnoty ekvitemní regulace

Venkovní teplota (°C)	Teplota AKU nádrž (°C)		Teplota PHW (°C)	
	Interval vysokých teplot	Interval nízkých teplot	Interval vysokých teplot	Interval nízkých teplot
-7 °C	38	31	53	45
18 °C	33	26	53	45

Z průběhů teplot ve sledovaných místnostech je vidět, že při tomto způsobu řízení chodu TČ dochází poměrně velkému kolísání vnitřní teploty, diference se pohybuje kolem 2 °C. To je potřeba mít na vědomí pro splnění tepelného komfortu uživatelů.

V dopoledních hodinách dojde v intervalu vysokých teplot ke změně požadované teploty PHW a tím začne TČ ohřívat vodu v nádrži PHW s vyšší účinností, než by tomu bylo v intervalu nízkých teplot. V našem případě je spotřeba PHW poměrně malá a je tedy dostačující ohřívat PHW pouze v intervalu vysokých teplot.



Obr. 2.56 Průběh teplot a výkonů při optimalizace chodu TČ dle predikce venkovní teploty

Porovnání jednotlivých variant je zobrazeno v Tabulka 2.10. Z naměřených hodnot je patrné, že i když byla průměrná venkovní teplota při navržené regulaci nižší než v ostatních dnech, bylo TČ provozováno s nejvyšší hodnotou COP.

Tabulka 2.10 Porovnání způsobů regulace TČ

Popis	Tepelné čerpadlo			Venkovní teplota			
	Výroba (kWh)	Spotřeba (kWh)	COP (-)	ϑ_{\min} (°C)	ϑ_{\max} (°C)	$\phi \vartheta$ (°C)	$\Delta \vartheta$ (°C)
Ekviterma TČ	86,67	24,63	3,52	3,5	12,9	7,3	9,4
Konst. teplota 40°C	148,61	49,09	3,03	-1,8	16,5	5,6	18,3
Regulace	117,77	32,64	3,61	-5,5	20,8	3,6	26,3

2.6.3 Shrnutí poznatků a přínosů

Vytvořený systém pro řízení TČ dle intervalu vysokých teplot umožňuje díky předpovědi venkovní teploty optimalizovat chod TČ do oblastí s vyšším COP a tím dosáhnout úspornějšího provozu. Systém je nutné použít v kombinaci s podlahovým teplovodním vytápěním a ideálně s velkou akumulací schopností budovy. Díky tomu je možné eliminovat chod TČ v oblasti nízkých teplot. Stanovení přesných úspor elektrické energie je velice obtížné. Navržený systém spoří převážně ve dnech s velkým rozdílem venkovní teploty. V závislosti na budově a použitém TČ se úspora v těchto dnech může pohybovat kolem 5-10 %. Úspory na vytápění je však dosaženo na úkor zvýšení rozdílu požadovaných teplot v místnosti. Úspora při přípravě PHW se v našem případě pohybuje také v rozmezí 5-10 %. Nicméně zde velice záleží na množství spotřeby PHW a jejím časovém rozložení během dne.

Předností systému je schopnost zpřesňování tepelné ztráty objektu na základě měřených a ukládaných dat, což respektuje způsob užívání dané budovy (např. větrání) a technické provedení budovy (např. tepelné mosty v konstrukci). Další výhodou je, že systém sleduje spotřebu PHW a optimalizuje tak čas pro její přípravu.

Úsporu elektrické energie na vytápění a přípravu PHW je možné zvýšit v kombinaci s FVE. Interval vysokých teplot se přibližně shodují s výrobou FVE. Touto problematikou jsem se blíže zabýval v kapitole 3.3.

3 Optimalizace spotřeby budovy s FVE

V dnešní době existuje celá řada systémů, které slouží k optimalizaci přebytků elektrické energie z fotovoltaických elektráren. Zpravidla se jedná jednoúčelová zařízení, která slouží ke spínání příslušných spotřebičů, či řízení výkonu do odporových spirál pomocí polovodičového relé (SSR – solid-state relay). Tato zařízení jsou vhodná především pro jednodušší aplikace a není je možné (nebo velice obtížně) integrovat do řídicího systému budovy. Často jsou tato zařízení tvořena ze dvou konstrukčních částí (měřicí modul a hardwarová část pro řízení SSR vč. binárních výstupů). Ve většině případů nemůže být měřicí modul umístěn ve větší vzdálenosti od hardwarové části, což celou instalaci do značné míry limituje, pokud se jedná o objekt s komplikovanější topologií. Některá řešení již v současné době nabízejí řízení invertorového tepelného čerpadla v případě přebytku výroby elektrické energie z FVE [36, 37]. Stávající systémy však ve většině případů neumožňují komunikovat se střídačem, integrovat předpověď počasí a jejich implementace do rozsáhlejších objektů je poměrně obtížná. Hlavní výhodou stávajících systémů je poměrně příznivá cena, jednoduchá montáž a údržba systému.[11, 19, 20, 40]

Mojí vizí bylo, vytvořit systém, který by byl vhodný pro středně velké objekty bytového či komerčního využití a vzájemně umožnil propojit následující komponenty:

- hybridní asymetrický střídač FVE
- tepelné čerpadlo
- rekuperační jednotku a klimatizaci
- nabíjecí stanici elektromobilů
- řízení odporové zátěže
- předpověď počasí

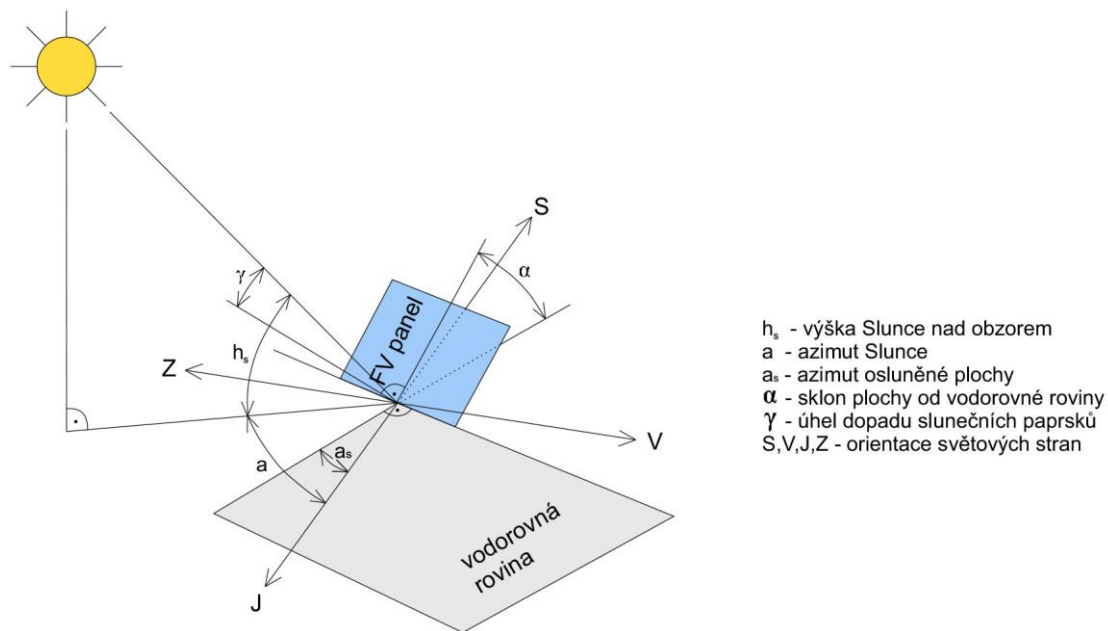
Díky vzájemnému propojení komponentů vznikne funkční celek, který by umožnil zefektivnit provoz celého systému. Do systému jsem začlenil komponenty různých výrobců, se kterými mám ze své praxe zkušenosti. Hlavní výhodou mnou navrženého systému je implementace předpovědi počasí, která umožní efektivitu celého systému zvýšit. Díky predikci počasí je možné efektivněji využívat bateriové uložení, lépe se připravit na to, že vzniknou přebytky vyrobené elektrické energie z FVE (pro které nebude v daný okamžik odpovídající spotřeba) nebo bude naopak při špatném počasí (zatažené obloze) výroba elektrické energie z FVE minimální a bude nutné se spolehnout pouze na dodávku elektrické energie ze strany distribuční soustavy.

Jelikož se v České republice provádí měření přetoků z FVE po jednotlivých fázích, je zde výhodné použít asymetrický střídač, který umožní efektivní rozdělení výkonu na jednotlivé fáze dle aktuální spotřeby objektu. Pro tuto funkci je ke střídači připojen měřicí modul, který monitoruje velikost a směr proudů v jednotlivých fázích. Střídač se tak snaží pokrýt spotřebu objektu v maximální možné míře. Celý systém může být doplněn o bateriové uložení, které umožní zvýšit podíl vlastní spotřeby z FVE. Díky zpřístupněným parametrům je možné ze střídače vyčíst celou řadu důležitých parametrů (pomocí sběrnice Modbus RTU) a případně tyto parametry měnit tak, aby bylo dosaženo co nejvyšší efektivity celého systému (například díky změně parametru hloubky vybití DoD).

Při současném rozmachu elektromobility je vhodné, zejména u novostaveb, elektrickou instalaci doplnit o nabíječku elektromobilů, kde je možné využít elektromobil pro akumulaci elektrické energie z FVE převážně v letních měsících. V našem případě se jedná zejména o AC nabíječky, které jsou poměrně cenově dostupné a je možné je efektivně řídit.

3.1 Předpověď osvitů a výkonu FVE

Pokud je v objektu instalována fotovoltaická elektrárna, je vhodné využít i předpověď osvitů, pomocí které lze predikovat výrobu elektrické energie z fotovoltaické elektrárny. Díky tomu je možné optimalizovat chod vybraných spotřebičů tak, aby byla vyrobená elektrická energie maximálně využita a snížily se přetoky elektrické energie do distribuční soustavy. Pro predikci výroby FVE je nutné přepočítat hodnotu osvitů ze serveru PVForecast (W/m^2) v hodinových intervalech na rovinu fotovoltaického panelu. Schéma pro tento přepočet je zobrazeno na Obr. 3.1. [4, 41]



Obr. 3.1 Schéma pro výpočet intenzity slunečního záření na obecně položenou plochu

Nejprve je nutné vypočítat datový úhel τ dle vztahu (3.1.1), kde D představuje pořadové číslo dne v měsíci (1-31) a M pořadové číslo měsíce v roce (1-12).

$$\tau = 0,98 D + 29,7 M \quad (^\circ) \quad (3.1.1)$$

Pomocí datového úhlu lze dopočítat deklinace Slunce (3.1.2), což představuje úhel, který svírá spojnice středu Země a středu Slunce s rovinou rovníku. Nabývá hodnoty od 0° do $+90^\circ$ směrem od rovníku k severnímu světovému pólu nebo 0° až -90° směrem od rovníku k jižnímu světovému pólu.

$$\delta = 23,45 \sin(\tau - 109) \quad (^\circ) \quad (3.1.2)$$

Výška Slunce nad obzorem (3.1.3) je úhel, který svírá spojnice středu Země a středu Slunce s vodorovnou rovinou, čísluje se od obzoru k zenitu (0° až 90°). Je určena deklinací Slunce δ , zeměpisnou šířkou φ_{FV} a časovým úhlem t_s . Časový úhel představuje pozici Slunce na obloze pro příslušnou hodinu, měří se od 12 h v poledne a jedné hodině odpovídá

úhel 15° . Pro hodiny po 12 h v poledne se bere jako kladná a pro hodiny před 12 h v poledne jako záporná ($11 \text{ h} = -15^\circ$, $13 \text{ h} = 15^\circ$).

$$\sin h_s = \sin \delta \sin \varphi_{FV} + \cos \delta \cos \varphi_{FV} \cos t_s \quad (-) \quad (3.1.3)$$

Pro azimut Slunce pak platí vztah (3.1.4).

$$\sin a = \frac{\cos \delta}{\cos h_s} \sin \tau \quad (-) \quad (3.1.4)$$

Po vypočtení výšky Slunce nad obzorem h_s a známém azimutu Slunce a určíme podle rovnice (3.1.5) úhel dopadu slunečních paprsků na obecně položenou plochu γ . Úhel sklonu osluněné plochy od vodorovné roviny představuje úhel α . Azimutový úhel normály osluněné plochy je úhel a_s . Tento úhel je měřen stejně jako azimut Slunce, tj. od směru na jih (J) ve smyslu otáčení hodinových ručiček jako kladná hodnota (+) a proti směru hodinových ručiček jako záporná hodnota (-).

$$\cos \gamma = \sin h_s \cos \alpha + \cos h_s \sin \alpha \cos(a - a_s) \quad (-) \quad (3.1.5)$$

Jelikož se predikovaná hodnota z PVForecast (stejně jako měřená hodnota) skládá, z přímého G_P , difuzního G_D a odraženého záření G_R , dle rovnice (3.1.6) je nutné pro následující přepočítání na vodorovnou rovinu tyto složky separovat.

$$G = G_P + G_D + G_R \quad \left(\frac{W}{m^2}\right) \quad (3.1.6)$$

Pro tuto separaci využijeme úvahu, že difuzní a odražené záření dopadá na osluněnou plochu i v době, kdy je obloha zatažená a slunce přímo nesvítilo. Při tom se sice zmenšuje odraz paprsků od okolních ploch, ale naopak se zvětšuje rozptyl paprsků v atmosféře. Můžeme tedy s přípustnou přibližností počítat intenzitu difuzního a odraženého záření G_{DR} na vodorovnou rovinu stejně jako při jasné obloze ze vztahu (3.1.7).

$$G_{DRh} = 0,33 (G_0 + G_{Pnv}) \sin h_s \quad \left(\frac{W}{m^2}\right) \quad (3.1.7)$$

Kde G_0 představuje sluneční konstantu $1\,360 \text{ W/m}^2$ a G_{Pnv} intenzitu přímého záření na plochu kolmou ke směru paprsků, vypočtenou dle rovnice (3.1.8). Součinitel ε lze podle Heindla a Kocha vyjádřit vztahem (3.1.9). Je dán výškou Slunce na obzorem h_s a nadmořskou výškou daného místa NV (udávaná v metrech).

$$G_{Pnv} = G_0 \exp\left(-\frac{Z}{\varepsilon}\right) \quad \left(\frac{W}{m^2}\right) \quad (3.1.8)$$

$$\varepsilon = \frac{9,38076 (\sin h_s + (0,003 + \sin^2 h_s)^{0,5})}{2,0015 (1 - NV \cdot 10^{-4})} + 0,91018 \quad (-) \quad (3.1.9)$$

Pro následující přepočítání hodnoty intenzity slunečního záření (osvitu) G_h z vodorovné roviny na obecně položenou plochu nejprve vypočteme intenzitu přímého slunečního záření na vodorovnou plochu ze vztahu (3.1.10). Pokud je hodnota G_h menší než hodnota vypočtená G_{DRh} , snížíme hodnotu G_{DRh} na hodnotu G_h (uvažujeme, že sluneční záření obsahuje pouze difuzní a odraženou složku).

$$G_{Ph} = G_h - G_{DRh} \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (3.1.10)$$

Intenzita přímého slunečního záření (osvit) na obecně položenou plochu G_P , jejíž poloha je dána azimutem a_s a úhlem sklonu α , je potom dána vztahem (3.1.11), kde G_{Pn} představuje intenzitu přímého slunečního záření na plochu kolmou ke směru paprsků.

$$G_P = G_{Pn} \cos \gamma \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (3.1.11)$$

Pro výpočet hodnoty intenzity přímého slunečního záření na obecně položenou plochu G_P z hodnoty intenzity přímého slunečního záření na vodorovnou rovinu G_{Ph} platí vztah (3.1.12).

$$G_P = G_{Ph} \frac{\cos \gamma}{\sin h_s} \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (3.1.12)$$

Intenzitu difuzního a odraženého záření na obecně položenou rovinu lze pak přibližně vypočítat ze vztahu (3.1.13).

$$G_{DR} = \frac{1 + \cos \alpha}{2} G_{DRh} + r \frac{1 - \cos \alpha}{2} (G_{Ph} + G_{DRh}) \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (3.1.13)$$

Výsledná intenzita slunečního záření G na obecně položenou plochu je pak daná součtem záření přímého G_P a záření difuzního a odraženého G_{DR} dle vztahu (3.1.14).

$$G = G_{DR} + G_P \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (3.1.14)$$

Na základě údajů z technických listů k fotovoltaickým panelům je možné vypočítat účinnost FV modulů při daném osvitu a venkovní teplotě $\eta_{FV,t}$ dle rovnice (3.1.15).

$$\eta_{FV,t} = \eta_{ref} \left[1 + \frac{\gamma_{FV}}{100} (\vartheta_{FV} - \vartheta_{ref}) \right] \quad (-) \quad (3.1.15)$$

Parametr η_{ref} představuje tzv. referenční účinnost FV modulu při normovaných zkušebních podmínkách, tj. 1000 W/m² a teplotě FV článku 25 °C. Tento parametr je dostupný v technickém listě FV panelu. Referenční teplota článku je dle normovaných testovacích podmínek stanovena na 25 °C. Parametr γ_{FV} je teplotní součinitel výkonu pro daný modul a je taktéž dostupný v technickém listě FV panelu.

Pro výpočet rovnice (3.1.15) je nezbytné dopočítat teplotu FV článku, která se stanoví na základě rovnice (3.1.16).

$$\vartheta_{FV} = \vartheta_e + \frac{\alpha G}{U} \quad (^\circ\text{C}) \quad (3.1.16)$$

Parametr ϑ_e zohlední aktuální venkovní teplotu. Parametr α představuje pohltivost dopadajícího záření (uvažována konstanta 0,95). G je intenzita slunečního záření dopadající na plochu panelu. V našem případě se jedná o predikovanou hodnotu intenzity slunečního záření (osvitu) vypočítanou v rovnici (3.1.14), která byla stanovena z průměrného osvitu pro danou hodinu (data ze serveru PVForecast). Parametr U je celkový součinitel tepelné ztráty z FV článku do okolí, který představuje celkový tepelný tok z FV článku krycími vrstvami a přestupem tepla z povrchu FV panelu (spodního i horního) do okolního prostředí. Součinitel U_{FV} je možné vypočítat na základě údaje NOCT. NOCT je teplota článku za normálních testovacích podmínek a zpravidla se jedná o osvit (intenzitu záření) 1000 W/m^2 , teplotu okolí $25 \text{ }^\circ\text{C}$ a rychlost proudění 1 m/s . Parametr NOCT a informace při jakých podmínkách byl získán jsou uvedeny v technickém listu FV panelu. Vzorec pro výpočet parametru U_{FV} je uveden v následující rovnici (3.1.17).

$$U_{FV} = \frac{\alpha G_{NOCT}}{NOCT - \vartheta_{NOCT}} \quad \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \right) \quad (3.1.17)$$

Na základě vypočítaných parametrů je možné určit výkon FV elektrárny dle rovnice (3.1.18), kde G představuje intenzitu slunečního záření (osvit) na obecně položenou plochu, A plochu FV článků jednoho panelu, n počet panelů, η_{DC} zohledňuje ztráty na DC straně, η_M zohledňuje účinnost měniče a η_{AC} ztráty na AC straně.

$$P_{re} = G A n \eta_{FV,t} \eta_{DC} \eta_M \eta_{AC} \quad (\text{W}) \quad (3.1.18)$$

Výše uvedený matematický model predikce osvitu a výkonu z FV elektrárny jsem ve své disertační práci použil pro vytvoření programu umožňujícího predikci osvitu a výkonu FV elektrárny. Výkonu FV elektrárny je vypočten pro každou hodinu na základě predikce osvitu G_h a venkovní teploty ϑ_e . Díky tomu je možné vytvořit výkonovou křivku předpokládané výroby FV elektrárny.

Ukázka porovnání predikce a reálné výroby byla provedena pro FV elektrárnu o výkonu $9,2 \text{ kWp}$ orientovanou jihozápadně (azimut 26°) se sklonem 40° . Detailní informace o konfiguraci FV elektrárny jsou uvedeny v Tabulka 3.1.

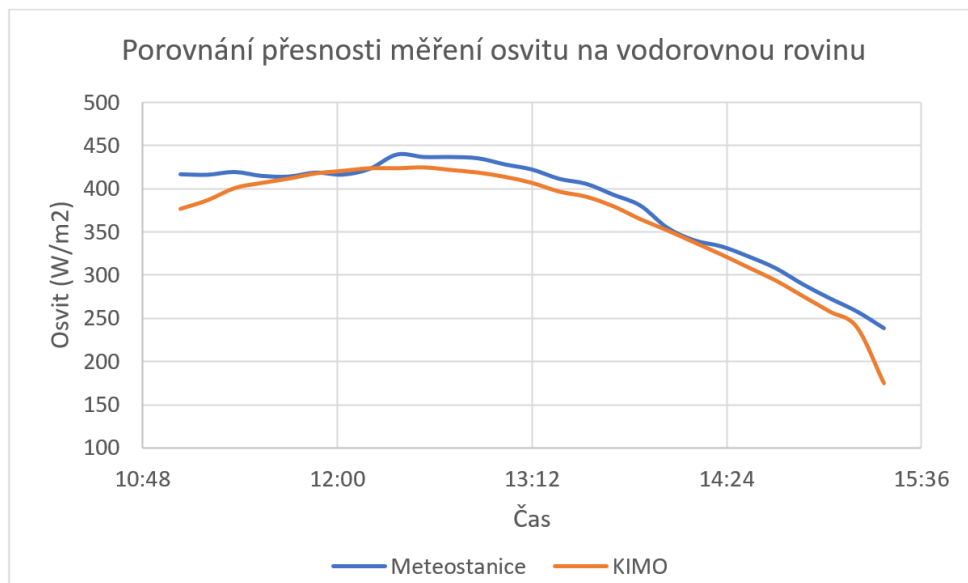
Tabulka 3.1 Použité vstupní parametry pro predikci výroby FVE

η_{ref}	0,1414
ϑ_{ref}	25 °C
γ	-0,46 %/K
NOCT	45,3
G_{NOCT}	1000 W/m ²
ϑ_{NOCT}	20 °C
A	1,6 m ²
n	40
η_{DC}	0,98
η_M	0,98
η_{AC}	0,98

Jelikož je na budově instalována meteorologická stanice WARIOWEATHER, která disponuje funkcí měření osvitů, provedl jsem nejprve kontrolní měření přesnosti této stanice. Pro porovnání jsem použil měřicí přístroj osvitů KIMO SL200, který jsem nainstaloval vedle fotovoltaických modulů a prováděl měření osvitů na vodorovnou rovinu. Samotná meteostanice byla vzdálena asi 5 m od tohoto přístroje. Výsledky z tohoto kontrolního měření jsou zobrazeny v Tabulka 3.2. Z naměřených výsledků je patrné, že pro měření osvitů je senzor na meteostanici dostatečně přesný. Drobné odchylky mohou být způsobeny vzdáleností jednotlivých senzorů a pohybem mraků. Poslední měřená hodnota vykazuje již poměrně velkou odchylku. Tato odchylka byla způsobena zastíněním měřicího přístroje stavební konstrukcí budovy. Pro lepší přehlednost byly hodnoty vyneseny do Obr. 3.2.

Tabulka 3.2 Porovnání naměřených hodnot osvitů

Čas	Osvit (W/m ²)		
	Meteostanice	KIMO	Rozdíl
11:02	416,6	377	-39,6
11:12	416	387	-29
11:22	419,2	401	-18,2
11:32	414,7	407	-7,7
11:42	413,9	412	-1,9
11:52	418,5	418	-0,5
12:02	416,2	421	4,8
12:12	422,9	424	1,1
12:22	439,4	424	-15,4
12:32	436,5	425	-11,5
12:42	436,5	422	-14,5
12:52	435	419	-16
13:02	427,9	414	-13,9
13:12	422	407	-15
13:22	411,3	397	-14,3
13:32	405,5	391	-14,5
13:42	392,9	380	-12,9
13:52	380,4	365	-15,4
14:02	354,6	352	-2,6
14:12	340,2	338	-2,2
14:22	333,2	324	-9,2
14:32	321,6	309	-12,6
14:42	308,1	294	-14,1
14:52	289,6	276	-13,6
15:02	273,3	258	-15,3
15:12	258,2	240	-18,2
15:22	238,8	175	-63,8



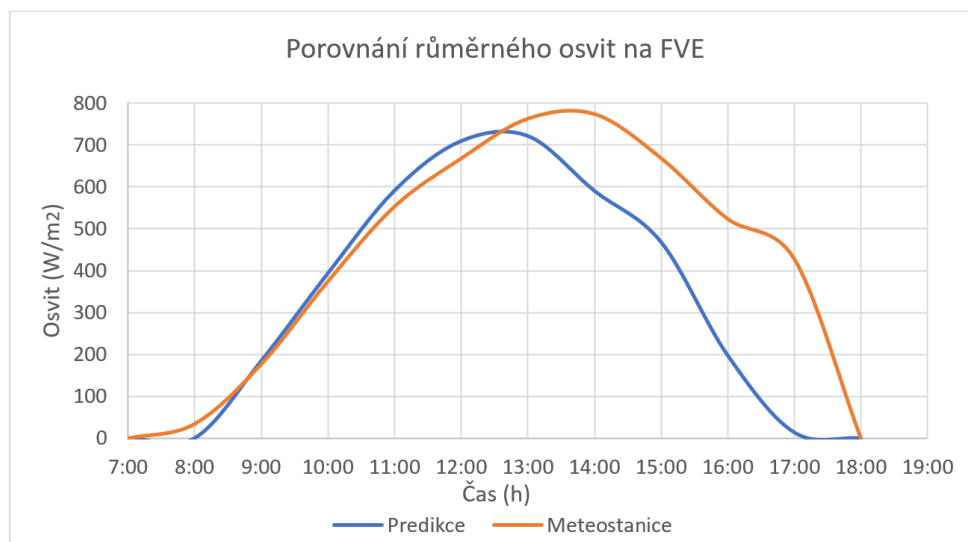
Obr. 3.2 Kontrolní měření osvitů na vodorovnou rovinu

Dále jsem provedl porovnání reálné a predikované hodnoty osvitů a výroby FV elektrárny pro sledovaný den, které je zobrazeno v tabulce Tabulka 3.3.

Tabulka 3.3 porovnání predikce a měřených hodnot v měsíci únoru

Čas (h)	Průměrný osvit na FVE (W/m ²)		Výroba FVE (kWh)		
	Výpočet z predikce	Výpočet z meteostanice	Výpočet z predikce	Výpočet z meteostanice	Měřeno analyzátořem
7:00	0	0	0	0	0,03
8:00	0	34,26	0	0,32	0,29
9:00	184,23	176,71	2,24	1,65	1,42
10:00	393,16	374,14	4,04	3,41	3,29
11:00	590,73	552,91	5,63	4,95	4,97
12:00	708,99	667,55	6,53	5,9	6,13
13:00	721,24	762,58	6,61	6,67	6,76
14:00	590,34	773,88	5,58	6,76	6,63
15:00	468,32	668,74	4,57	5,91	6,18
16:00	198,01	523,64	2,21	4,7	4,65
17:00	13,82	428,33	0,24	3,89	2,06
18:00	0	0	0	0	0,2
Celkem	3868,84	4962,74	37,65	44,16	42,61

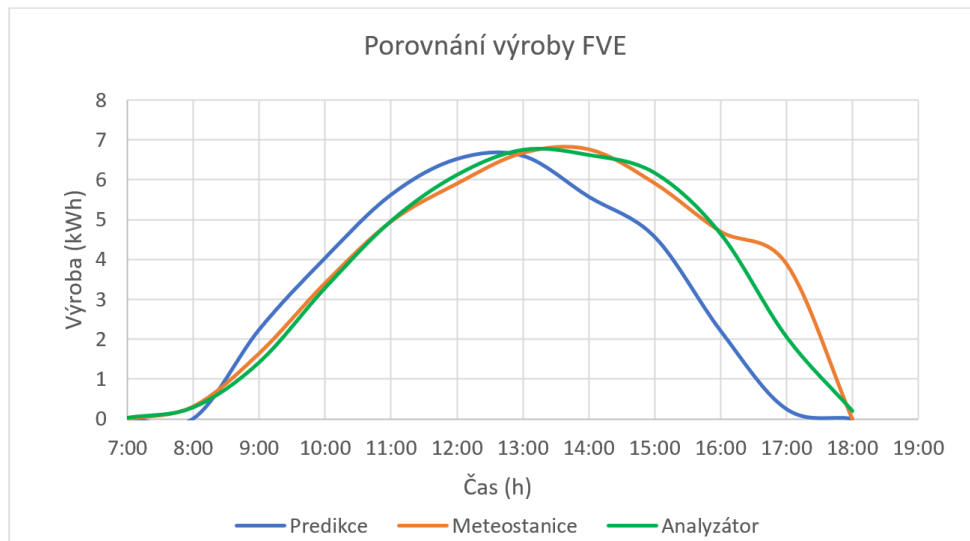
Z naměřených hodnot je vidět, že průběh průměrné predikované hodnoty osvitů (Obr. 3.3) se poměrně dobře shoduje s naměřenou hodnotou z meteostanice. Měření probíhalo v měsíci únoru za slunečného dne.



Obr. 3.3 Porovnání průměrné hodnoty osvitů na rovinu FVE

Porovnáme-li vypočtenou výrobu z předpovědi osvitů, výrobu vypočtenou z měřeného osvitů a skutečnou výrobu měřenou analyzátořem sítě (Obr. 3.4) zjistíme, že predikovaná hodnota výroby FVE vykazuje nižší hodnoty, než byly naměřeny analyzátořem sítě. To může být způsobeno tím, že se předpověď osvitů stahuje o půlnoci na další den. Server PVForecast v bezplatné verzi neumožňuje provádět zpřesnění předpovědi osvitů

v průběhu dne. Nicméně predikovat přesně hodnotu osvitů při proměnlivé oblačnosti je dosti komplikované.



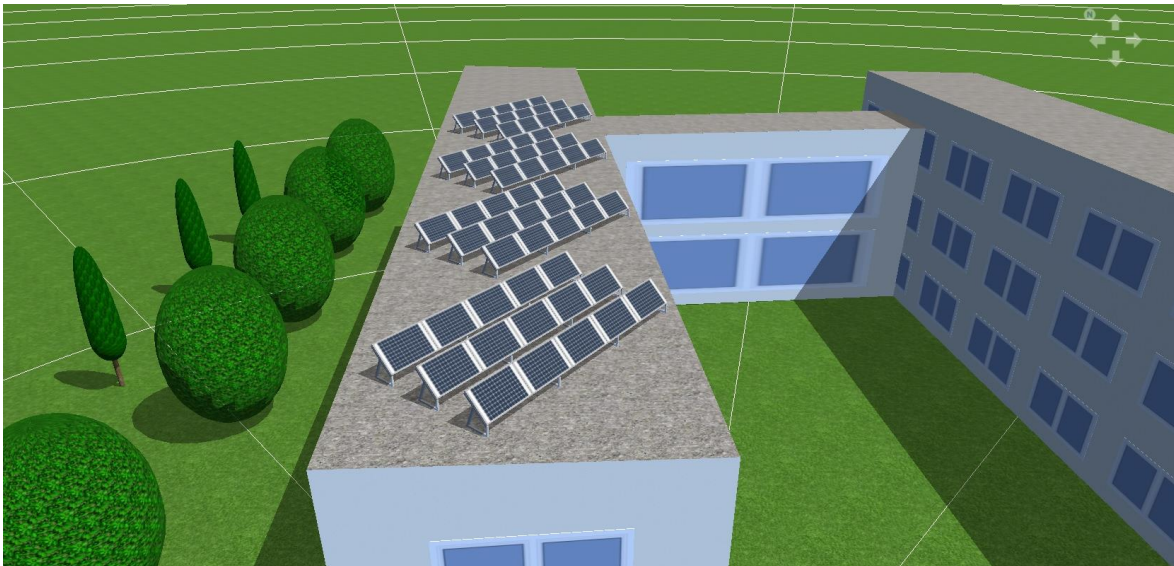
Obr. 3.4 Porovnání výroby z FVE

Z grafů je dobře patrné, že celková predikovaná výroba elektrické energie z FVE během dne se poměrně dobře shoduje s výrobou reálnou. Na základě dlouhodobého porovnání reálné a predikované výroby bylo zjištěno, že je předpověď výroby FV elektrárny možné poměrně spolehlivě implementovat do řízení tepelného čerpadla či rekuperační jednotky a optimalizovat tak využití vyrobené elektrické energie. Co se týče předpovědi osvitů, je možné její zpřesnění v rámci serveru PVForecast při využití placené služby, která umožňuje připojení lokálního senzoru osvitů nebo zařízení pro snímání oblohy. Popsaný způsob predikce výkonu FVE je dále použit v následující části disertační práce, kde je blíže popsána jeho integrace do řídicího systému.

3.2 Řízení rekuperační jednotky

Instalace rekuperačních jednotek v kancelářských či školních prostorách je stále častější. Spotřeba rekuperační jednotky často představuje majoritní spotřebu objektu. V kapitole 2.5 byl podrobně popsán systém nucené ventilace školy s centrální rekuperační jednotkou. Z analýzy provozu tohoto systému je patrné, že v letních měsících je na její provoz vynaloženo velké množství elektrické energie. To je dáno zejména ochlazováním přírodního vzduchu do místnosti, čímž dochází ke chlazení celé budovy. Z výsledků měření vnitřní teploty je patrné, že v dopoledních hodinách dochází ke zvýšení teploty v místnostech. To je způsobeno tepelnými zisky okny ze slunečního záření (východní orientaci oken v místnostech).

Pro snížení spotřeby elektrické energie je vhodné provoz systému kombinovat s fotovoltaickou elektrárnou, která do jisté míry kopíruje spotřebu rekuperační jednotky. V závislosti na předpovědi venkovní teploty, osvětlení a aktuální výrobě elektrické energie je navíc možné optimalizovat chod rekuperační jednotky a tím snížit její provozní náklady (přímé řízení výkonu rekuperační jednotky). Návrh FVE (Obr. 3.5) byl optimalizován s ohledem na průběh spotřeby rekuperační jednotky a nebyla uvažována ostatní spotřeba objektu. Výkon, orientace a sklon FV modulů byl optimalizován tak, aby výroba z FVE co nejvíce kopírovala spotřebu rekuperační jednotky.



Obr. 3.5 Navrhované rozmístění FVE na střeše budovy

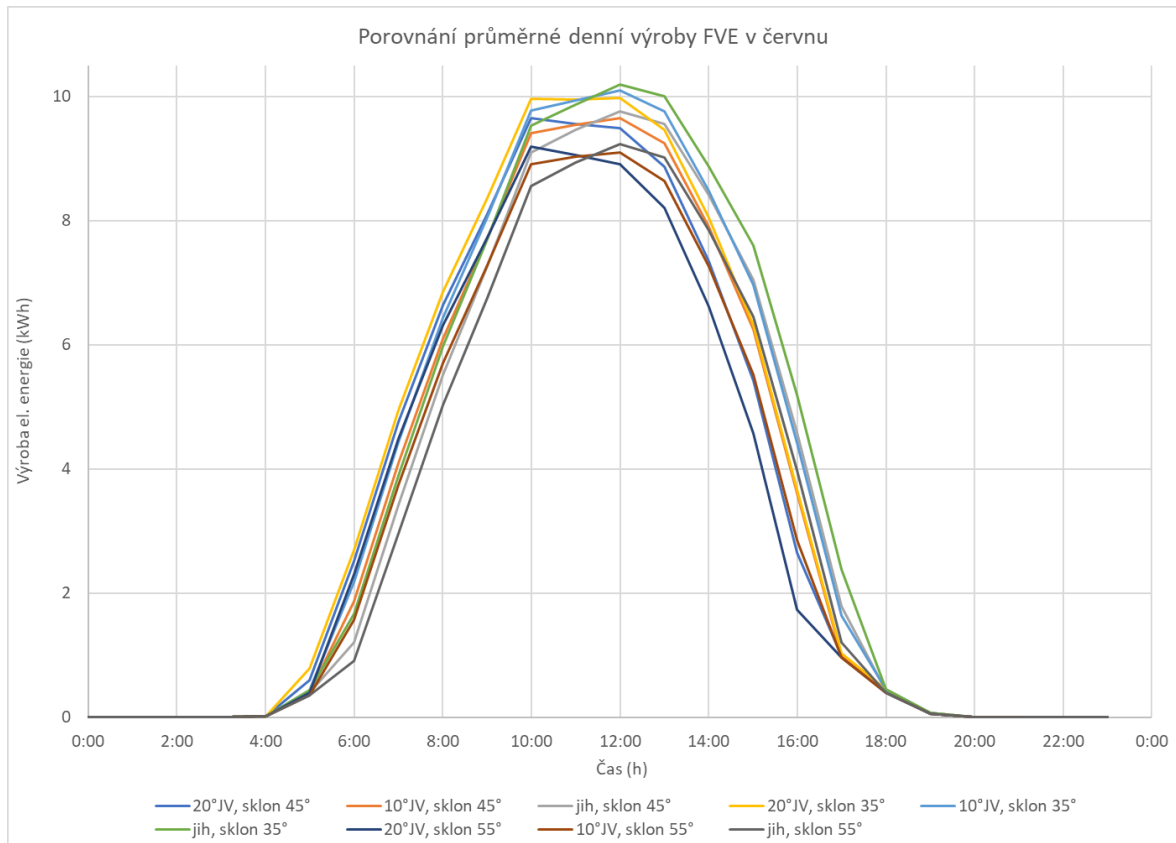
3.2.1 Návrh systému

Instalace FVE zatím nebyla realizována, proto byla provedena simulace různých konfigurací v programu PVSol [45], který slouží k návrhům a optimalizaci FVE. Získaná data byla porovnána s reálnou spotřebou rekuperační jednotky. V návrhu byla uvažována pouze spotřeba rekuperační jednotky na budově základní školy bez ohledu na další spotřebu objektu. Při jejím uvažování by došlo ke zvýšení vlastní spotřeby vyrobené elektrické energie z FVE. V rámci daného návrhu nebyla uvažována akumulace elektrické energie do bateriového uložení, která by celou instalaci značně prodražila. Z mého pohledu by instalace bateriového uložení byla nerentabilní. Pro návrh FVE bylo zvoleno celkem devět konfigurací panelů, které jsou uvedeny v Tabulka 3.4.

Tabulka 3.4 Orientace FV panelů pro porovnání variant

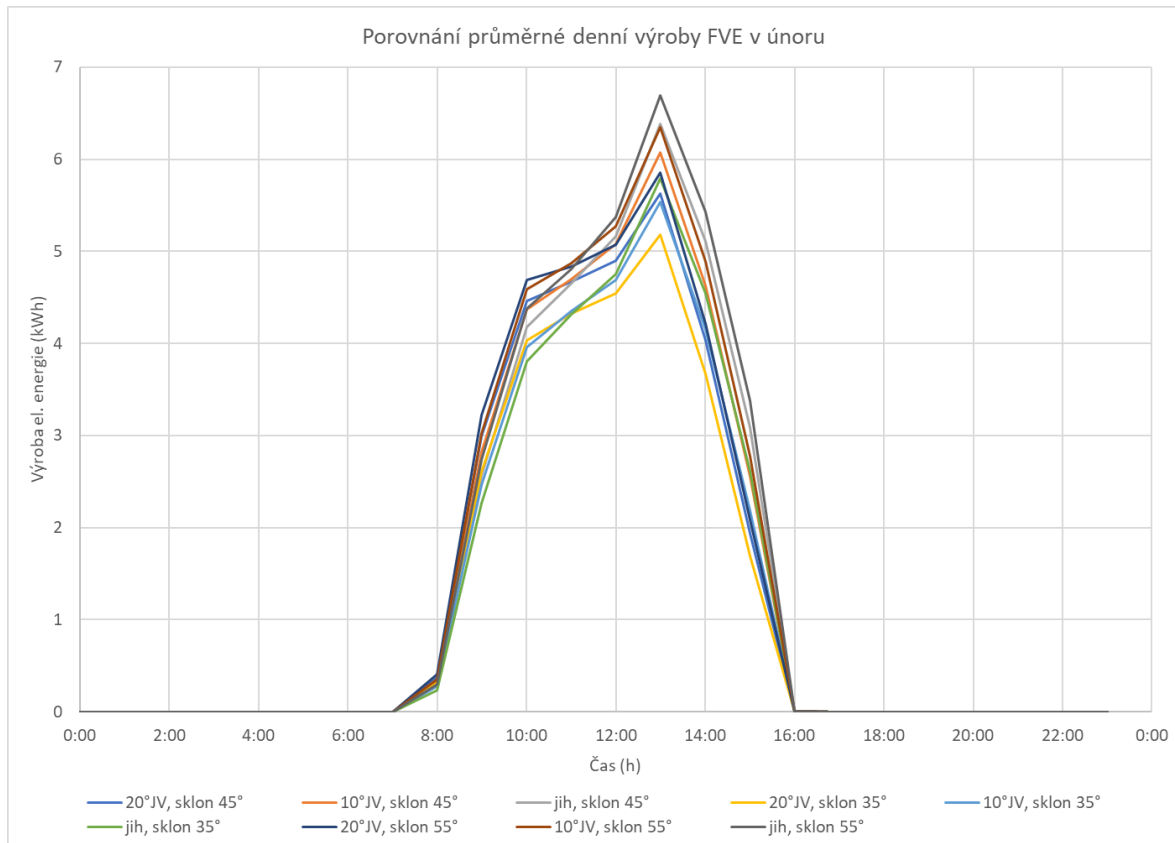
20°JV, sklon 35°	10°JV, sklon 35°	jih, sklon 35°
20°JV, sklon 45°	10°JV, sklon 45°	jih, sklon 45°
20°JV, sklon 55°	10°JV, sklon 55°	jih, sklon 55°

Při uvažování aktuálního využití budovy (základní škola) je počítáno v měsíci červenci a srpnu s minimálním využitím přebytků FVE pro provoz rekuperační jednotky (letní prázdniny). Z tohoto důvodu se jeví jako výhodné použít větší sklon panelů, který umožní zvýšit výrobu v zimních měsících. Návrh nebyl optimalizován na maximalizaci výroby elektrické energie, ale na maximální pokrytí spotřeby rekuperační jednotky. Na Obr. 3.6 je zobrazen graf s porovnáním průměrných denních průběhů výroby FVE v měsíci červnu. Z grafu je patrné, jakým způsobem ovlivňuje orientace panelů výkon FVE. Pro tento měsíc představuje největší výkonovou křivku sklon 35°. Natočením panelů směrem na východ dojde ke zvětšení výroby v dopoledních hodinách, což je pro naši aplikaci výhodné (nutné chlazení tříd v tomto čase).



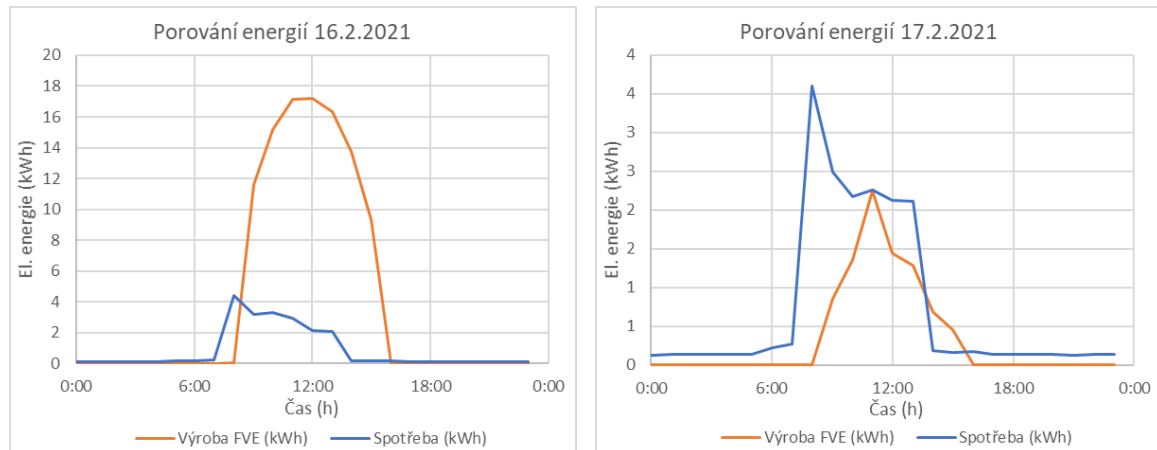
Obr. 3.6 Porovnání průměrných denních průběhů výroby FVE v červnu

Pokud se podíváme na výkonovou křivku výroby v měsíci únoru (Obr. 3.7), zjistíme že natočení panelů směrem na východ již takovým způsobem neovlivní průběh výkonu FVE během dne. Pro naši aplikaci se nejlépe jeví varianta s jihovýchodní orientací 10° a sklonem panelů 45°. Proto jsem zvolil pro další ukázkou tuto variantu. Tato varianta je uvedena v Příloze 2.



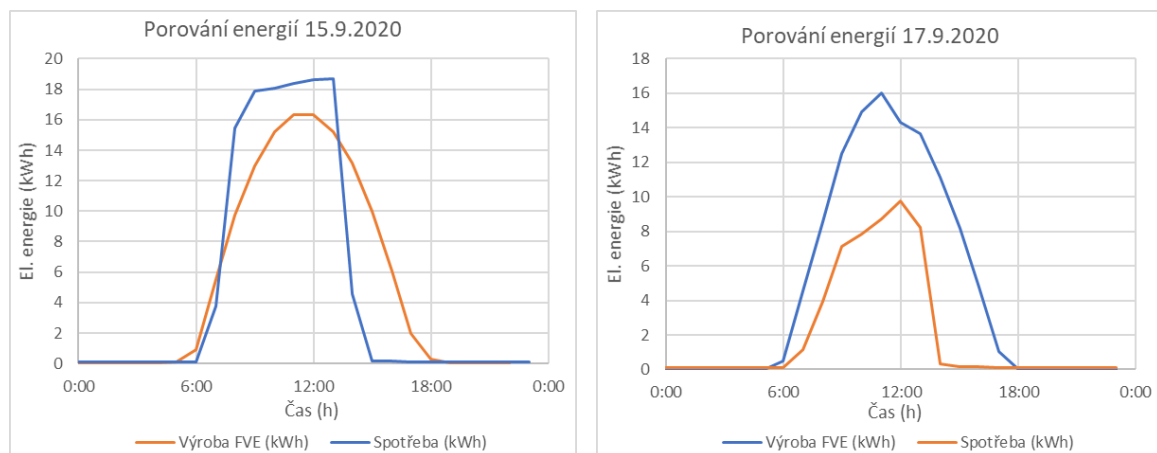
Obr. 3.7 Porovnání průměrných denních průběhů výroby FVE v únoru

Pro porovnání průběhů výroby FVE a spotřeby rekuperační jednotky jsem použil naměřená data z reálného průběhu rekuperační jednotky a předpokládané denní průběhy vygenerované z programu PVSol. Ve vybraných měsících jsem zvolil vždy dva rozdílné průběhy. Na Obr. 3.8 jsou zobrazeny průběhy v měsíci únoru 2021. Z levého obrázku je patrné, že výroba FVE znatelně převyšuje spotřebu rekuperační jednotky. To je dáno tím, že při zimním provozu dohřívá rekuperační jednotka přiváděný vzduch na stanovenou teplotu nutnou pro zamezení nežádoucího ochlazování budovy vlivem větrání. Potřebná tepelná energie je dodávána radiátorovými tělesy. Tento rozdíl výkonů by bylo možné eliminovat tím, že by se zvýšila vstupní teplota do místnosti a zároveň výkon, kterým je dohříván přiváděný venkovní vzduch. Výkon rekuperační jednotky by byl tedy přímo řízen s ohledem na aktuální výrobu FVE. Na pravém obrázku je vidět průběh při zatažené obloze. Výroba FVE by byla schopna poměrně výrazně pokrýt spotřebu rekuperační jednotky pro zajištění požadované koncentrace CO_2 ve vnitřních prostorách budovy.



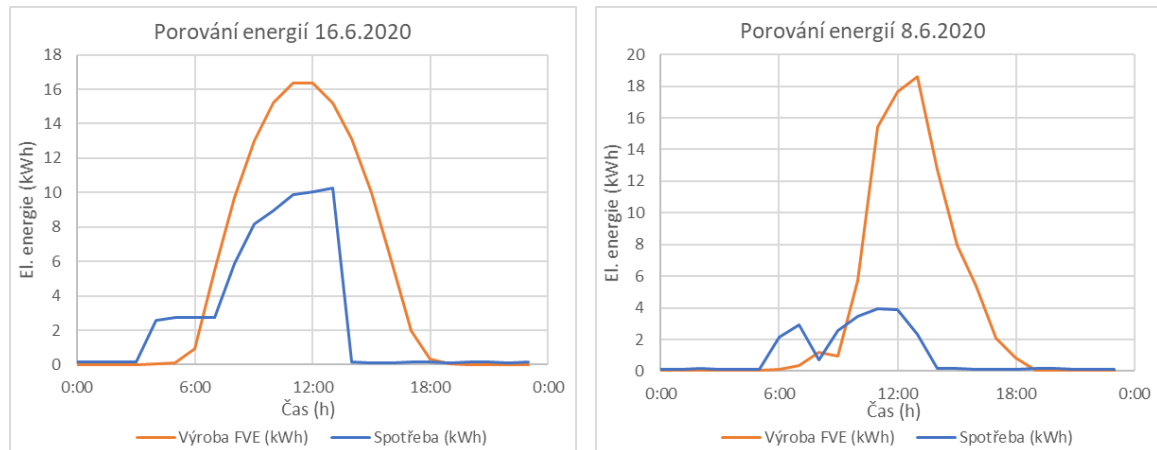
Obr. 3.8 Výroba FVE a spotřeba rekuperační jednotky pro vybrané dny v únoru

Při porovnání dat z měsíce září 2020 (Obr. 3.9) je vidět, že v případě chlazení budovy vzroste značným způsobem využití vyrobené elektrické energie. Na levém obrázku je vidět, že v odpoledních hodinách dochází k vypnutí chlazení vlivem nastavení pracovní doby a poměrně značnému nevyužití vyrobené elektrické energie. To může být opět eliminováno řízením výkonu chlazení v závislosti na výrobě FVE. Na pravém obrázku je vidět průběh při mírně zatažené obloze.



Obr. 3.9 Výroba FVE a spotřeba rekuperační jednotky pro vybrané dny v září

Na Obr. 3.10 je zobrazen průběh výkonů v měsíci červnu 2020 ze kterých je patrné, že výroba z FVE převyšuje spotřebu rekuperační jednotky. V tomto případě by bylo opět vhodné řídit výkon rekuperační jednotky v závislosti na výrobě FVE a chladit budovu i mimo nastavenou pracovní dobu. Tím by došlo k ochlazení stavební konstrukce budovy.



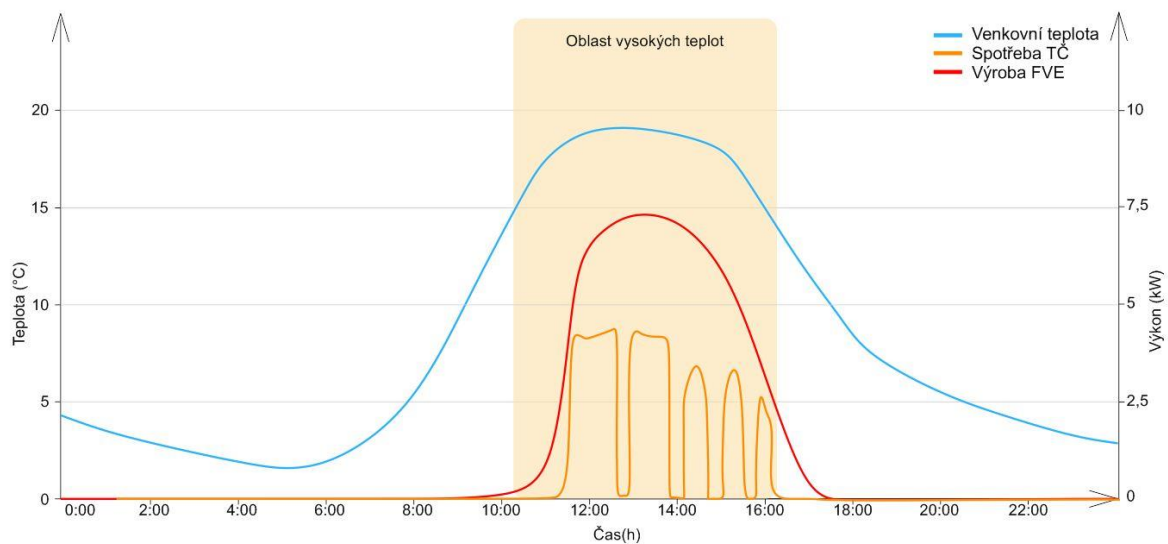
Obr. 3.10 Výroba FVE a spotřeba rekuperační jednotky pro vybrané dny v červnu

3.2.2 Shrnutí poznatků a přínosů

Z porovnání jednotlivých průběhů je patrné, že je kombinace FVE s rekuperační jednotkou, používanou pro chlazení objektu, velice výhodná. Je však nezbytné řídit výkon rekuperační jednotky i v závislosti na aktuální výrobě FVE tak, aby bylo dosaženo maximálního využití vyrobené elektrické energie. Při návrhu FVE je vždy nutné vycházet z reálné spotřeby objektu (denního průběhu výkonu) a optimalizovat podle něj výkon, orientaci a sklon FV modulů. Pro správný návrh je nezbytné provést simulaci výroby FVE v nějakém profesionálním software, který umožní návrh FVE optimalizovat tak, aby došlo k co největšímu využití vyrobené elektrické energie.

3.3 Řízení tepelného čerpadla

V případě, že objekt s instalovanou FVE obsahuje tepelné čerpadlo, je vhodné tyto systémy propojit tak, aby mezi sebou, pokud možno, maximálně spolupracovaly a tím byl využit potenciál vyrobené elektrické energie v místě spotřeby. V případě, že tepelné čerpadlo je v konfiguraci s vrty, či zemním kolektorem, stačí prakticky optimalizovat chod tepelného čerpadla na oblast, kde bude dle predikce maximální osvit a sledovat přetok do distribuční soustavy. V případě, že se bude jednat o tepelné čerpadlo vzduch-voda se scroll kompresorem, u kterého nelze plynule regulovat jeho výkon, je vhodné sledovat kromě osvitu a přetoku elektrické energie do DS i venkovní teplotu (COP závisí na venkovní teplotě). U tepelného čerpadla vzduch-voda s dvojitým rotačním kompresorem, který umožňuje spojitě řízení otáček (na základě analogového vstupu nebo pomocí komunikačního protokolu), je výhodné ještě systém řízení rozšířit o plynulou regulaci výkonu tepelného čerpadla na základě přetoků elektrické energie do distribuční soustavy [36, 37, 39]. Na Obr. 3.11 je zobrazeno posunutí intervalu chodu tepelného čerpadla podle výroby fotovoltaické elektrárny.

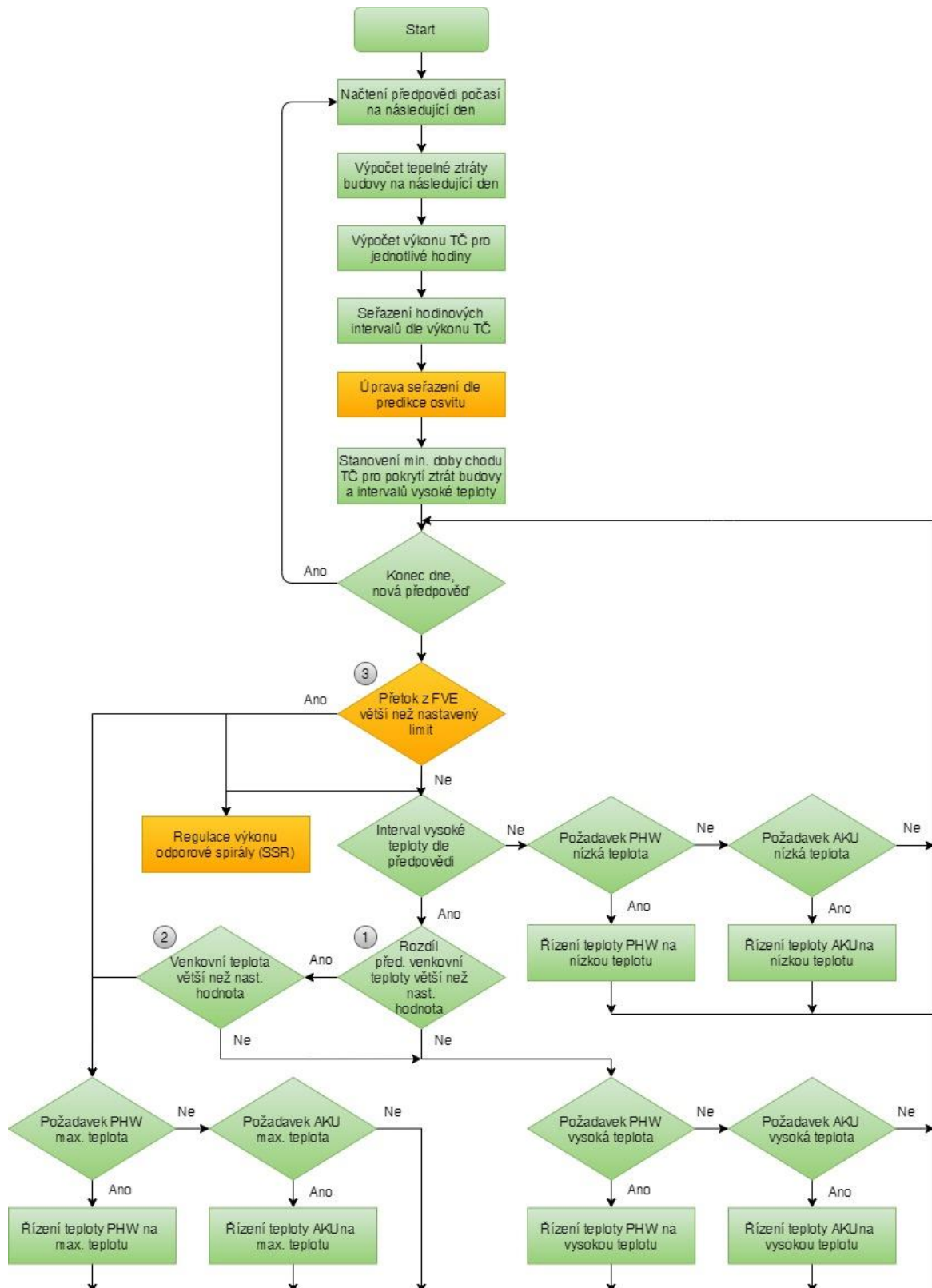


Obr. 3.11 Posunutí chodu TČ v návaznosti na předpokládaný výkon FVE

3.3.1 Popis systému

Řízení chodu tepelného čerpadla v závislosti na výrobě FVE navazuje na optimalizace chodu tepelného čerpadla v závislosti na venkovní teplotě, která byla podrobně popsána v kapitole 2.6. Pro lepší přehlednost jsou na vývojovém diagramu (Obr. 3.12) žlutě znázorněna rozšíření, která byla do vytvořeného systému implementována. Hodnoty intervalů se stejnou predikovanou hodnotou výroby TČ jsou navíc seřazeny dle predikované výroby elektrické energie z FVE na daný den (upřednostnění intervalů s vyšší predikovanou hodnotou výroby). Způsob predikce výroby z FVE je podrobně popsán v kapitole 3.1.

Pokud dochází k přetokům elektrické energie z FVE (Obr. 3.12 - bod 3), dojde při hodnotě nižší, než je nastavená mez, k plynulé regulaci výkonu odporové spirály umístěné v akumulacích nádržích (blíže popsáno v kapitole 3.4). Chod tepelného čerpadla je pak řízen dle intervalů vysoké teploty. Pokud je přetok do distribuční soustavy větší než stanovená mez (uvažován i aktuální řízený výkon do odporové zátěže), dojde k sepnutí tepelného čerpadla a teplota v nádrži PHW a akumulacích nádržích pro topení je řízena na maximální nastavenou teplotu (např. PHW 55 °C a AKU 40 °C). Pokud i nadále dochází k přetoku do DS (nedojde ke spuštění TČ nebo je výroba vyšší než jeho spotřeba), systém plynule reguluje tyto přetoky do odporové spirály umístěné v akumulacích nádržích pomocí SSR (blíže popsáno v kapitole 3.4).

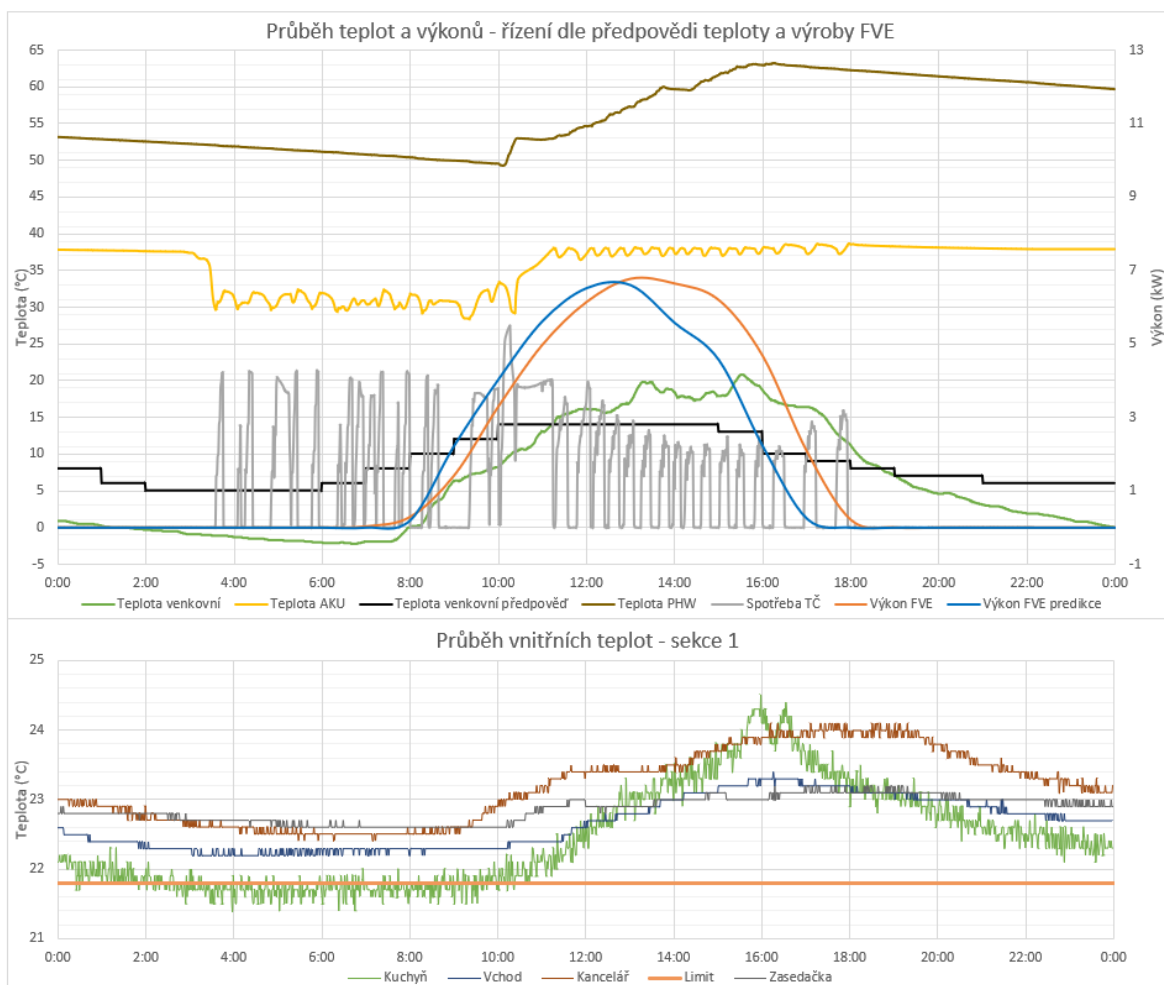


Obr. 3.12 Vývojový diagram pro integraci FVE do systému řízení TČ

3.3.2 Testovací provoz

Navržený systém byl otestován v rámci polyfunkčního areálu v Domažlicích, kde je instalovaná FVE o výkonu 9,2 kWp, která je umístěna na střeše administrativní budovy a funguje v režimu přebytku do DS.

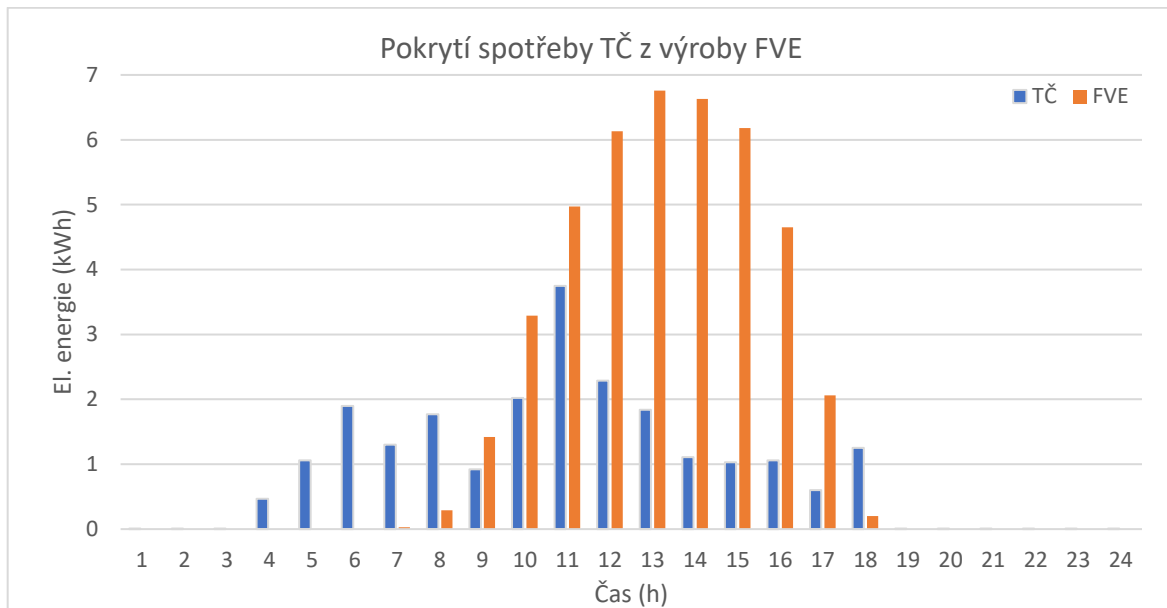
Provoz navrženého systému je zobrazen na Obr. 3.13. Z průběhu teploty PHW je vidět, že v dopoledních hodinách došlo k jejímu ohřátí pomocí TČ a následně byla voda v nádrži ohřívána z přebytků výroby FVE pomocí plynulého řízení výkonu pomocí SSR. Průběh předpokládaného výkonu FVE má podobný průběh, jako venkovní teplota, což umožňuje optimalizovat chod TČ jak s ohledem na venkovní teplotu (COP), tak s ohledem na výrobu FVE.



Obr. 3.13 Průběh teplot a výkonů při optimalizace chodu TČ dle predikce venkovní teploty a výroby FVE

Z průběhu spotřeby TČ je patrné, že převážná část spotřeby elektrické energie byla pokryta z výroby FVE. Regulace otopné soustavy byla nastavena stejně, jako v kapitole 2.6 a došlo zde opět k nežádoucímu sepnutí TČ v ranních hodinách při nízké venkovní teplotě.

Při eliminaci tohoto spuštění by bylo možné dosáhnout většího využití vyrobené elektrické energie z FVE. Porovnání hodinové výroby FVE a spotřeby TČ je uvedeno na Obr. 3.14.



Obr. 3.14 Pokrytí spotřeby TČ z výroby FVE v hodinových intervalech

3.3.3 Shrnutí poznatků a přínosů

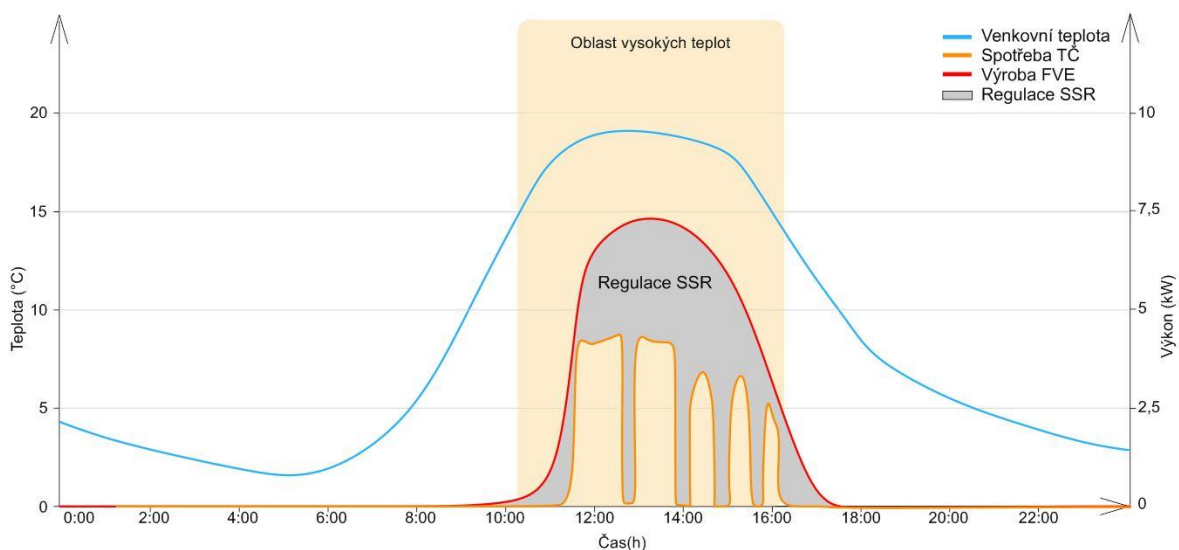
Naměřené výsledky ukazují, že je výhodné kombinovat chod TČ s FVE. Díky mnou navrženému způsobu regulace je možné spotřebu TČ díky předpovědi teploty a výroby FVE posunout tak, aby chod TČ co nejvíce odpovídal výrobě elektrické energie z FVE. Díky tomu je možné zvýšit hospodárnost celého systému a eliminovat přetok elektrické energie do DS.

Výhodou by také bylo využití TČ k chlazení budovy v letních měsících, kdy by spotřeba TČ mohla být převážně pokryta z výroby FVE. Tento způsob chlazení jsem v rámci navrženého systému netestoval.

3.4 Řízení odporové zátěže

Komerčních zařízení, která umožňují plynulé řízení výkonů do odporových spotřebičů, existuje celá řada. Ve většině případů jsou tato zařízení tvořena ze dvou konstrukčních částí (měřicí modul a hardwarová část pro řízení SSR vč. binárních výstupů). Ve většině případů nemůže být měřicí modul umístěn ve větší vzdálenosti od silové části, což celou instalaci do značné míry komplikuje, pokud se jedná o objekt s komplikovanější topologií.

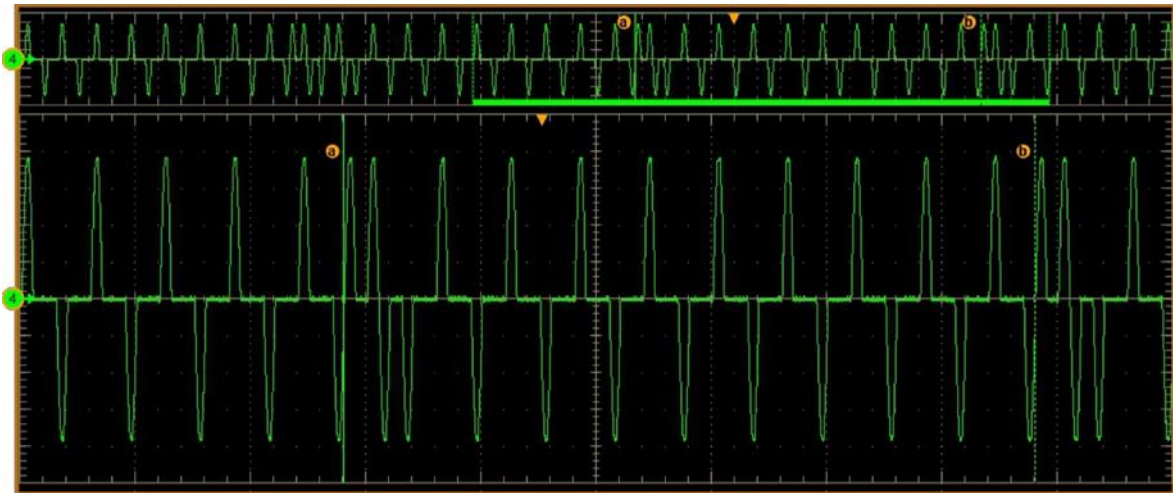
Mým cílem bylo vytvořit komplexní systém regulace přebytků z FVE primárně pro objekty (areály), které disponují složitější topologií (sestavují např. z většího počtu budov) a kde je nutné uvedený systém regulace začlenit do systému MaR (měření a regulace) celé budovy. U menších objektů či objektů s malou tepelnou ztrátou se velice často používá elektrické podlahové topení, které je možné také do jisté míry použít k efektivní akumulaci přebytečné elektrické energie z FVE pomocí SSR. Zobrazení možného využití přebytků elektrické energie do DS v kombinaci s chodem TČ je uvedeno na Obr. 3.15.



Obr. 3.15 Zobrazení oblastí pro regulaci odporové zátěže pomocí SSR

3.4.1 Popis systému

Systém regulace přetoků do DS byl odzkoušen opět v rámci polyfunkčního areálu v Domažlicích. Pro plynulou regulaci přetoků z fotovoltaické elektrárny byla použita SSR Carlo Galvazzi zejména z důvodu své konstrukce. Nevyžadují připojení dodatečného chladiče a SSR lze ovládat binárním výstupem 24 VDC přímo z PLC. Jednotlivé fáze jsou připojeny k elektrickému tělesu přes polovodičové relé (SSR), které umožňuje přesně řídit výkon dodávaný do akumulační nádrže pomocí pulzní šířkové modulace (PWM). Průběh proudu protékajícího jednou fází přes SSR při výkonu 700 W je zobrazen na Obr. 3.16.



Obr. 3.16 Průběh proudu přes SSR při výkonu ohřevu 700 W

Pro měření elektrických parametrů je možné použít celou řadu průmyslových analyzátorů sítě, které disponují komunikačním protokolem. Pro snadnou implementaci do řídicího systému je vhodné použít analyzátor sítě či elektroměr komunikující na sběrnici Modbus TCP/IP, který umožňuje propojení s řídicím systémem bez ohledu na jejich vzdálenost. Pokud je měřená část v malé vzdálenosti od řídicího PLC, je vhodné použít měřicí kartu WAGO, která je přímo na vnitřní sběrnici PLC a umožňuje rychlé načítání hodnot proudů v jednotlivých fázích. Při pomalé reakci systému může i při malých odchylkách z dlouhodobého hlediska docházet ke značným nepřesnostem (dodávka do DS či nechtěný odběr z DS). V obou případech je nutné měřit proud pomocí měřicích transformátorů proudu. Velikost převodu je dobré volit co nejbližší reálných odběrům z DS. Při nevhodně zvolených měřicích transformátorech proudu může dojít i k poměrně velké chybě regulace.

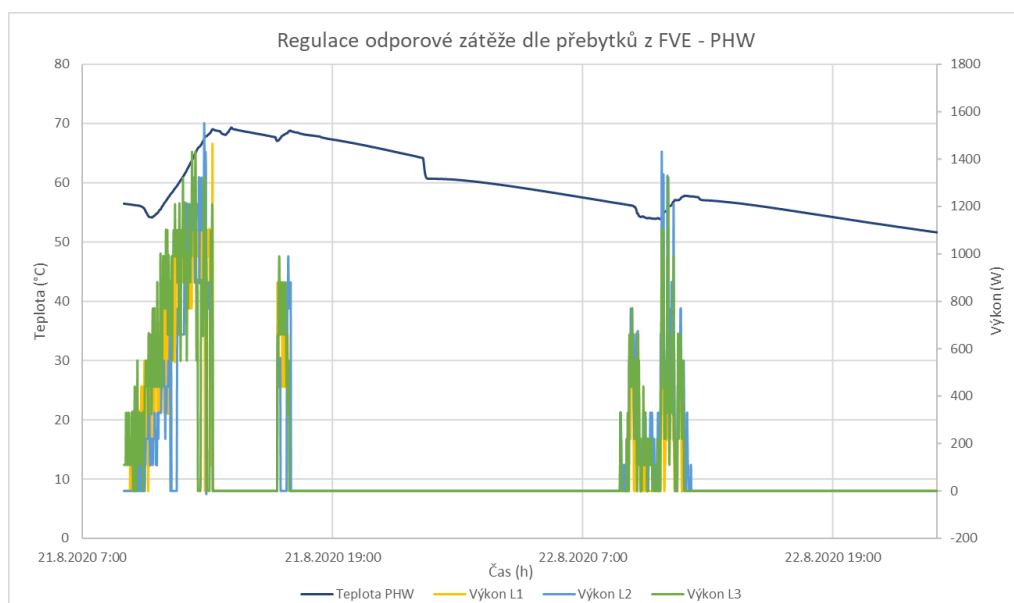
3.4.2 Testovací provoz

Pro otestování systému regulace byla použita instalace uvedená v kapitole (2.6), kde do akumulární nádrže PHW (objem 500 l) a akumulární nádrže otopného systému (celkový objem 1000 l, integrovaný přehřev PHW 200 l) byla instalována přímotopná tělesa o výkonu 6 kW zapojená do hvězdy s vyvedeným nulovým vodičem N, tak aby bylo možné provádět regulaci výkonu v každé fázi samostatně. Uživatelské rozhraní navrženého systému je zobrazeno na Obr. 3.17.



Obr. 3.17 Uživatelské rozhraní pro regulaci přetoků FVE do odporových patron

Z průběhu teploty v nádrži PHW (Obr. 3.18) je patrné, že lze pomocí plynulé regulace výkonu odporových těles v nádrži PHW poměrně dobře akumulovat přebytky z FVE. Nicméně zde dochází k ochlazení vody vlivem vlastní tepelné ztráty nádrže. Toto ochlazení je poměrně značné, a proto by v ideálním případě měla být využita ohřátá voda co nejdříve (sprchování ve večerních hodinách). V našem případě je spotřeba PHW velice malá a dá se říci, že je značné množství přebytků FVE spotřebováno na vlastní tepelnou ztrátu nádrže. To představuje problém zejména v letních měsících, kdy je ohřev technické místnosti vlivem těchto ztrát nežádoucí.



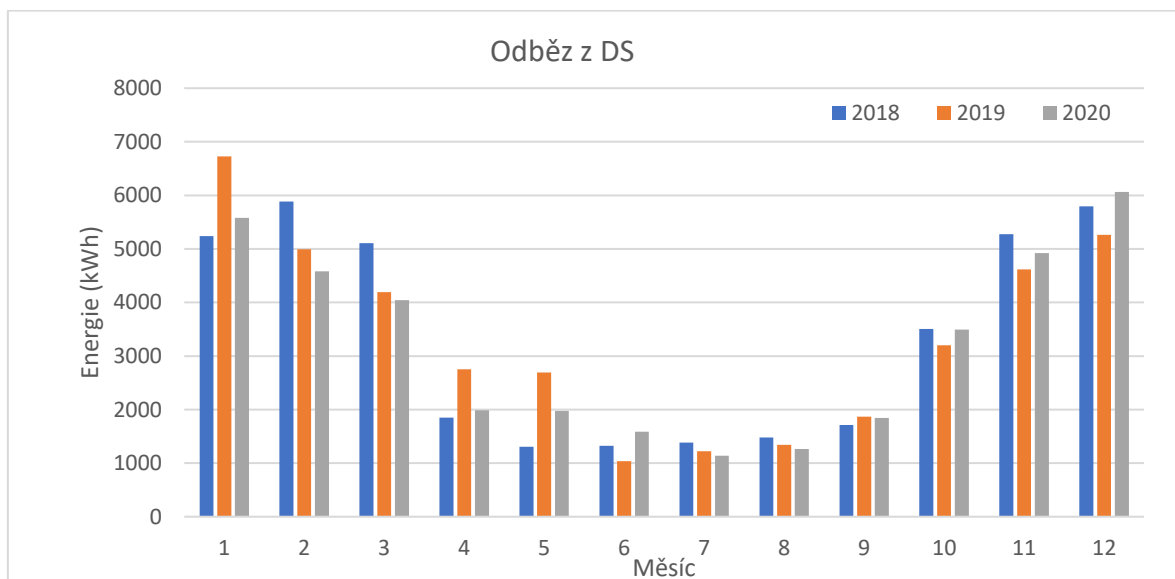
Obr. 3.18 Průběh regulace přebytků z FVE pro přípravu PHW

Výsledky v rámci dlouhodobého měření jsou uvedeny v Tabulka 3.5. Je zde uvedena výroba elektrické energie z FVE, dodávka do distribuční soustavy (DS) a odběr z DS pro jednotlivé měsíce v roce 2018-2020. K instalaci zařízení na řízení přetoků došlo v květnu roku 2020.

Tabulka 3.5 Energetická bilance polyfunkční areál v Domažlicích

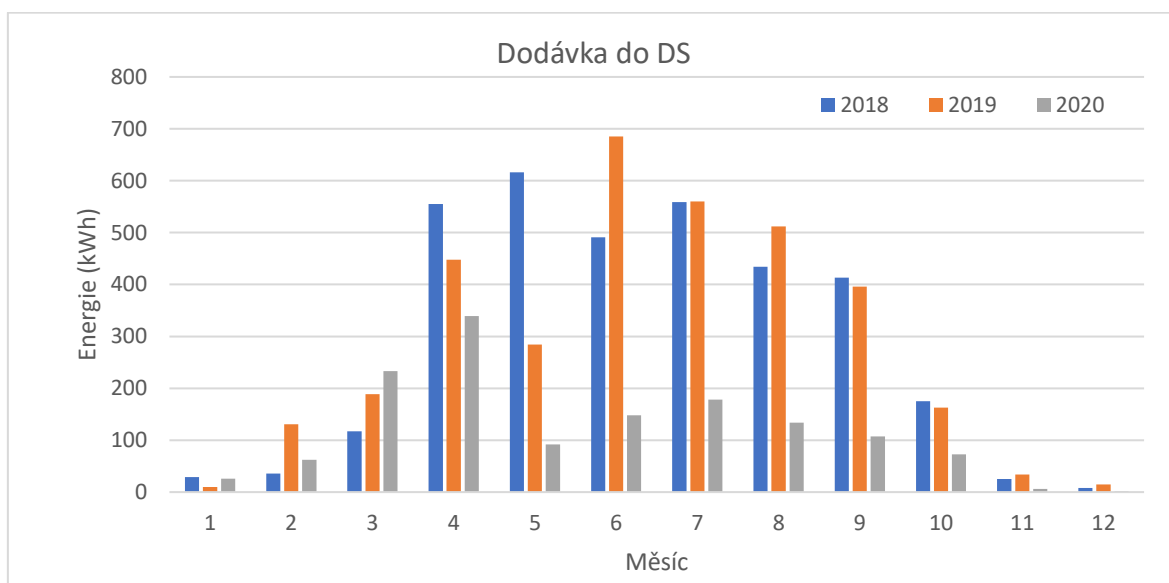
Měsíc	Výroba elektřiny			Dodávka do DS			Odběr z DS		
	2018	2019	2020	2018	2019	2020	2018	2019	2020
Leden	275	253	404	29	10	26	5241	6729	5579
Únor	590	823	532	36	131	62	5882	4994	4579
Březen	780	868	998	117	189	233	5107	4190	4041
Duben	1398	1258	1421	555	448	339	1847	2751	1987
Květen	1533	1132	1350	616	284	92	1307	2694	1978
Červen	1481	1501	1282	491	685	148	1325	1035	1588
Červenec	1341	1366	1377	559	560	178	1384	1223	1141
Srpen	1207	1134	1101	434	512	134	1480	1342	1263
Září	420	587	565	413	396	107	1710	1866	1842
Říjen	295	322	312	175	163	73	3503	3202	3495
Listopad	212	292	278	25	34	6	5277	4617	4922
Prosinec	195	290	178	8	15	2	5795	5261	6066

Z Obr. 3.19 je patrné, že se odběr v průběhu let 2018–2020 výrazně neměnil. Průběh odběru je způsoben především chodem tepelných čerpadel, které slouží jako primární zdroj tepla v rámci areálu. Drobné rozdíly ve spotřebě jsou způsobeny zejména změnou charakteru využití dílčích částí areálu.



Obr. 3.19 Porovnání měsíčních odběrů elektrické energie z DS

Obr. 3.20 představuje průběh dodávky elektrické energie do DS v roce 2018–2020. K instalaci zařízení došlo v květnu 2020, což je i velice dobře patrné z grafu, kdy došlo k výraznému poklesu nespotřebované elektrické energie. Nicméně přetoky do DS částečně přetrvávají, což je způsobeno objemem vody akumulčních nádob pro ohřev PWH a otopný systém. Další limitujícím prvkem jsou použítá topná tělesa, která jsou osazena vlastním termostatem, který umožňuje nastavit maximální teplotu 65 °C.



Obr. 3.20 Porovnání měsíčních dodávek elektrické energie do DS

Porovnáme-li míru vlastní spotřeby po instalaci systému (Tabulka 3.6), tak vidíme že míra využití vyrobené energie z FVE výrazně vzrostla v porovnání z předchozími roky. Menší míra využití vyrobené energie je patrná v říjnu, kdy byla tato funkce vypnuta z důvodu testování jiných funkcí otopné soustavy.

Tabulka 3.6 Míra vlastní spotřeby po instalaci regulace přebytků z FVE

Měsíc	Dodávka do DS po nasazení			Pokles přetoku v %	
	2018	2019	2020	2020/2018	2020/2019
Květen	616	284	92	85	68
Červen	491	685	148	70	78
Červenec	559	560	178	68	68
Srpen	434	512	134	69	74
Září	413	396	107	74	73
Říjen	175	163	73	58	55
Listopad	25	34	6	76	82
Prosinec	8	15	2	75	87

3.4.3 Shrnutí poznatků a přínosů

Z dosažených výsledků je patrné, že systém umožňuje optimalizovat přetoky elektrické energie do DS a použít je v místě výroby. Systém byl testován s poměrně vysokým off-setem, tj. byla preferována dodávka do DS oproti nežádoucímu odběru z DS. To společně s limitovaným objemem vody a nízkou maximální možnou teplotou akumulací nádrže způsobilo částečný přetok vyrobené elektrické energie z FVE do DS.

Při vysokých teplotách vody v akumulacích nádržích dochází k výraznějším tepelným ztrátám, které představují problém zejména v letních měsících (energie není efektivně využita). Z tohoto důvodu je vhodné systém aplikovat tam, kde je větší spotřeba PHW ideálně v odpoledních či večerních hodinách.

3.5 Řízené nabíjení elektromobilů

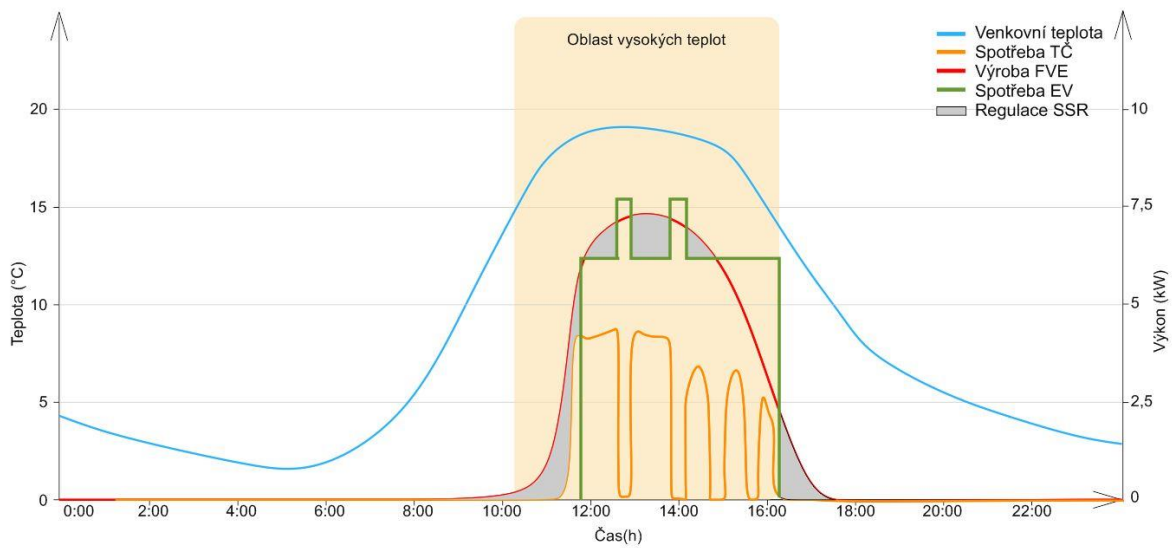
Prodeje elektromobilů (EV) rostou rok od roků více a s tím přichází i nutnost jejich dobíjení. Rychlé nabíječky jsou schopné zkrátit dobu nabíjení na přijatelnou dobu pro dlouhé cesty, ale pro každodenní nabíjení nejsou příliš vhodné (dochází k rychlejší degradaci baterií, omezený instalovaný počet, vyšší platby za odebranou energii). Pro každodenní dobíjení je vhodné využít AC nabíječky, které jsou cenově dostupné a mohou být instalované v bytových a komerčních objektech. Proto by výkon palubní AC nabíječky měl hrát důležitou roli při výběru vozidla. V ideálním případě by hodnota nabíjecího výkonu měla být co nejvyšší, čímž se výrazně zkrátí délka nabíjení. Z tohoto důvodu jsem se v rámci své práce zabýval pouze možnostmi řízení AC nabíjecích stanic o výkonu cca 22 kW. [22, 23, 47]

3.5.1 Popis systému

Při použití AC nabíjecích stanic o výkonu cca 22 kW může u řady menších objektů, které disponují nízkou hodnotou hlavního jističe před elektroměrem, nastat problém s odebíraným proudovým maximem. To lze vyřešit zvýšením hodnoty hlavního jističe, což s sebou ale přináší řadu vedlejších nákladů. Další možností je řízení nabíjecího výkonu elektromobilu. Řízené nabíjení navíc umožňuje efektivně využít vyrobenou elektrickou energii z FVE a tím snížit přetoky do DS.

Důležitým parametrem pro volbu nabíjecí stanice je možnost řízení výkonu nabíjení v průběhu nabíjecího procesu. Některé nabíjecí stanice disponují pouze omezením výkonu nabíjení na určitou mez (v průběhu nabíjení elektromobilu není možné měnit nabíjecí výkon). To je pro optimalizaci využití vyrobené elektrické energie z obnovitelných zdrojů (v našem případě FVE) nedostatečné.

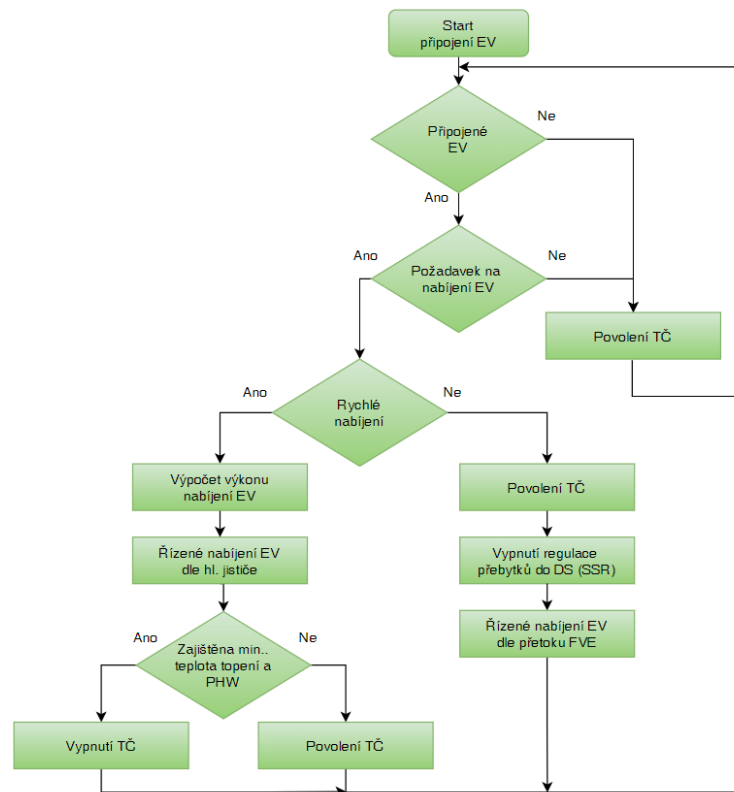
Pro testování jsem zvolil nabíjecí stanici od firmy Schneider electric (EVB1A22P4ERI), která disponuje komunikačním rozhraní Modbus TCP/IP a je tedy možné ji implementovat do řídicího systému budovy. Tato nabíjecí stanice umožňuje řízení nabíjecího proudu v rozmezí 8-32 A, který lze při nabíjení plynule regulovat. Ukázka oblasti vhodné pro nabíjení elektromobilu a možná regulace výkonu dobíjení dle výroby FVE je zobrazena na Obr. 3.21. Nabíjecí stanice je dále vybavena čtečkou RFID, pomocí které lze do řídicího systému zaznamenávat množství spotřebované elektrické energie pro daného uživatele.



Obr. 3.21 Zobrazení oblastí vhodných pro dobíjení elektromobilu a možná regulace výkonu dobíjení

Řízené nabíjení elektromobilu bylo implementováno do řídicího systému budovy uvedeného v kapitole 3.4. Na zjednodušeném vývojovém diagramu (Obr. 3.22) je zobrazen navržený způsob řízení nabíjecí stanice. Při připojení elektromobilu k nabíjecí stanici zvolí uživatel způsob nabíjení elektromobilu. Pokud uživatel potřebuje dobít elektromobil co nejrychleji, zvolí v uživatelském rozhraní proces rychlého nabíjení. Systém před zahájením nabíjení vypočte pro každou fázi maximální nabíjecí proud na základě hodnoty hlavního jističe před elektroměrem a aktuálního odebíraného proudu budovy v jednotlivých fázích (musí být uvažován příslušný proudový offset pro nahodilé spuštění spotřebičů). Nabíjecí proud je zvolen dle nejmenší vypočtené hodnoty proudu a je spuštěn nabíjecí proces. Pokud elektromobil odebírá nastavený proud, předpokládá se, že jeho vnitřní nabíječka umožňuje nabíjení vyšším proudem. Systém před zvýšením nabíjecího proudu zkontroluje, zda je dosažena minimální teplota v nádrži PHW a akumulací nádobě otopného systému. Pokud je tato podmínka splněna, dojde k odepnutí tepelného čerpadla a zvýšení nabíjecího výkonu elektromobilu.

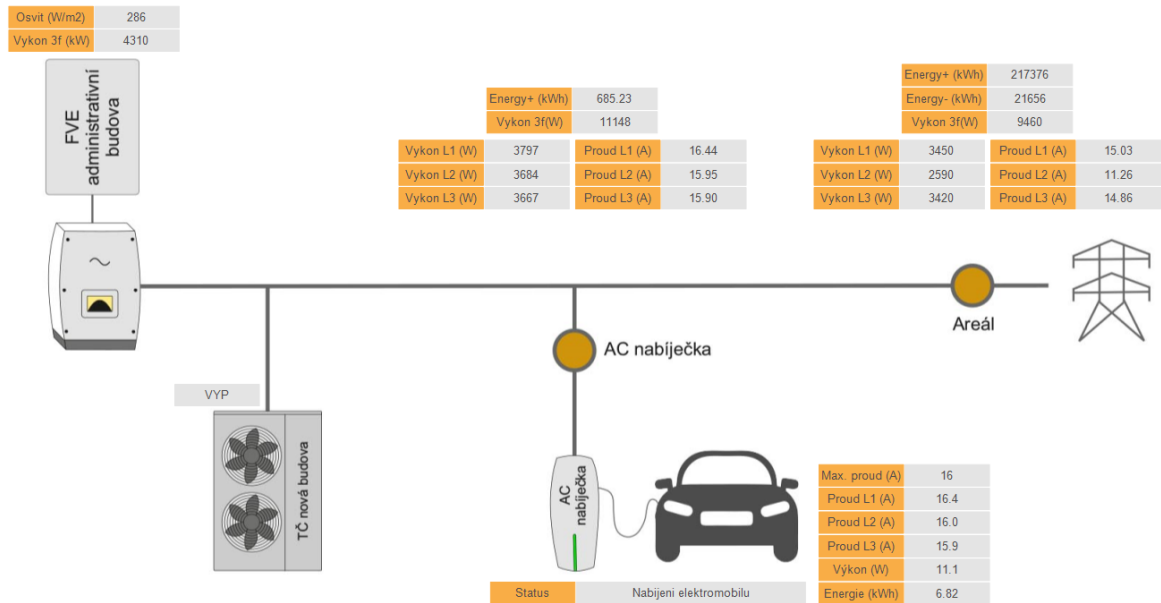
Pokud není požadavek na rychlé dobíjení, systém spustí proces nabíjení až v případě překročení přetoku do DS (uvažován i aktuální proud do SSR) nad stanovený limit proudu (v našem případě 3 A) na jakékoli fázi. Poté je nabíjecí proud regulován dle aktuálního přetoku elektrické energie do DS, je povolen provoz TČ dle kapitoly 2.6, ale je zakázána regulace plynulého řízení výkonu do odporové zátěže pomocí SSR.



Obr. 3.22 Vývojový diagram pro řízení nabíjecí stanice

3.5.2 Testovací provoz

Navržený systém byl testován v rámci polyfunkčního areálu v Domažlicích, v rámci kterého byla instalována AC nabíjecí stanice Schneider electric (EVB1A22P4ERI). Pro ověření správné funkce systému byl nabíjen elektromobil TESLA model S (85 kWh), který disponoval palubní nabíječkou 3x16 A. Ukázka uživatelského rozhraní je zobrazena na Obr. 3.23. V průběhu testovacího cyklu byl snižován maximální dovolený nabíjecí proud z hodnoty 16 A až do hodnoty 13 A, kdy došlo k automatickému odpojení elektromobilu a ukončení nabíjení. Při zvýšení proudu na 14 A se elektromobil začne opět nabíjet. To je zřejmě způsobeno tím, že se jedná o jeden z prvních elektromobilů TESLA. Dle zjištění od jiných majitelů již nové modely dovolují regulaci nabíjecího výkonu od hodnoty přibližně 6 A. Při výběru elektromobilu je tedy nutné brát ohled i na tuto skutečnost, pokud jej bude uživatel chtít využívat v rámci systému regulace výroby FVE.



Obr. 3.23 Uživatelské rozhraní pro AC nabíjecí stanici

Na základě poznatku, že jednotlivé elektromobily mají různý minimální nabíjecí proud, byla do systému implementována funkce, která nejprve zjistí minimální a maximální hodnotu nabíjecího proudu při připojení vozidla. Systém nejprve nastaví minimální nabíjecí proud dle nabíjecí stanice (v našem případě 8 A) a poté začne zvyšovat nabíjecí proud až do té doby, než se elektromobil začne nabíjet. Tuto hodnotu proudu pak považuje za minimální hodnotu pro systém regulace přebytků. Pokud se při následném zvyšování maximálního nabíjecího proudu nezvyšuje i hodnota odebíraného proudu, systém považuje tuto hodnotu za maximální hodnotu pro regulaci přebytků. Měřené hodnoty při zjišťování regulačního rozsahu nabíjení elektromobilu jsou uvedeny v Tabulka 3.7.

Tabulka 3.7 Způsob zjišťování regulačního rozsahu elektromobilu

Čas (s)	Nabíjecí stanice						FVE
	Status	Max. proud (A)	Výkon (W)	Proud L1 (A)	Proud L2 (A)	Proud L3 (A)	Výkon (W)
0	EV připojeno	8	5,04	0,06	0	0	5050,76
30	EV připojeno	9	5,04	0,06	0	0	5050,76
60	EV připojeno	10	5,04	0,06	0	0	5077,5
120	EV připojeno	12	5,04	0,06	0	0	5077,5
150	EV připojeno	13	5,04	0,06	0	0	5077,5
180	EV nabíjení	14	9182,96	12,87	12,92	12,86	5127,4
210	EV nabíjení	15	9960,48	13,96	14,05	13,86	5127,4
240	EV nabíjení	16	11281,68	15,83	15,93	15,78	5127,4
270	EV nabíjení	17	11281,68	15,83	15,93	15,78	5127,4

Pokud by tato funkce nebyla aplikována, docházelo by u některých typů vozidel k nechtěnému ukončení nabíjecího procesu a regulace by nebyla účinná. Nevýhodou tohoto řešení je to, že plynulá regulace výkonu je možná až od nabíjecího proudu 8 A. To do značné

míry limituje efektivní využití elektromobilu pro plynulou regulaci přebytků do DS z FVE (u malých výkonů) a dochází tím k nežádoucímu odběru z DS. Ukázka z testovacího provozu nabíjení elektromobilu je zobrazena na Obr. 3.24. Na Obr. 3.25 je zobrazeno vnitřní uspořádání AC nabíjecí stanice Schneider electric, která byla použita v rámci testovacího provozu.



Obr. 3.24 Testovací provoz nabíjecího procesu



Obr. 3.25 Nabíjecí stanice Schneider electric EVB1A22P4ER

3.5.3 Shrnutí poznatků a přínosů

Navržený způsob plynulého řízení nabíjení elektromobilu je navržen s ohledem na maximální využití vyrobené elektrické energie z FVE, kdy je potenciálně nevyužitá elektrická energie akumulovaná v bateriích elektromobilu. Pro správný chod systému je ale nutné brát v potaz typ použitého elektromobilu (s ohledem na jeho možnosti nabíjení pomocí palubní nabíječky) a typ použité AC nabíječky. V současné době jsou na trhu jednofázové, dvoufázové i třífázové palubní nabíječky s různou možností regulace výkonu. Mnou navržený systém, proto nejdříve automaticky zjistí možný regulační rozsah proudu a poté spustí proces nabíjení dle výkonu FVE. V případě jednofázových či dvoufázových palubních nabíječek systém přetoky na nezatížených fázích reguluje do akumulacních nádrží pomocí plynulé regulace výkonu odporové zátěže (SSR).

4 Adaptivní osvětlení

Zejména u komerčních a průmyslových objektů hraje podstatnou roli ve spotřebě elektrické energie i osvětlení vnitřního prostoru. Z tohoto důvodu jsem se ve své práci zabýval i touto problematikou, kterou jsem se snažil začlenit do celkové koncepce řízení budovy tak, aby jednotlivé části systému byly mezi sebou co nejvíce propojeny. Systém adaptivního osvětlení byl od počátku koncipován s důrazem na maximální úsporu elektrické energie. Současná řešení se na tuto problematiku také zaměřují, ale dle mého názoru plně nevyužívají možný potenciál úspor. [33, 42]

Velice často dochází k nahrazení stávajících svítidel a světelných zdrojů novými moderními LED technologiemi, které umožňují snížení spotřeby elektrické energie, snížení emisí CO₂ a lepší řízení provozu světelných zdrojů a svítidel. Toto opatření představuje jen první krok k efektivnímu řízení osvětlovacích soustav. Pro osoby pohybující se uvnitř budovy je nutné zajistit bezpečné a dostatečné osvětlení dle příslušných norem pro denní, sdružené či umělé osvětlovací soustavy v požadovaném místě a kvalitě. Použitím adaptivního osvětlení lze toho dosáhnout při minimální spotřebě elektrické energie. Adaptivní osvětlení dokáže u sdružené osvětlovací soustavy regulovat výkon jednotlivých svítidel s LED zdroji v návaznosti na denní osvětlení, a tím zajistit vždy potřebnou intenzitu osvětlení (osvětlenost např. 500 lx) dle příslušných norem (zejména ČSN 36 0020) pro konkrétní aplikační oblast a předpokládanou zrakovou činnost. Díky tomu nedochází ke zbytečnému zvýšení osvětlenosti v daném prostoru. [26, 27, 28, 29]

Přítomnostní čidla mohou zajistit osvětlení potřebného prostoru a autonomní chod celého systému bez zásahu uživatelů, což přináší další úsporu elektrické energie. Zároveň je možné systém snadno zakomponovat do systému regulace uvedeného v předchozích kapitolách. Systém nevyžaduje dodatečné řídicí PLC a je tedy možné využít jeden hardware. Přítomnostní čidla navíc mohou sloužit i pro řízení ventilace a teploty v rámci použití rekuperační jednotky, což dovoluje celý systém dále zefektivnit.

V rámci své zahraniční stáže během doktorského studia u německé společnosti Südluft Systemtechnik jsem vytvořil řídicí systém adaptivního osvětlení, který tato společnost v současné době nabízí svým zákazníkům v oblasti průmyslových kuchyní. Mnou navržený systém řízení osvětlovací soustavy lze však bez větších změn aplikovat i na ostatní prostory v budovách (kanceláře, dílny nebo skladové haly).

Pro zjednodušení terminologie se v následující části textu uvádí pouze pojem svítidlo, které ovšem představuje svítidlo s integrovaným zdrojem LED.

4.1 Komerčně používané systémy adaptivního osvětlení

V současné době je na trhu několik systémů pro řízení osvětlení, které jsou vyvíjené buď přímo výrobcí svítidel nebo specializovanými společnostmi. Tyto systémy mají svůj vlastní způsob komunikace (propojení např. pomocí Ethernetu, WiFi, atd.), který ovšem umožňuje použít pouze omezené druhy svítidel (většinou od jednoho výrobce). Další možností je použití standardizované komunikace, pomocí které je možné propojit různá světla, senzory a tlačítka od různých výrobců. Mezi nejrozšířenější standard v případě osvětlení patří DALI (Digital Addressable Lighting Interface). Díky širokému rozšíření mezi výrobci umožňuje DALI výběr z opravdu velkého množství svítidel. Z tohoto důvodu jsem se ve své práci věnoval převážně tomuto standardu.

Základní části systému jsou:

- Předřadníky - LED drivery svítidel, které zajišťují napájení světelných zdrojů.
- Vstupní zařízení – senzory (osvětlení, přítomnost) a zařízení umožňující uživatelské ovládání systému (tlačítka).
- Napájecí zdroj sběrnice – zajišťuje napájení pro DALI komunikaci.
- Aplikační kontrolér – představuje “mozek“ systému a slouží pro sběr dat, vyhodnocování a řízení jednotlivých částí systému. Dále může zajišťovat propojení s jiným systémem řízení budovy a vizualizaci celého systému.

Velkou předností systému je snadné propojení jednotlivých prvků na sběrnici, přehledná topologie a možnost změny přiřazení jednotlivých svítidel k zónám pomocí softwaru (bez nutnosti změny kabeláže). Na jednu sběrnici může být připojeno až 64 driverů a 64 vstupních zařízení (senzory, tlačítka). Pro snazší řízení systému je možné světla shlukovat do zón a scén. Pro větší instalace je nutné použít další sběrnice, které mohou být vzájemně propojené. Každému zařízení na sběrnici je přiřazena adresa, pomocí které komunikuje s ostatními zařízeními. Pro jednoduché aplikace je možný provoz systému bez aplikačního kontroléru. V tomto případě jsou skupiny nebo světla ovládána přímo tlačítky nebo senzory. Tento způsob však neumožňuje hlavní přednosti tohoto standardu a to adresaci, diagnostiku a pokročilé ovládání svítidel.

Jelikož je standard DALI velice rozšířený, je možné najít na trhu řadu řešení, které umožňují řízení systému osvětlení v budovách. Jedná se například o společnosti WAGO,

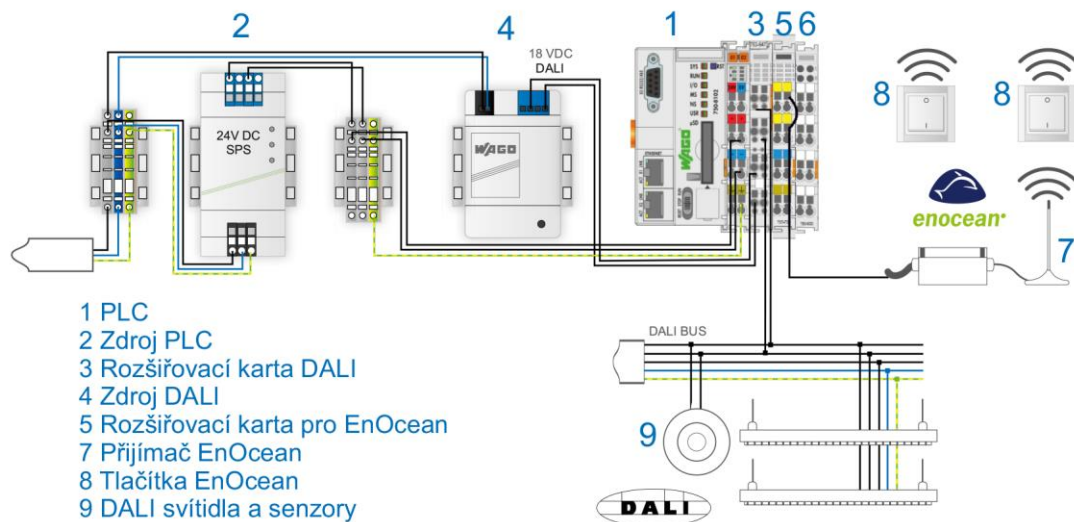
Foxtron, atd. Tyto systémy jsou však uzavřené a neumožňují přidání vlastní logiky, což může být u specifických požadavků problém. Stejně tomu bylo i v mém případě.

4.2 Popis navrženého systému

Mým cílem bylo navrhnout řídicí systém adaptivního osvětlení pro vnitřní prostory budov, který bude maximálně efektivní, spolehlivý, bude zajišťovat požadovanou intenzitu osvětlení dle příslušných norem a bude umožňovat značnou variabilitu systému dle požadavků zákazníka. Při návrhu a při následné verifikaci a analýze měření v praxi jsem vycházel především z požadavků normy pro sdružené osvětlení ČSN 36 0020 a z dalších souvisejících norem. Z důvodu specifických požadavků, které bylo nutné zakomponovat do řídicího systému, nebylo možné použít dostupná předpřipravená řešení pro adaptivní osvětlení, ani části funkčních bloků. Jednalo se zejména o:

- integraci vlastního řídicího postupu jednotlivých zón,
- výpočet spotřeby a úspory elektrické energie pro jednotlivé zóny a svítidla,
- odpojení napájení driverů LED svítidel,
- možnost úpravy uživatelského rozhraní.

Systém adaptivního osvětlení je navržen na technologii DALI, která umožňuje připojení svítidel a čidel od různých výrobců a jejich snadné připojení na sběrnici. Jako hlavní řídicí jednotka byl zvolen procesorový modul PFC200 od společnosti WAGO. V návaznosti na velikosti instalace jsou k procesorovému modulu připojeny potřebné karty. Systém lze rozšířit i o bezdrátová tlačítka EnOcean, která pro svoji funkci nepotřebují baterii. Energie potřebná pro vyslání zprávy je generována stisknutím tlačítka (elektrodynamický generátor). Procesorový modul zajišťuje také vizualizaci celého systému pomocí webového serveru. Díky tomu je možné systém ovládat pomocí dotykového panelu, počítače, mobilního telefonu či tabletu. Systém dále umožňuje napojení do nadřazeného řídicího systému budovy, buď pomocí binárních výstupů nebo různých komunikačních standardů (např. KNX, Modbus, atd.). Propojení jednotlivých částí systému je zobrazeno na Obr. 4.1. Integrace adaptivního osvětlení do systémů uvedených v předchozích kapitolách umožňuje dosáhnout vyšší úrovně automatizace objektu při úspoře pořizovacích a provozních nákladů.



Obr. 4.1 Popis jednotlivých částí navrženého systému adaptivního osvětlení

System je navržen pro připojení pěti DALI sběrnic, což umožňuje následující maximální konfiguraci:

- 32 zón,
- 320 svítidel,
- 80 senzorů přítomnosti a intenzity osvětlení,
- 80 bezdrátových tlačítek EnOcean.

Při návrhu adaptivního osvětlení jsem se soustředil zejména na jeho jednoduché a intuitivní ovládání. Z tohoto důvodu se během realizace několikrát upravovalo uživatelské rozhraní i samotné části programu tak, aby byl provoz a nastavování systému co nejvíce komfortní. Jelikož má systém za úkol také snižovat elektrickou spotřebu na osvětlení, bylo nutné nějakým způsobem jeho přínos verifikovat. Z tohoto důvodu jsem provedl měření vybraných svítidel. Měřením bylo zjištěno, že při vypnutí svítidla je stálý odběr driveru okolo 8 W (v závislosti na použitém typu). To při větším počtu svítidel představuje již nezanedbatelnou spotřebu, a proto jsem do řídicího systému přidal i možnost odepínání těchto driverů při vypnutém svítidle.

Pro kalkulaci spotřeby elektrické energie každého svítidla s LED bylo provedeno měření použitých typů svítidel s LED v rozsahu 0-100 % výkonu svítidla. Do programu lze naimportovat tabulku s naměřenými daty a tím aktualizovat seznam svítidel při použití nových typů. Díky tomu je možné stanovit aktuální příkon každého svítidla, jeho spotřebu a ušetřenou elektrickou energii. Podle umístění svítidel v zóně dochází k dopočtení stejných hodnot i pro jednotlivé zóny. Výpočet úspory se provádí každou sekundu dle zvolené

Pokud není v zóně detekován pohyb, po uplynutí doby zpoždění přítomnosti t_2 dojde ke snížení požadované hodnoty osvětlenosti na útlumovou hodnotu (např. 300 lx). Při opětovné detekci pohybu systém rozsvítí světla na vypočtenou hodnotu dle změřené osvětlenosti před rozsvícením. Systém dále udržuje hodnotu osvětlenosti v požadované hodnotě. Při prudkém poklesu naměřené hodnoty osvětlenosti (náhlé zastínění oken), které překročí nastavenou hodnotu hystereze rychlého stmívání H_2 , systém provede skokové zvýšení výkonu svítidel s LED tak, aby se co nejrychleji přiblížil k požadované hodnotě intenzity osvětlení (osvětlenosti).

Po přechodu na útlumový režim a uplynutí doby zpoždění útlumu t_3 dojde ke snížení výkonu svítidla na minimální hodnotu stmívání nebo k úplnému vypnutí (dle nastavení uživatele). Pokud je v systému nastavené odpojení napájení driveru, dojde po uplynutí nastavené doby t_4 k vypnutí napájení driverů v dané zóně. V zóně probíhá stále měření osvětlenosti a zaznamenávání detekce pohybu. Pokud je v zóně detekován pohyb, dojde k obnovení napájení driverů a svítidla s LED se rozsvítí na vypočtený výkon P_{poz} dle naměřené hodnoty osvětlenosti před rozsvícením E_{akt} , požadované hodnoty osvětlenosti E_{poz} , aktuálního výkonu svítidel P_{akt} a požadovaného výkonu svítidel při zapnutí P_{zap} .

$$P_{poz} = P_{akt} + \left(1 - \frac{E_{akt}}{E_{poz}}\right) \cdot P_{zap} \quad (\%) \quad (4.3.1)$$

Díky bezdrátovým tlačítkům EnOcean je možné jednoduše instalovat ovládací tlačítka na různé povrchy v prostorách kuchyně a tím umožnit obsluhu zvýšení/snížení výkonu svítidel v požadované zóně. Pokud obsluha zasáhne do automatického systému řízení, dojde po definované době k návratu do automatického řízení na požadovanou intenzitu osvětlení.

4.4 Popis vytvořeného programu

Řídicí systém adaptivního osvětlení jsme vytvořili v programovacím prostředí e!COCKPIT od společnosti WAGO. Program byl vytvořen kompletně od začátku, což sice prodloužilo samotnou dobu programování, ale umožnilo do systému začlenit veškeré požadavky a úpravy, které vplynuly při testovacím provozu adaptivního osvětlení. Program jsem vytvořil tak, aby umožnil snadnou instalaci systému adaptivního osvětlení pomocí parametrizace systému bez nutnosti změny samotného kódu. To umožňuje snadnou a rychlou instalaci celého systému pomocí webového prohlížeče nebo dotykové obrazovky. Detailní popis vytvořeného programu je uveden v Příloze 1.

4.5 Testovací provoz

System je již druhým rokem testován v podnikové jídelně (Obr. 4.3), chodbě a testovací místnosti firmy Südluft v německém Plattlingu. Chodba a testovací místnost nedisponuje žádnými okny, což není pro systém adaptivního osvětlení příliš výhodné. Naopak jídelna má poměrně velké množství oken, což umožňuje větší využití denního osvětlení v daném prostoru. Dosažení požadované úrovně osvětlenosti je možné při nižším výkonu svítidel. Tím se systém stává více hospodárným.

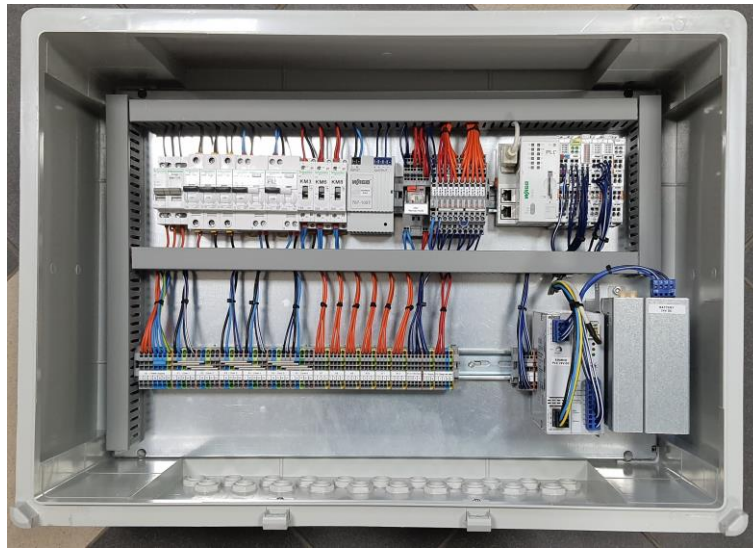


Obr. 4.3 Ukázka testovacího prostoru pro navržený systém adaptivního osvětlení

Během testování docházelo k postupnému vylepšování systému tak, aby byl jeho chod co nejvíce hospodárný. Do systému byl přidán algoritmus, který odhaduje, na jaký výkon se má svítidlo rozsvítit při přechodu do normálního režimu regulace (např. 500 lx) v návaznosti na předem změřené hodnotě osvětlenosti dle rovnice (4.3.1). Dále bylo zjištěno, že není příliš vhodné povolit vypnutí regulace osvětlení pomocí bezdrátových tlačítek, jelikož se několikrát stalo, že nepoučená osoba při odchodu vypnula pomocí těchto tlačítek celý systém regulace. Z tohoto důvodu byla do systému pro jednotlivá tlačítka přidána možnost nastavení, zda má tlačítko sloužit pouze pro uživatelskou změnu výkonu svítidla (dlouhý stisk) nebo zda má sloužit i pro vypínání regulace příslušné zóny (krátký stisk). Z provozu systému také vyplynulo, že pokud je systém adaptivního osvětlení dobře navržen a nastaven, není nutné do jeho regulace nikterak zasahovat. Lze jej tedy používat i bez ovládacích bezdrátových tlačítek.

Pro snadnou instalaci systému v budově jsou veškeré komponenty systému propojeny předem v rozvaděčové skříni a otestovány. V místě instalace jsou připojeny vývody

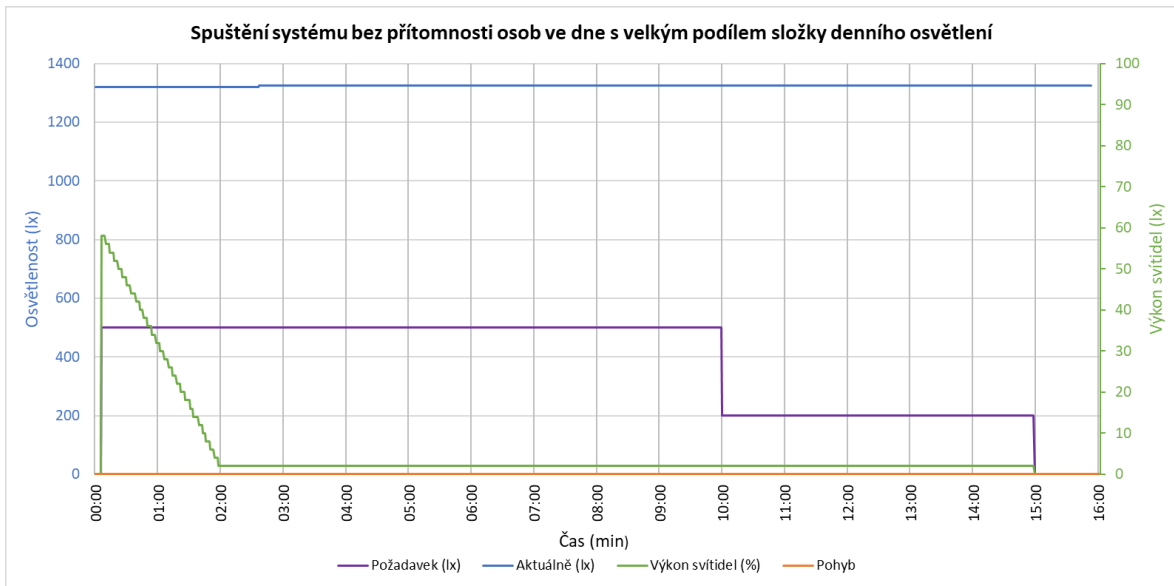
k zónám, napájení systému a případné další vývody pomocí řadových svorek. Ukázka osazení řídicího systému v rozvaděčové skříni je na Obr. 4.4.



Obr. 4.4 Rozmístění komponentů v rozvaděči

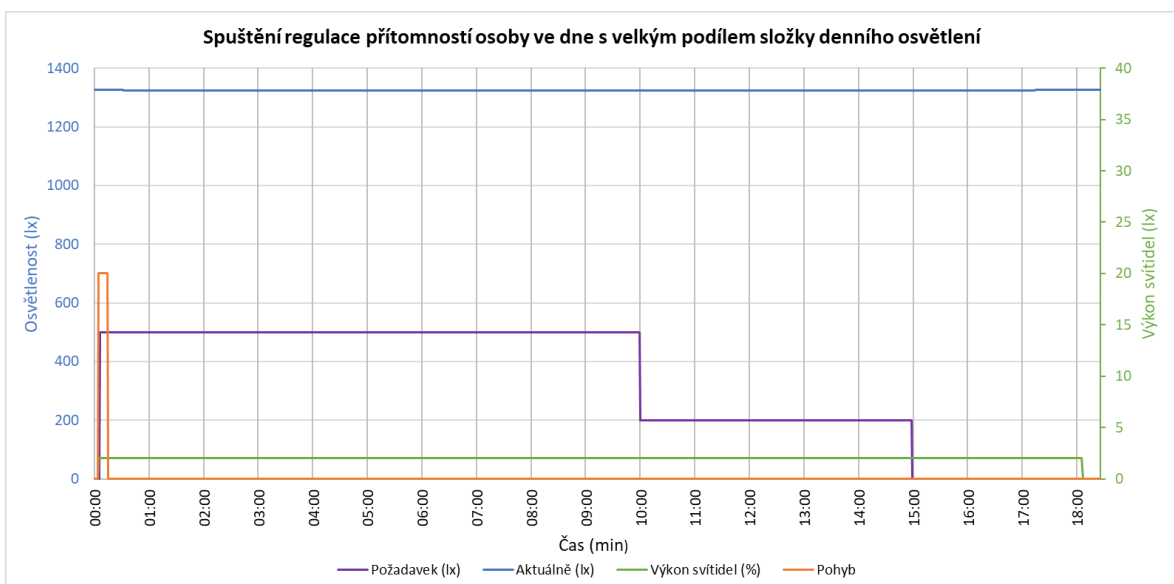
Pro ověření správné funkčnosti systému byl do programu přidán funkční blok, který zajišťuje ukládání aktuálních dat z jednotlivých zón na SD kartu vloženou do PLC v sekundovém intervalu. Servisní technik může tuto funkci zapnout, provést kontrolní měření a následně data stáhnout pomocí FTP připojení. V rámci testovacího provozu byla tato možnost často používána. Na základě naměřených dat docházelo k úpravám nastavených parametrů i samotného kódu. Vybrané příklady funkčnosti systému adaptivního osvětlení jsou zobrazeny na následujících grafech.

Chod systému při prvotním spuštění bez přítomnosti osob v příslušné zóně a s velkým podílem složky denního světla (slunečný den) při sdruženém osvětlení je vidět na Obr. 4.5. Z průběhu měřené osvětlenosti je patrné, že požadovaná osvětlenost v zóně je zajištěna denním osvětlením. Naměřená hodnota se pohybuje kolem 1320 luxů, což je maximální hodnota, kterou může senzor osvětlenosti změřit. Při prvotním spuštění (stisknutí tlačítka zóny) dojde k rozsvícení svítidel na nastavenou hodnotu (60 %) a k následné regulaci svítidel pro dosažení požadované hodnoty osvětlenosti. V tomto případě se svítidla regulují až na minimální nastavenou hodnotu výkonu (2 %). Po uplynutí stanovené doby dojde ke zhasnutí svítidel a systém čeká na detekci pohybu nebo jiný uživatelský zásah.



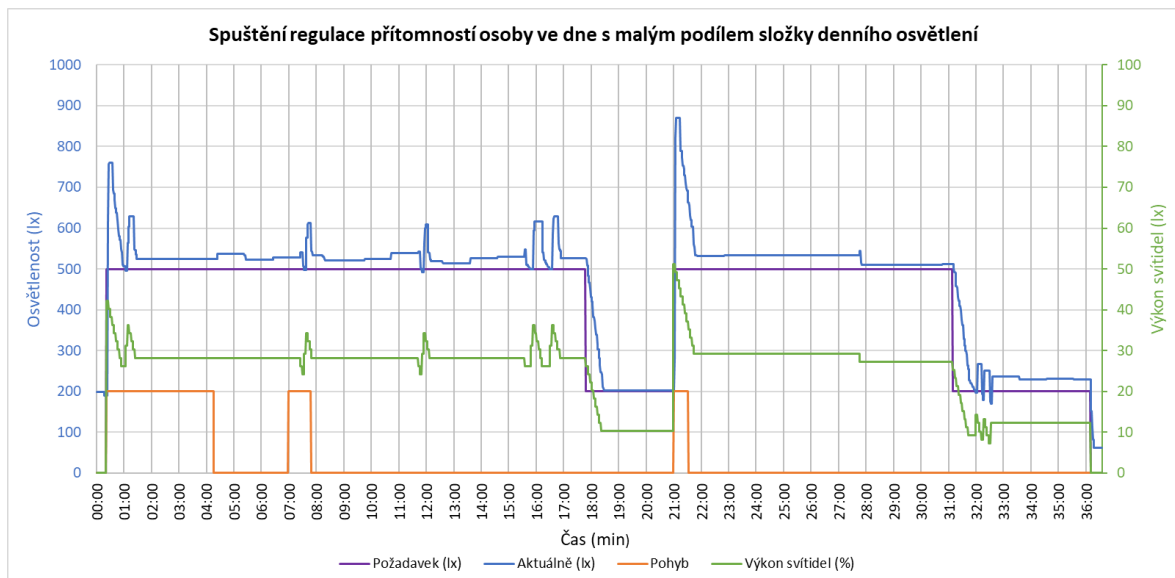
Obr. 4.5 Průběh regulace systému - spuštění bez přítomnosti osob s velkým podílem denního osvětlení

Pokud systém detekuje pohyb osoby, dojde k rozsvícení svítidel na vypočtený výkon (odhad výkonu, který by měl stačit pro splnění požadované hodnoty osvětlenosti) a následné regulaci. Na Obr. 4.6 je zobrazen tento stav ve dne s velkým podílem složky denního osvětlení a minimálním podílem složky umělého osvětlení. Při detekci pohybu dojde k rozsvícení svítidel pouze na minimální hodnotu výkonu (2 %) a tím k další úspoře (systém nemusí regulovat výkon svítidel např. z počátečního výkonu 60 %).



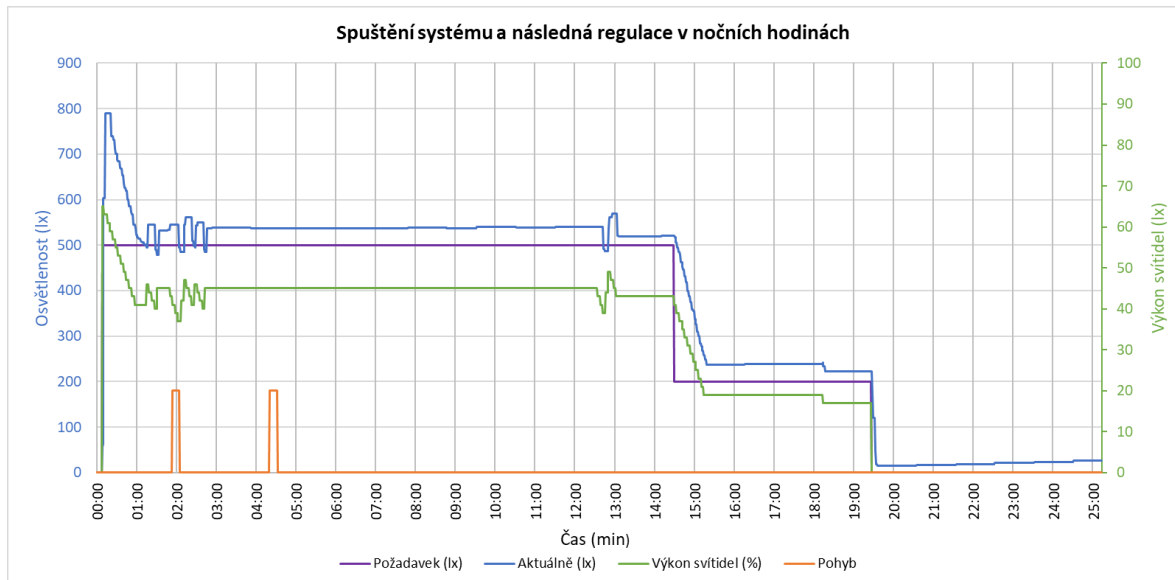
Obr. 4.6 Průběh regulace systému - detekce přítomnosti osob s velkým podílem denního osvětlení

V případě malého podílu složky denního osvětlení a převažující složky umělého osvětlení dojde při detekci pohybu (zapnutá regulace) k rozsvícení svítidel na vypočtenou hodnotu (42 %). Měřená osvětlenost vzroste z 190 lx na 760 lx a systém následně začne regulovat výkon tak, aby byla dosažena požadovaná hodnota osvětlenosti (500 lx). Z Obr. 4.7 je patrné, že před ustálením dojde ještě k náhlému zvýšení výkonu o 5 %. To je způsobeno tím, že se systém snaží udržet minimálně nastavenou hodnotu osvětlenosti a při regulaci došlo ke změření menší hodnoty než je nastavená hodnota. Systém proto zvýší výkon svítidel o 5 % a poté začne znovu ubírat výkon o 1 %, než dojde k ustálení na určité hodnotě. Tento způsob regulace (zvyšování o 5 % a snižování o 1 %) byl zvolen s ohledem na to, aby byla v daném prostoru co nejrychleji docílena požadovaná osvětlenost. Toto občasné zakmitnutí není v daném prostoru zpozorovatelné a nepůsobí tak rušivě. Po uplynutí stanoveného času dojde ke snížení požadované hodnoty osvětlenosti na 200 lx. Při detekci pohybu systém opět vypočte požadovanou hodnotu výkonu svítidla a začne regulovat na požadovanou hodnotu. V tento okamžik je zřetelný větší překmit, který lze eliminovat změnou parametrů pro výpočet požadované hodnoty výkonu svítidla. Při nízké hodnotě požadovaného výkonu svítidel může však dojít k tomu, že se systém rozsvítí pod požadovanou úrovní osvětlenosti a nedojde tak k okamžitému splnění požadovaného limitu. Navíc se jednotlivé zóny mezi sebou ovlivňují, což může způsobit, že dojde k ustálení regulace až po delší době. Z tohoto důvodu byla raději zvolena varianta s větším výkonem a následnou regulací.



Obr. 4.7 Průběh regulace systému – detekce přítomnosti osob s malým podílem denního osvětlení

V řadě případů bude systém provozován i v nočních hodinách nebo v prostorách s velmi nízkým podílem denního světla. To bylo prokázáno na první instalaci systému v prostorách kantýny TUV v Mnichově, kde je poměrně malý počet oken. Strop kuchyně je kvůli technologii odvětrávání ve výšce cca 2,5 m a v případě rozsvícení všech svítidel na výkon 100 % dosahovala hodnota osvětlenosti až 2300 lx. Systém tedy šetří provozní náklady na osvětlení i v noci, což dokládá měření z podnikové jídelny firmy Südluft Systemtechnik (Obr. 4.8). Na tomto obrázku je patrné že pro splnění požadovaného limitu v nočních hodinách je možné provozovat svítidla s výkonem 50 %. Delší počáteční doba ustálení a kolísání hodnoty měřené osvětlenosti je způsobena větším ovlivňováním jednotlivých zón v nočních hodinách.

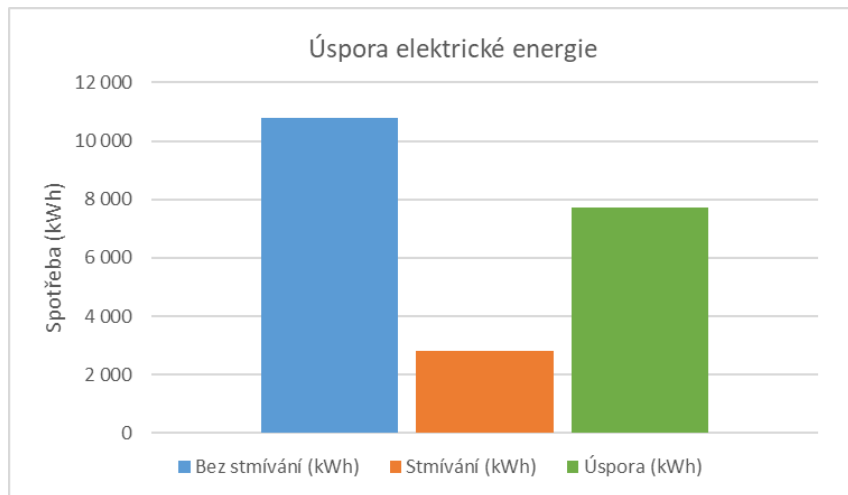


Obr. 4.8 Průběh regulace systému – spuštění systému a následná regulace v nočních hodinách

Spotřeby dle jednotlivých zón za celou dobu testovacího provozu (646 dní) jsou uvedeny v Tabulka 4.1. Celková úspora energie je 7 710 kWh. Odepínání driverů bylo použito pouze pro první čtyři zóny mimo pracovní dobu (12 h za den), což přineslo úsporu 1 402 kWh. Pokud by se odepínání driverů rozšířilo i o další tři zóny, bylo by možné uspořit za tuto dobu dalších 687 kWh.

Tabulka 4.1 Spotřeba elektrické energie v rámci testovacího provozu

Název	Počet svítidel (ks)	Stmívání (kWh)	Bez stmívání (kWh)	Úspora (kWh)	Čas provozu (dny)
Chodba	6	492,10	1 249,34	757,24	646
Kantýna	6	416,79	2 169,41	1 752,62	646
Šatna	8	830,92	2 601,69	1 770,77	646
Kuchyň	7	572,44	1 470,85	898,40	646
Test. místnost Z1	4	280,30	1 030,20	749,92	569
Test. místnost Z2	8	316,69	1 728,85	1 412,28	569
Test. místnost Z3	2	148,50	517,47	368,97	569
Celkem		3 057,75	10 767,80	7 710,21	



Obr. 4.9 Grafické zobrazení úspory elektrické energie

4.6 Shrnutí poznatků a přínosů

Z naměřených hodnot a praktických zkušeností s provozem navrženého systému adaptivního osvětlení je patrný jeho přínos. Hlavním přínosem je snížení spotřeby elektrické energie při dodržení požadované osvětlenosti. Tím dochází i ke snížení produkce CO₂, což je v dnešní době stále více diskutované téma. Dalším přínosem je plně autonomní chod s možností úpravy intenzity osvětlení v dané zóně obsluhou. Systém umožňuje automatickou diagnostiku svítidel a senzorů, průběžné ukládání požadovaných hodnot a dálkový přístup, což přispívá ke zvýšení spolehlivosti celého systému. Další předností je automatický výpočet spotřeby elektrické energie, díky kterému je možné vidět aktuální úsporu při použití navrženého systému adaptivního osvětlení. Oproti standardně nabízeným systémům disponuje mnou navržený systém adaptivního osvětlení funkcí pro odepínání napájení driverů, což zejména u rozsáhlejších aplikací představuje další znatelnou úsporu provozních nákladů.

Závěr

Předkládaná disertační práce je věnována problematice efektivního řízení TZB pro bytové a komerční objekty v kombinaci s obnovitelnými zdroji energie. Velký důraz jsem kladl na jejich hospodárný provoz a maximální využití vyrobené elektrické energie z FVE.

V rámci disertační práce jsem vytvořil způsob off-line predikce venkovní teploty, který respektuje průběh teploty v jednotlivých měsících. Při porovnání predikovaného průběhu venkovní teploty s reálným průběhem bylo zjištěno, že systém je schopný obstojně fungovat pouze, když nedochází k příchodu teplé nebo studené fronty. Do jisté míry tím byla vyvrácena pracovní hypotéza **a)** uvedená v kapitole 1.2. Pro správnou optimalizaci chodu TČ či rekuperační jednotky je nezbytné využívat on-line předpověď venkovní teploty a navrženou off-line predikci využívat jen v případě výpadku komunikace se serverem poskytující předpověď teploty.

V další části své práce jsem se zaměřil na optimalizaci chodu rekuperačních jednotek a tepelného čerpadla. Vytvořil jsem měřicí systém a software pro měření vlastností rekuperačních jednotek, který slouží při jejich vývoji a optimalizaci. Navržený systém využívá firma Südluft Systemtechnik v rámci své laboratoře.

Pro ověření funkčnosti rekuperační jednotky jsem vytvořil komplexní měřicí systém, na kterém jsem si ověřil chování rekuperační jednotky a možnosti optimalizace jejího chodu v reálném provozu. Na základě získaných poznatků jsem navrhl a vytvořil řídicí systém pro centrální rekuperační jednotku, kde jsem kladl důraz zejména na její hospodárný provoz. Zaměřil jsem se na možnost využití rekuperační jednotky pro chlazení budovy v letních měsících. K tomu jsem využil proces nočního ochlazování, kdy systém umožňuje ochladit vnitřní prostory studeným přírodním vzduchem. Z naměřených výsledků je patrné, že řízení tohoto chodu dle časových intervalů je nevhodné. Z tohoto důvodu jsem do řídicího systému implementoval on-line předpověď venkovní teploty a osvit, díky které systém automaticky spustí proces nočního ochlazování na základě předpokládaného průběhu venkovní teploty. Předpověď teploty navíc umožňuje optimalizovat chod nočního ochlazování v časech s nejnižší venkovní teplotou. V rámci této kapitoly byla potvrzena hypotéza **b)** uvedená v kapitole 1.2, ale pouze za předpokladu, že je řídicí systém rekuperační jednotky správně nastaven. V případě chybného nastavení může být provoz rekuperační jednotky značně nevhodný.

Dále jsem se zaměřil na optimalizaci chodu TČ vzduch-voda v závislosti na předpokládané venkovní teplotě. Pro tuto optimalizaci jsem využil on-line předpověď

venkovní teploty. Navržený systém vypočte předpokládanou energii nutnou pro udržení tepelného komfortu uvnitř objektu a předpokládanou energii dodanou pomocí TČ na následujících 24 h. Pokud je to možné, systém přesune provoz TČ do oblasti s vyšším COP. Systém je možné použít pouze v případě objektu s velkou akumulací schopností. Snížení provozních nákladů je však dosaženo na úkor větší difference požadované teploty v místnosti. Navržený systém jsem dále rozšířil o predikci výroby FVE, která zohledňuje chod TČ i v závislosti na předpokládané výrobě z FVE. Pokud budeme uvažovat pouze optimalizaci na základě predikce venkovní teploty, dojde k výraznější úspoře elektrické energie pouze ve dnech s velkým rozdílem minimální a maximální venkovních teploty. Tato úspora se pohybuje v rozmezí 5-10 %. Zkombinujeme-li provoz TČ se správně navrženou FVE, je možné dosáhnout výraznějších úspor díky zvýšení vlastní spotřeby z FVE. Tím je potvrzena hypotéza **c)** uvedená v kapitole 1.2.

Další část práce je věnována optimalizaci využití vyrobené elektrické energie z FVE. V této části jsem provedl návrh FVE pro centrální rekuperační jednotku, vytvořil systém pro plynulé řízení výkonu odporové zátěže pomocí SSR a ověřil možnost řízení nabíjecího procesu elektromobilu dle výroby FVE. V této kapitole jsem do jisté míry vyvrátil pracovní hypotézu **d)** uvedenou v kapitole 1.2. AC nabíjecí stanice umožňují řídit výkon nabíjení pouze od určitého rozsahu (například od 8 A). Regulace nabíjecího proudu je navíc limitována typem připojeného elektromobilu. To do jisté míry limituje smysluplné využití plynulé regulace výkonu nabíjení u FVE s nízkým instalovaným výkonem. Na základě těchto poznatků jsem navrhl a vytvořil systém, který umožňuje rozpoznat nabíjecí rozsah připojeného elektromobilu.

Na závěr jsem svoji práci rozšířil o problematiku adaptivního osvětlení, kterou jsem se zabýval v rámci své zahraniční stáže, kde jsem u komerčně používaných systémů narazil na řadu nedostatků, které vedou ke zvýšení provozních nákladů. Za tímto účelem jsem vytvořil vlastní systém adaptivního osvětlení, který klade velký důraz na snížení provozních nákladů. Jako jediný z dostupných systémů umožňuje odepínání napájení driverů svítidel, což má význam zejména u rozsáhlých systémů s velkým množstvím svítidel. To potvrzuje hypotézu **e)** uvedenou v kapitole 1.2. Tento systém adaptivního osvětlení je instalován například v kuchyni Technické univerzity v Mnichově.

Vlastní přínos práce (shrnutí)

Vlastní přínos práce jsem shrnul do následujících bodů:

- a) Navrhl a vytvořil jsem způsob off-line predikce venkovní teploty a ověřil možnosti využití předpovědi venkovní teploty pro řízení rekuperačních jednotek a tepelných čerpadel v reálných aplikacích.
- b) Navrhl a vytvořil jsem systém pro sběr dat a vyhodnocování provozu rekuperačních jednotek vedoucí k jejich optimalizaci při vývoji a následném provozu.
- c) Zhodnotil jsem možnosti využití předpovědi osvětlení a výroby FVE v rámci řídicího systému budovy.
- d) Navrhl a vytvořil jsem řídicí systém pro optimalizaci chodu tepelného čerpadla v závislosti na předpokládané venkovní teplotě a výkonu FVE s ohledem na tepelnou ztrátu objektu při zachování požadovaného komfortu.
- e) V rámci plynulé regulace výkonu nabíjení elektromobilu dle výroby FVE jsem do systému integroval mnou navrženou funkci umožňující detekci rozsahu nabíjecího výkonu elektromobilu.
- f) Navrhl a vytvořil jsem systém adaptivního osvětlení s důrazem na úsporu elektrické energie. Jako jediný systém vypočítává spotřebu každého svítidla a umožňuje odepnutí napájení driverů při nečinnosti svítidla.

Další možnosti výzkumu

Možnosti pokračování mé práce vidím především v integraci předpovědi venkovní teploty a výroby FVE přímo do řídicího systému TČ či rekuperační jednotky, díky čemuž by došlo ke snížení pořizovacích nákladů a zvýšení uživatelského komfortu. Pro tyto aplikace by bylo vhodné využít cloudové řešení, které umožní snazší vzdálené připojení uživatele či servisního technika. Zároveň by bylo možné vyhodnocovat provoz většího množství jednotek a optimalizovat tak průběžně navržený způsob regulace.

Nyní bych chtěl ověřit funkci navrženého systému v rámci většího objektu, kde by bylo propojeno řízení TČ, rekuperační jednotky, nabíjecí stanice elektromobilů, FVE a odporové zátěže dle předpovědi teploty a výroby FVE ideálně v kombinaci s adaptivním osvětlením. V současné době připravuji projekt pro menší bytový dům, kde budou jednotlivé systémy kompletně integrovány. Další možností by bylo navržený systém založit na levnější hardwarové platformě tak, aby ho bylo možné aplikovat například pro rodinný dům a snížit tak počáteční investiční náklady, které nyní limitují použití navrženého systému pro menší aplikace. Zde by mohlo být využito například zařízení Nucleo s příslušnými rozšířeními.

Další oblastí výzkumu by mohlo být propojení většího počtu AC nabíjecích stanic a FVE o větším instalovaném výkonu. Řada společností má na svých objektech instalovanou FVE z předchozích let, které pracují v režimu přímého prodeje a po ukončení podpory budou zřejmě nuceni přejít do režimu přebytku do DS. V řadě případů výroba z instalované FVE znatelně převyšuje spotřebu objektu. Současně bude docházet k rozšiřování firemní flotily elektromobilů. Díky efektivnímu řízení jejich nabíjení by bylo možné smysluplněji využít vyrobenou elektrickou energii.

Seznam použité literatury a informačních zdrojů

- [1] SZÉKYOVÁ, M. 2006. Větrání a klimatizace. 1. české vyd. Bratislava: Jaga, 359 s. ISBN 80-807-6037-3
- [2] ŠAFAŘÍK, P. a VESTFÁLOVÁ, M. Termodynamika vlhkého vzduchu. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016. ISBN 978-80-01-06020-9.
- [3] LINHART, Jiří. Termomechanika: stručné učební texty. Západočeská univerzita v Plzni, 2012.
- [4] CIHELKA, J. Solární tepelná technika. Praha: T. Malina, 1994. ISBN 80-900759-5-9.
- [5] BAŠTA, J. Regulace v technice prostředí staveb. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014. ISBN 978-80-01-05455-0.
- [6] Demand-controlled ventilation: Control strategy and applications for energy-efficient operation. Switzerland: Siemens Switzerland Ltd, 2010.
- [7] JOKL, M. Zdravé obytné a pracovní prostředí. Praha: Academia, 2002. ISBN 80-200-0928-0.
- [8] Building automation: control devices and applications. Homewood, Illinois: American Technical Publishers, [2008]. ISBN 978-0826920003. ,
- [9] Habel, J. Světlo a osvětlování. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [10] ALTER, B. Environmental consulting fundamentals investigation and remediation. Online-Ausg. Boca Raton, FL: CRC Press, 2012. ISBN 9781439868911.
- [11] THIEBLEMONT, H., HAGHIGHAT F., OOKA, R. a MOREAU, A. Predictive control strategies based on weather forecast in buildings with energy storage system. Energy and Buildings [online]. Elsevier, 2017, (153), 485-500 [cit. 2018-06-16]. ISSN 0378-7788. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816320333>
- [12] YANG, Z. a BECERIK-GERBER, B.. How Does Building Occupancy Influence Energy Efficiency of HVAC Systems? Energy Procedia [online]. 2016, (88), 775-780 [cit. 2018-06-16]. ISSN 1876-6102. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021630176X>
- [13] Mcquiston, F.C., Parker, J.D. a Spitler, J.D. Heating, ventilating, and air conditioning: analysis and design, 6th ed. Hoboken, N.J.: John Wiley, c2005. ISBN 978-0-471-47015-1.
- [14] PRÍVARA, S., ŠIROKÝ, J., FERKL, L. a CIGLER, J.. Model predictive control of a building heating system: The first experience. Energy and Buildings [online]. 2011, 43(2-3), 564-572 [cit. 2020-03-03]. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2010.10.022
- [15] PRÍVARA, S., VÁŇA, Z., CIGLER, J., OLDEWURTEL, F. a KOMÁREK, J. Role of MPC in Building Climate Control. 21st European Symposium on Computer Aided Process Engineering [online]. Elsevier, 2011, 2011, s. 728-732 [cit. 2020-03-03]. Computer Aided Chemical Engineering. ISBN 9780444538956. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-444-53711-9.50146-2
- [16] OLDEWURTEL, F., PARISIO, A., JONES C. N., GYALISTRAS D., GWERDER M., STAUCH V., LEHMANN B. a MORARI M.. Use of model predictive control and

- weather forecasts for energy efficient building climate control. *Energy and Buildings* [online]. 2012, 45, 15-27 [cit. 2020-03-03]. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2011.09.022
- [17] SERALE, G., FIORENTINI, M., CAPOZZOLI, A., BERNARDINI, D. a BEMPORAD, A.. Model Predictive Control (MPC) for Enhancing Building and HVAC System Energy Efficiency: Problem Formulation, Applications and Opportunities. *Energies* [online]. 2018, 11(3) [cit. 2020-03-03]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en11030631
- [18] Heat pump system control: the potential improvement based on perfect prediction of weather forecast and user occupancy. In: *Proceedings of 12th IEA Heat Pump Conference*. Rotterdam, 2017, s. 9. ISBN 978-90-9030412-0.
- [19] MARTÍNEK, V., WOLF, P. a DUPONT, L.. Comparison of Irradiance Forecasting Methods Applied for Building Solar Energy Estimation. In: *35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2018)*. Brussels, Belgium, 2018, s. 4. ISBN 978-1-5108-7155-7.
- [20] MARTÍNEK, V. a WOLF, P.. All-Sky Imaging: A way to Increase Solar Irradiance Forecasting Resolution and Accuracy. In: *Proceedings of the International Conference on Digital Image & Signal Processing*. Oxford, United Kingdom: Springer, 2019, s. 5. ISBN 978-1-912532-09-4.
- [21] RIMBALA, J. a KYNCL, J.. The Possibilitie of Reduction Energy Consumption for the Preparation of Hot Water by Suitable Switching of the Heat Pump. In: *Proceedings of the 2020 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Praha: Czech Technical University in Prague, 2020, s. 4. ISBN 978-1-7281-9478-3.
- [22] IOAKIMIDIS, C., DIMITRIOS, T., RYCERSKI, P. a GENIKOMSAKIS, K.. Peak shaving and valley filling of power consumption profile in non-residential buildings using an electric vehicle parking lot. *Energy* [online]. 2018, (148), 148-158 [cit. 2018-06-16]. ISSN 0360-5442. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218301567>
- [23] ABDUL, B., SALAM, Z. a ASHIQUE, R. Electric Vehicle Charging Using Photovoltaic based Microgrid for Remote Islands. *Energy Procedia* [online]. 2016, (103), 213-218 [cit. 2018-06-16]. ISSN 1876-6102 Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216314850>
- [24] ČSN EN 15232-1 Energetická náročnost budov - Energetická náročnost budov - Část 1: Vliv automatizace, řízení a správy budov - Moduly M10-4,5,6,7,8,9,10
- [25] ČSN EN 16798-3 Energetická náročnost budov - Větrání budov - Část 3: Pro nebytové budovy - Výkonové požadavky na větrací a klimatizační systémy místností. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [26] ČSN EN 12665 Světlo a osvětlení - Základní termíny a kritéria pro stanovení požadavků na osvětlení. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [27] ČSN EN 12464-1 Světlo a osvětlení - Osvětlení pracovních prostorů - Část 1: Vnitřní pracovní prostory. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [28] ČSN 36 0020 (360020) Sdružené osvětlení. Praha: Úřad pro technickou normalizaci,

metrologii a státní zkušebnictví, 2015.

- [29] ČSN 36 0011-3 Měření osvětlení prostorů - Část 3: Měření umělého osvětlení vnitřních prostorů. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [30] LabVIEW User Manual, 2003, Austin Texas USA: National Instruments Corporation, 349 pages. Free download from: <http://www.ni.com/pdf/manuals/320999e.pdf>
- [31] Chlup, J. Distribuce vzduchu ve školní třídě s použitím větrací jednotky 2VV [online prezentace]., 2018 [cit. 2018-11-23]
- [32] 2VV [online]. Pardubice, 2019 [cit. 2019-10-10]. Dostupné z: <https://www.2vv.cz/>
- [33] WAGO [online]. Praha, 2020 [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <https://www.wago.com/cz/>
- [34] NIBE [online]. Dražice, 2020 [cit. 2020-01-08]. Dostupné z: <https://www.nibe.cz/>
- [35] German Energy Saving Ordinance 2009 (Enev 2009), 2009, Germany: Federal Government of Germany.
- [36] Neota [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <https://www.neota.cz/>
- [37] Wattrouter [online]. Plzeň, 2020 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://solarcontrols.cz/>
- [38] GreenBonO [online]. Adamov, 2020 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <http://www.yorix.cz/cz/greenbono/gbo-aku.htm>
- [39] TECO [online]. Kolín, 2020 [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: <https://www.tecomat.cz/>
- [40] Nilan [online]. Hedensted - Denmark, 2020 [cit. 2020-02-01]. Dostupné z: <https://en.nilan.dk/en-gb/frontpage/solutions/commercial-solutions>
- [41] PV Forecast [online]. Praha: UCEEB, ČVUT, 2020 [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <http://wp2.pvforecast.cz/>
- [42] FOXTRON [online]. Praha, 2020 [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: <http://www.foxtron.cz/cz>
- [43] OpenWeather [online]. London, UK, 2020 [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: <https://openweathermap.org/>
- [44] Wolfram [online]. Oxfordshire, UK, 2019 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://www.wolfram.com/mathematica/>
- [45] PVSOL [online]. Berlin, Germany, 2019 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://valentin-software.com/en/products/pvsol-premium/>
- [46] Südluft Systemtechnik [online]. Plattling, Germany, 2019 [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: <https://www.suedluft.de/>
- [47] Schneider Electric [online]. Praha, 2019 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.se.com/cz/cs/>
- [48] PRODUCT SELECTION DATA. Villasanta, Italy: Carrier SpA, 2013.

Seznam publikací a výstupů studenta vztahujících se k disertační práci

- [A1] JIŘINEC, Jakub. Optimalizace chodu tepelných čerpadel. In *Elektrotechnika a informatika 2015. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015. s. 231-234. ISBN: 978-80-261-0514-5
- [A2] JIŘINEC, J. Měření vzduchotechnických vyústek. In *Elektrotechnika a informatika 2017. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017. s. 179-182. ISBN: 978-80-261-0712-5
- [A3] JIŘINEC, J., ROT, D. The parameters measurement of heat recovery units. In *Proceedings of the 2018 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Piscataway: IEEE, 2018. s. 392-395. ISBN: 978-1-5386-4612-0, ISSN: 2376-5623
- [A4] JIŘINEC, J. Měření jednotek zpětného získávání tepla. In *Elektrotechnika a informatika 2018. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2018. s. 41-44. ISBN: 978-80-261-0785-9
- [A5] JIŘINEC, J., ROT, D. Adaptivní osvětlení průmyslové kuchyně. *Světlo*, 2019, roč. neuveden, č. 6, s. 15-17. ISSN: 1212-0812
- [A6] JIŘINEC, J., ROT, D., ŠENKÝŘ, V. Measurement of indoor environment parameters in a classroom equipped with heat recovery unit. In *Proceedings of the 10th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering (ELEKTROENERGETIKA 2019)*. Košice: Technical University of Košice, 2019. s. 421-424. ISBN: 978-80-553-3324-3
- [A7] **JIŘINEC, J., ROT, D. Measuring system for recuperation units. *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*, 2019, roč. 5, č. 3, s. 1-5. ISSN: 2332-8983 (IF 0,52)**
- [A8] JIŘINEC, J., ROT, D., JIŘINEC, S. Optimization of the energy consumption of a building with PV. In *Proceedings of the 10th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering (ELEKTROENERGETIKA 2019)*. Košice: Technical University of Košice, 2019. s. 425-428. ISBN: 978-80-553-3324-3
- [A9] JIŘINEC, J., ROT, D., VELEV, R. The energy efficient solution for intelligent lighting. In *Proceedings of the 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Piscataway: IEEE, 2019. s. 536-539. ISBN: 978-1-72811-333-3, ISSN: 2376-5623
- [A10] RAKOVÁ, L., JIRINEC, J., SÍTAR, V. Porovnání metod regulace strídačů fotovoltaických elektráren. In *Experimentální a výpočtové metody v inženýrství – sborník příspěvků*. Ústí nad Labem: Fakulta strojního inženýrství UJEP, 2020. s. 91-99. ISBN: 978-80-7561-258-8
- [A11] RAKOVÁ, L., JIRINEC, J., SÍTAR, V. Control Methods of Voltage Inverters for Photovoltaic Systems. *Manufacturing Technology Journal* 2020 (v recenzním řízení)

- [A12] JIŘINEC, J., ROT, D. The control system for heating of small buildings with heat recovery unit and heat pump. In Proceedings of the 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE 2020). Piscaway: IEEE, 2020. s. 1-4. ISBN: 978-1-72819-479-0
- [A13] JIŘINEC, J., ROT, D. Měřicí sestava pro měření rekuperačních jednotek. 2017.
- [A14] JIŘINEC, J., ROT, D. Komplexní řídicí systém pro inteligentní osvětlení. 2018.
- [A15] JIŘINEC, J., ROT, D. Řídicí systém k topným panelům z přírodního kamene. 2018.
- [A16] ROT, D., JIŘINEC, J., JIŘINEC, S. Vývoj systému efektivní regulace topných panelů z přírodního kamene. 2018.
- [A17] ROT, D., JIŘINEC, J., JIŘINEC, S. Řídicí systém vzduchotechnických klapek a centrální rekuperační. 2020.
- [A18] JIŘINEC, J. Vytvoření řídicího systému pro vytápění budov. 2019.

Ostatní publikace a výstupy studenta

- [B1] ROT, D., JIŘINEC, J., JIŘINEC, S., KOŽENÝ, J. Advanced measurements for analysis and data acquisition from the cold crucible. In Proceedings of the 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Praha: Czech Technical University in Prague, 2016. s. 533-536. ISBN: 978-1-5090-0907-7
- [B2] ROT, David., JIŘINEC, Jakub, JIŘINEC, S., KOŽENÝ, J., POZNYAK, I. Experimental design of the cold crucible. In Proceedings of the 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Prague: Czech Technical University in Prague, 2016. s. 511-514. ISBN: 978-1-5090-0907-7
- [B3] JIŘINEC, J. Měření a sběr dat z indukčních zařízení. In Elektrotechnika a informatika 2016. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2016. s. 113-116. ISBN: 978-80-261-0516-9
- [B4] ROT, D., KOŽENÝ, J., JIŘINEC, S., JIŘINEC, J., PODHRÁZKÝ, A., POZNYAK, I. Induction melting of aluminium oxide in the cold crucible. In Proceedings of the 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Piscataway: IEEE, 2017. s. 707-710. ISBN: 978-1-5090-6405-2
- [B5] KOŽENÝ, J., ROT, D., JIŘINEC, S., JIŘINEC, J., PODHRÁZKÝ, A. Optimization of the induction heating in the cold crucible by measuring and modeling. In XVIII. International UIE Congress Electrotechnologies for Material Processing : proceedings. Hannover: Vulkan-Verlag GmbH, 2017. s. 107-112. ISBN: 978-3-8027-3095-5
- [B6] ROT, D., JIŘINEC, J., KOŽENÝ, J., PODHRÁZKÝ, A., HÁJEK, J., JIŘINEC, S. Induction system for hardening of small parts. In Proceedings of the 2018 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Piscataway: IEEE, 2018. s. 277-282. ISBN: 978-1-5386-4612-0 , ISSN: 2376-5623
- [B7] HÁJEK, J., ROT, D., JIŘINEC, J. Vliv volby parametrů při indukčním kalení na deformaci a vlastnosti výrobků. In Vacuum Heat Treatment and Heat Treatment of Tools. Čerčany: Asociace pro tepelné zpracování kovů, ECOSOND s.r.o., 2018. s. neuvedeno. ISBN: 978-80-907043-1-2 , ISSN: neuvedeno
- [B8] HÁJEK, J., ROT, D., JIŘINEC, J. **Distortion in induction-hardened cylindrical part. Defect and Diffusion Forum, 2019, roč. 2019, č. 395, s. 30-44. ISSN: 1662-9507, (IF 0,22)**
- [B9] ROT, D., JIŘINEC, J. **Preliminary experiments while designing a cold crucible for metal melting. Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, 2019, roč. 5, č. 3, s. 1-7. ISSN: 2332-8983, (IF 0,52)**
- [B10] ROT, D., HRBEK, J., JIŘINEC, J. **Heat Transfer in Induction Melting of Aluminum Oxide in Cold Crucible. Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, 2020 (IF 0,34)**
- [B11] ROT, D., JIŘINEC, J., HÁJEK, J., ČUBROVÁ, J. **Induction annealing of austenitic spring steels for nuclear reactors. Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, 2020 (IF 0,34)**

- [B12]JIŘINEC, S., ROT, D., JIŘINEC, J. Polohovací zařízení pro HFG160. 2016.
- [B13]JIŘINEC, S., ROT, D., JIŘINEC, J. Polohovací zařízení se stíněním EMP pro FRQ60. 2016.
- [B14]JIŘINEC, S., ROT, D., JIŘINEC, J. Sada přípravků pro testování účinnosti studených kelímků. 2016.
- [B15]JIŘINEC, S., ROT, D., JIŘINEC, J. Segmentový studený kelímek pro HFG160. 2016.
- [B16]JIŘINEC, S., ROT, D., JIŘINEC, J. Sestava pro měření účinnosti indukčních ohřevů. 2016.
- [B17]ROT, D., JIŘINEC, J., JIŘINEC, S. Návrh a optimalizace kalicího procesu jednoúčelového indukčního zařízení. 2017.
- [B18]ROT, D., JIŘINEC, J., JIŘINEC, S. Návrh studeného kelímku pro tavení kovů. 2017.
- [B19]ROT, D., JIŘINEC, J., JIŘINEC, S. Optimalizace kalicího procesu univerzálního indukčního zařízení. 2017.
- [B20]JIŘINEC, S., ROT, D., JIŘINEC, J. Segmentový studený kelímek pro tavení kovů (CCi45). 2017.
- [B21]JIŘINEC, S., ROT, D., JIŘINEC, J. Speciální kalorimetr pro měření tepelných toků z dílů ohříváných elektromagnetickou indukcí. 2017.
- [B22]ROT, D., JIŘINEC, J. Manipulátor pro kalení válcových vsázek. 2018.
- [B23]ROT, D. Realizace 4 taveb eutektika dle definovaného poměru. Centrum výzkumu Řež s.r.o., 2018.
- [B24]ROT, D., JIŘINEC, J. Sada kalicích sprch pro válcové vsázky. 2018.
- [B25]ROT, D., JIŘINEC, J. Cvičný manipulátor. 2019.
- [B26]ROT, D., JIŘINEC, J., JIŘINEC, S. Vytvoření řídicího systému pro vytápění budov. 2019.
- [B27]ROT, D., JIŘINEC, J., JIŘINEC, S. Vývoj a výroba prototypu řídicího systému kalicího stroje. 2020.
- [B28]JIŘINEC, J. Řídicí systém kalicího stroje. 2020.

Seznam příloh

- Příloha 1 Popis vytvořeného programu pro adaptivní osvětlení
- Příloha 2 Návrh FVE pro snížení provozních nákladů rekuperační jednotky

Příloha 1: Popis vytvořeného programu pro adaptivní osvětlení

Uživatelské rozhraní je rozděleno do tří úrovní (Admin, Servis a User), které jsou chráněny heslem. Po uplynutí stanovené doby dojde z bezpečnostních důvodů k odhlášení uživatele. Pokud je v systému použita dotyková obrazovka, nedochází na této obrazovce k automatickému odhlášení uživatele User, obrazovka slouží ke snadnému ovládní systému. User má možnost ovládat světla v jednotlivých zónách a vidí základní informace o systému (aktuální stav zóny a spotřeby elektrické energie v jednotlivých zónách). Uživatel Servis slouží k nastavování parametrů pro řízení zóny, diagnostice jednotlivých komponentů, nastavení ovládacích tlačítek atd. Nejvyšší úroveň představuje uživatel Admin, kterému je umožněna adresace, úprava a odstranění svítidel, senzorů a tlačítek.

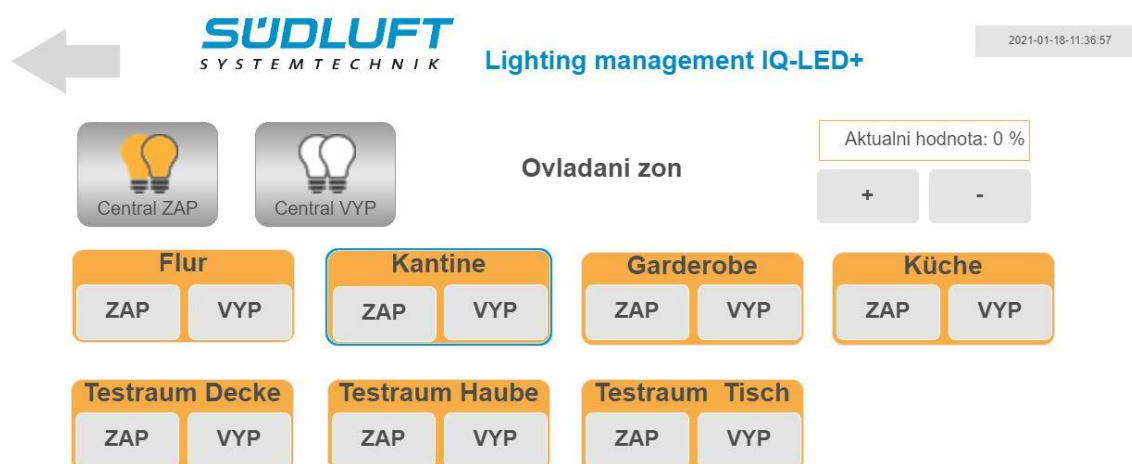
Při přihlášení do systému se uživateli zobrazí hlavní menu (Obr. 1) se čtyřmi tlačítky Ovládání zón, Stav zón, Energie a Servis. Poslední tlačítko je zablokované pro uživatele User a slouží k nastavení systému, přidání a odstranění jednotlivých částí (svítidel, senzorů a tlačítek) servisním technikem.



Obr. 1 Hlavní stránka uživatelského rozhraní

Okno “Ovládání zón“ (Obr. 2) slouží pro ovládání svítidel v jednotlivých zónách a pro vizualizaci jejich aktuálního stavu. Je možné zapnout automatickou regulaci svítidel, zhasnout danou zónu nebo ručně zvýšit (tlačítko ON) nebo snížit (tlačítko OFF) výkon svítidel v zóně pomocí dlouhého stisku tlačítka. Při ovládání mobilním telefonem a tabletem nastaly komplikace s rozlišením dlouhého stisku, a proto byly přidány do pravého horního rohu tlačítka “+“ a “-“, která regulují nastavený výkon svítidel po 10 %. Nad těmito tlačítky

se zobrazuje aktuální výkon svítidel v % pro zvolenou zónu. Pro rychlé ovládání systému byla přidána tlačítka pro centrální zapnutí a vypnutí regulace adaptivního osvětlení.




Obr. 2 Ovládání osvětlení jednotlivých zón

V okně “Stav zón“ (Obr. 3) jsou zobrazeny aktuální informace k jednotlivým zónám a slouží zároveň pro celkový přehled o řídicím systému adaptivního osvětlení. Je zde uvedeno číslo zóny, jméno, aktuální status, změřená intenzita, výkon svítidel a požadovaná intenzita osvětlení.

	Jmeno	Status	Nastavena intenzita (lx)	Akt. intenzita (lx)	Vykon (%)
0	Flur	Normalni	300	342	26
1	Kantine	Standby	0	1316	0
2	Garderobe	Normalni	500	573	2
3	Küche	Normalni	500	501	21
4	Testraum Decke	Snizeny	50	90	9
5	Testraum Haube	Standby	0	35	0
6	Testraum Tisch	Standby	0	30	0

Obr. 3 Zobrazení aktuálního provozního stavu zón

V okně “Energie“ (Obr. 4) jsou souhrnné informace o spotřebě elektrické energie rozdělené po jednotlivých zónách. Uživatel vidí počet svítidel v zóně, jejich aktuální výkon, celkovou spotřebu elektrické energie pro danou zónu, výpočtovou hodnotu elektrické energie bez stmívání a odpínání driverů. Dále systém počítá uspořeno elektrickou energii, celkový čas provozu svítidel, čas automatické regulace výkonu světla a čas, během kterého byla svítidla vypnutá. Lze tedy průběžně kontrolovat spotřebu systému a uspořeno elektrickou energii.



SUDLUFT
SYSTEMTECHNIK

Lighting management IQ-LED+
Energie spotřeba

2021-02-24-09:21:08

			Celkem	277.050	3104.192	11307.750	8203.558			
	Jmeno	Svitidla	%	Vykon (W)	Stmivani (kWh)	Bez stmivani (kWh)	Uspora (kWh)	Cas (h)	Cas stmivani (h)	Cas VYP (h)
0	Flur	6	0	46.800	505.228	1306.936	801.708	668-09:09:22	161-19:58:14	506-13:11:08
1	Kantine	6	0	46.800	420.683	2281.177	1860.494	668-09:08:27	193-03:13:39	475-05:54:48
2	Garderobe	8	2	64.424	846.165	2743.460	1897.294	668-09:09:22	234-23:22:54	433-09:46:28
3	Küche	7	0	31.100	580.132	1513.049	932.917	668-09:09:22	225-03:32:12	443-05:37:10
4	Testraum Decke	4	3	32.326	283.346	1091.105	807.759	591-04:52:37	174-18:21:53	416-10:30:44
5	Testraum Haube	8	0	40.000	319.274	1820.251	1500.978	591-04:53:20	106-03:35:47	485-01:17:33
6	Testraum Tisch	2	0	15.600	149.364	551.772	402.408	591-04:52:20	79-14:33:10	511-14:19:10

Obr. 4 Výpočet spotřeb a úspor systému adaptivního osvětlení

Při otevření okna “Servis“ je možno nastavit jednotlivé prvky systému. Okno je opět rozděleno do několika částí:

- DALI sběrnice – nastavení počtu sběrnic
- Zóna – nastavení parametrů adaptivního osvětlení pro jednotlivé zóny
- Senzory – adresace a nastavení senzorů přítomnosti a osvětlenosti
- Tlačítka – přidání bezdrátových tlačítek do systému a jejich nastavení
- Svítidla DALI – adresace a nastavení svítidel
- Svítidla energie – nastavení typu svítidla, spotřeby a doby chodu pro jednotlivá svítidla
- Napájecí zdroj – informace o aktuálním stavu záložního zdroje pro napájení PLC
- Servis – nastavení jazyka, času a uživatelů

V okně “Zóna“ (Obr. 5) může uživatel nastavit parametry adaptivního osvětlení pro jednotlivé zóny. Pro zobrazení dané zóny v oknech Ovládání zón, Stav zón a Energie je nutné povolit viditelnost příslušné zóny a tuto zónu pojmenovat. Dále se zde nastavují následující parametry:

- Výchozí nastavená hodnota – intenzity osvětlení, na kterou má systém regulovat v přítomnosti osob
- Hodnota stmívání zapnutí – hodnota, na kterou se mají svítidla rozsvítit v případě zapnutí systému
- Hodnota stmívání standby (útlum) – intenzita osvětlení, na kterou má systém regulovat, po uplynutí nastavené doby bez přítomnosti osob
- Min. hodnota stmívání – minimální hodnota, na kterou lze svítidla v zóně stmívat
- Rychlé stmívání hystereze – pokud prudce poklesne měřená intenzita osvětlení

o větší než nastavenou hodnotu, dojde k rychlému zvýšení výkonu svítidel tak, aby systém co nejrychleji dorovnal aktuálně měřenou hodnotu osvětlenosti k hodnotě požadované

- Napájení přes relé – zde se nastavuje, zda je napájení svítidel dané zóny automaticky odpínáno, pokud se v zóně nepohybují osoby a uplyne nastavený čas. Přes jedno relé může být napájeno i více zón, systém pak vždy čeká, až bude možné vypnout napájení všech zón, které jsou připojené přes příslušné relé.
- Zpoždění přítomnosti – pokud čidlo přítomnosti přestane detekovat pohyb v příslušné zóně, systém počká ještě nastavenou dobu, než se přepne do standby režimu
- Zpoždění uživatelská hodnota – pokud si uživatel upraví požadovaný výkon svítidel, bude systém udržovat tento výkon svítidel po stanovený čas. Poté přejde zpět do automatické regulace.
- Zpoždění standby mód – pokud se systém přepne do standby režimu, bude po stanovenou dobu udržovat intenzitu osvětlení na nastavené hodnotě (Hodnota stmívání standby)
- Práce: vypnutí světel po standby – pokud uplyne i čas standby režimu, může dojít v pracovní době k vypnutí světel v příslušné místnosti
- Mimo práci: vypnutí světel po standby – pokud uplyne i čas standby režimu, může dojít v mimo pracovní dobu k vypnutí světel v příslušné místnosti
- Zpoždění vypnutí driveru – v případě, že je povoleno vypnutí napájení svítidel v dané zóně, dojde po uplynutí standby režimu a nastavené doby k rozepnutí relé, přes které je zóna napájena. Pokud je přes jedno relé připojeno více zón, zůstávají svítidla napájena do té doby, než je možné vypnout všechny zóny. Tento stav je uživateli signalizován.
- Práce: vypnutí napájení driveru – zde je možné nastavit, zda se má odepínat napájení driveru v pracovní době
- Mimo práci: vypnutí napájení driveru – zde je možné nastavit, zda se má odepínat napájení driveru mimo pracovní dobu
- Fade time ZAP – nastavení rychlosti, jakou se mají svítidla v zóně rozsvítit
- Fade time VYP – nastavení rychlosti, jakou se mají svítidla v zóně zhasnout
- Konstantní osvětlení hystereze – hodnota hystereze pro regulaci adaptivního osvětlení

2021-01-18-11:39:55

SUDLUFT
SYSTEMTECHNIK Lighting management IQ-LED+

Nastavení zony

DALI Zone 4

Parameter	Value	Unit
DALI číslo zony	4	
Viditelnost zony	Viditelné	
Jmeno	Testraum Decke	
Vychodi nastavena hodnota	500	lx
Hodnota stmivani zapnuti	50	%
Hodnota stmivani standby	50	lx
Min. hodnota stmivani	2	%
Rychle stmivani hysterese	200	lx
Napajeno pres rele	Not used	

Zpozdeni pritomnosti	10	min
Zpozdeni uzivatelska hodnota	2	min
Zpozdeni standby mode	5	min
Prace: vypnuti svetel po standby	FALSE	
Mimo prací: vypnuti svetel po standby	TRUE	
Zpozdeni vypnuti driveru	2	min
Prace: vypnuti napajeni driveru	FALSE	
Mimo prací: vypnuti napajeni driveru	TRUE	
Fade time ZAP	1	
Fade time VYP	7	
Konstantni osvetleni hysterese	50	lx

Aktualni cas	00m00s	
Aktualni stav	Snizeny	
Akt. rozsviceni	9	%
Hodnota osvetleni (Vypocter)	90	lx
Aktualni nastavena hodnota	50	lx
Pritomnost	FALSE	
EnOcean tlačitko ZAP	EnOcean tlačitko VYP	
ZAP	VYP	

	Zacatek práce	Konec pracovní di
Pondeli	08:00:00	18:00:00
Utery	08:00:00	18:00:00
Streda	08:00:00	18:00:00
Ctvrtek	08:00:00	18:00:00
Patek	08:00:00	16:00:00
Sobota	08:00:00	08:01:00
Nedele	08:00:00	08:01:00

Software Version: SL.01.01

Obr. 5 Nastavení požadovaných parametrů pro řízení vybrané zóny

V pravé části okna se zobrazují aktuální informace k příslušné zóně. Je zde vidět aktuální stav zóny, čas, po který je zóna v tomto stavu, aktuální výkon svítidel, změřenou hodnotu osvětlení, požadovanou hodnotu osvětlení a informaci o tom, zda senzor přítomnosti detekuje v zóně osoby. Pro lepší diagnostiku je zde také vidět, zda je sepnuté některé z bezdrátových tlačítek přiřazených v této zóně. Pro simulaci těchto tlačítek jsou zde umístěna dvě tlačítka. Níže je pak možné nastavit časy pro pracovní dobu v jednotlivých dnech. Tato pracovní doba slouží k ovládání systému adaptivního osvětlení pro danou zónu a také pro výpočet ušetřené elektrické energie.

Okno "Senzory" (Obr. 6) slouží k adresaci a parametrizaci senzorů. Senzor je zde možné pojmenovat, přiřadit ho příslušné zóně a nastavit hodnotu zesílení. Tato hodnota je velice důležitá pro správný chod systému. Kombinovaný senzor přítomnosti a osvětlenosti zasílá do systému informaci o přítomnosti osob a změřenou hodnotu intenzity osvětlení. Tato hodnota představuje průměrnou intenzitu osvětlení a je velice závislá na umístění senzoru (výška senzoru nad pracovní plochou, typ povrchu pracovní plochy, rozmístění nábytku atd.). Proto je vždy nutné provést kontrolní měření luxmetrem a nastavit hodnotu zesílení tak, aby čidlo ukazovalo reálnou hodnotu intenzity osvětlení. V průběhu vývoje systému byly testovány celkem tři různé kombinované senzory pro měření osvětlenosti a detekci pohybu osob od společností WAGO, Tridonix a Foxtron. Pouze čidlo DALIpir od společnosti Foxtron bylo ve standardu DALI 2, který umožňuje připojit až 64 senzorů na

jednu sběrnici. Dále tento senzor umožňoval nastavení širšího počtu parametrů než čidla od zbylých dvou výrobců. Z tohoto důvodu byly pro používání systému zvoleny senzory DALIpir od společnosti Foxtron. Tato volba se ukázala jako správná, jelikož jsem během testování narazil na určité vlastnosti tohoto čidla, které nepříznivě ovlivňovaly chod navrženého systému adaptivního osvětlení (LED na čidle značící detekci pohybu ovlivňovala naměřenou hodnotu osvětlenosti, nebylo možné měnit citlivost přítomnostního čidla atd.). Po konzultaci s výrobcem byly tyto připomínky zakomponovány do nového firmware, tak aby splňovaly požadavky tohoto systému.



Vyber	Jmeno	Adr.	Skupina	Vyber zony	Hodnota senzor	Přítomnost	Zesílení	Hodnota vypočtena	Poznámka
0	Coridor	1	0	Flur	158	✓	1.70	268.60	
1	Canteen door	2	2	Garderobe	289		1.95	563.55	
2	Canteen tables	3	1	Kantine	1012		1.30	1315.60	
3	Kitchen	4	3	Küche	416		1.23	511.68	
4	Testraum Decke 1	5	4	Testraum Decke	88		1.02	89.76	
5	Testraum Decke 2	6	5	Testraum Haube	20		1.75	35.00	
6	Testraum Zone 3	7	6	Testraum Tisch	40		0.75	30.00	
7		64	32	²	0		3.00	0.00	

Obr. 6 Nastavení DALI senzorů

Okno “Tlačítka“ (Obr. 7) slouží k adresaci a nastavení bezdrátových tlačítek EnOcean. Přidání tlačítka je velice jednoduché, stačí zaškrtnout pole “Nauč nové tlačítko“ a dvakrát za sebou kliknout na tlačítko, které chceme přiřadit. Systém detekuje příslušné tlačítko, zapíše jeho adresu a proces adresace je dokončen. Poté je možné tlačítko pojmenovat a přiřadit mu jednotlivé zóny, které má ovládat (jedním tlačítkem lze najednou ovládat libovolný počet zón). Při stisknutí tlačítka se signalizuje, jaké tlačítko je právě stisknuté.



Vyber	Jmeno	ID	Hodnota	Leve tlačitko	Prave tlačitko	Leve O	Leve I	Prave O	Prave I	Poznámka
0	Lower Button	30e033								
1	Upper Button	30e034								
2	Testraum	30e02e								leke Taste -Decke 1+2, rechte Taste - Eck

Obr. 7 Nastavení bezdrátových tlačítek EnOcean

Okno Svítidla DALI (Obr. 8) slouží k přidání, odstranění a nastavení jednotlivých svítidel. Uživatel zvolí, jakou DALI sběrnici chce konfigurovat a poté může vyčíst aktuální konfiguraci sběrnice (tlačítko Vyčíst) nebo provést adresaci svítidel. Vyčtení aktuální konfigurace se používá, pokud se například nahrazuje starší systém DALI novým, neprovádí se tedy adresace svítidel a pouze se již naadresovaná svítidla přiřadí do systému adaptivního osvětlení. Svítidla se načtou do tabulky a poté je možné upravovat zóny, kontrolovat chod svítidla atd.

Pokud svítidla nebyla adresována nebo se systém rozšiřuje, je nutné provést jejich adresaci. K tomu slouží pole Adresování, kde lze nastavit, zda se mají adresovat jen ta svítidla, která nemají přiřazenou adresu nebo se mají preadresovat všechna svítidla. Při adresaci dostanou svítidla náhodnou adresu a je tedy nutné následně změnit adresy manuálně tak, aby odpovídaly výkresové dokumentaci. Při tomto kroku je možné také nastavit, aby se veškerá nastavení driveru ve svítidle resetovala na defaultní hodnoty a při adresaci docházelo k problikávání adresovaného svítidla.

Pro snadné zjištění polohy aktuálně zvoleného svítidla byla do systému implementována funkce identifikace, při jejím zapnutí začne zvolené světlo blikat a uživatel tak může svítidlo jednoduše v prostoru lokalizovat. V tomto okně se také nastavují příslušné zóny. Při jejich změně je nutné kliknout na tlačítko Zapiš zónu. Takto funkce provede zápis zón přímo do vnitřní paměti driverů. V nastavení je možné upravit chování svítidla při výpadku DALI sběrnice (nastaveno na výkon 100 %) nebo detekci napájecího napětí driveru (nastaveno na výkon 0 %). Pro snazší zadávání parametrů je možné zaškrtnutím pole výběru nastavit parametry pro více svítidel najednou.

SUDLUFT
SYSTEMTECHNIK Lighting management IQ-LED+

2021-01-18-11:42:21

← DALI Line 0

Central
ZAP VYP

DALI svítidla nastavení

Adresování
 Pouze nenaadresované
 Resetování hodnot
 Identifikace

Vyčistit Identifikace Zapsat zonu Diagnostika Nastavení Uložit Vymazat

Vyber	Jmeno	Adr.	Skupina	aktuální hodnota	EGC chyba	Světlo porucha	Dvojitá adresa	Doba chodu
0		1	0	29				5180
1		2	0	29				5182
2		3	0	29				5182
3		4	0	29				5181
4		5	0	29				5169
5		6	0	29				5163
6	Light 7	7	2	7				5379
7		8	2	7				5197
8		9	2	7				5383
9		10	2	7				5383
10		11	2	7				5377
11		12	2	7				5383
12		13	2	7				50
13		14	2	7				5383
14		15	1	0				4019
15		16	1	0				4027
16		17	1	0				4018
17		18	1	0				4018
18		19	1	0				4017
19		20	1	0				4019
20		21	3	23				5164
21		22	3	23				3113
22		23	3	23				5176

Vyber zonu

0 Flur

1 Kantine

2 Garderobe

3 Küche

4 Testraum Decke

5 Testraum Haube

6 Testraum Tisch

7

8

9

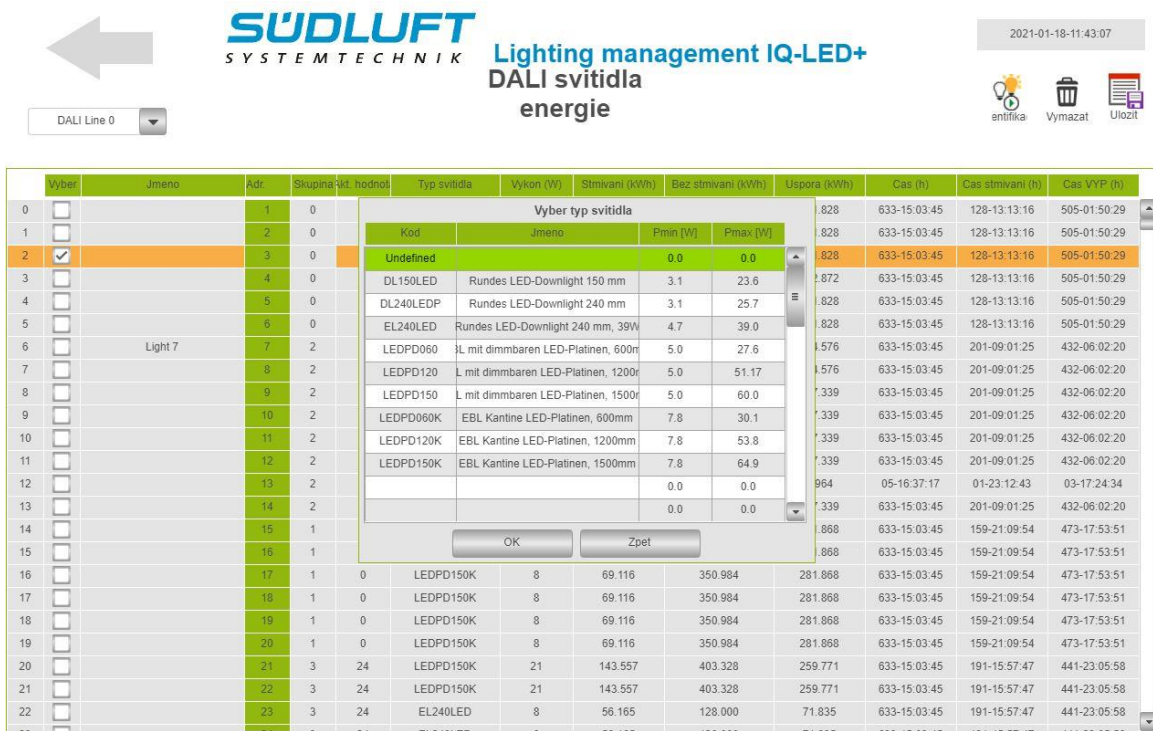
10

11

OK Vymazat zonu

Obr. 8 Přiřazení světel k jednotlivým zónám

Okno Svítidla energie slouží k monitorování spotřeby a doby chodu jednotlivých svítidel. Systém ukazuje aktuální výkon svítidla a počítá spotřebu jednotlivých svítidel na základě dat získaných předchozího měření. To bylo provedeno pro veškerá svítidla, které firma nabízí. V případě potřeby je možné doplnit tabulku svítidel o další druhy. Je však vždy nutné proměřit jeho spotřebu při různých procentech výkonu. Při uvedení systému do provozu je pak nutné zvolit správný typ svítidla na příslušné adrese. Systém na základě procentuální hodnoty výkonu svítidla dopočte aktuální výkon ve watttech, spotřebu bez použití adaptivního osvětlení a uspořenou elektrickou energii. Dále se zde ukazuje celkový čas provozu svítidla, doba chodu při regulaci výkonu a čas, po který bylo svítidlo vypnuté. Na obrázku Obr. 9 je vidět způsob zadávání typu svítidla pro příslušnou adresu.



SUDLUFT
SYSTEMTECHNIK

Lighting management IQ-LED+
DALI svitidla energie

2021-01-18-11:43:07

entika Vymazat Ulozit

DALI Line 0

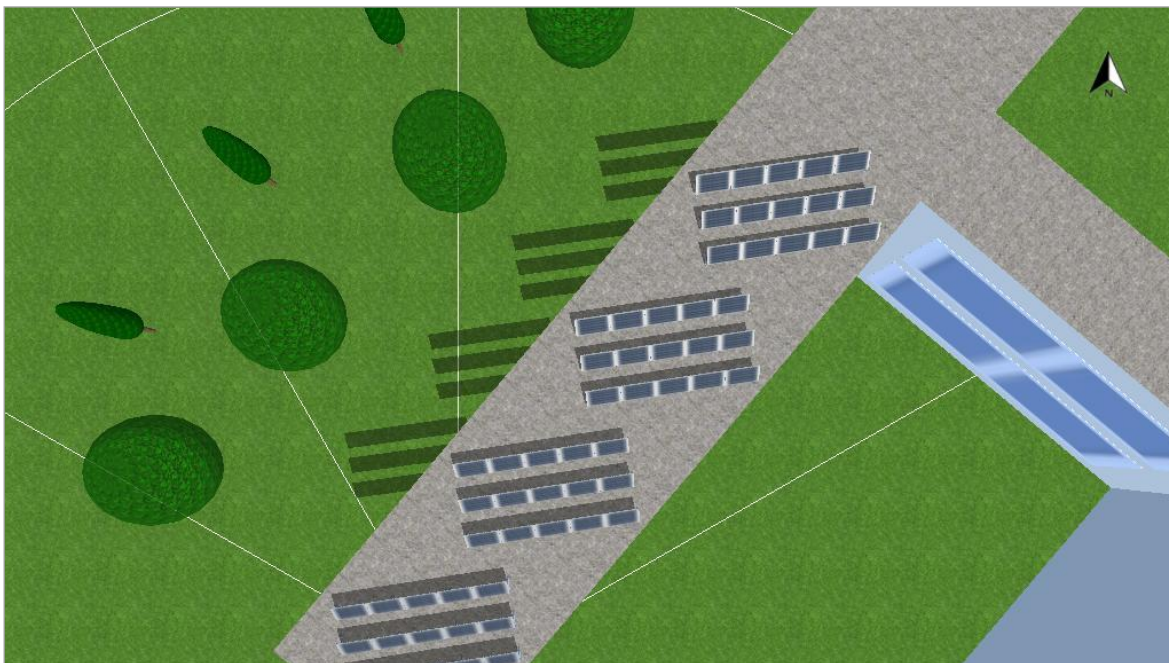
Vyber	Jmeno	Adr.	Skupina	akt. hodnota	Typ svitidla	Vykon (W)	Stimvani (kWh)	Bez stimvani (kWh)	Uspora (kWh)	Gas (h)	Gas stimvani (h)	Gas VYP (h)	
<input type="checkbox"/>		1	0							828	633-15:03:45	128-13:13:16	505-01:50:29
<input type="checkbox"/>		2	0							828	633-15:03:45	128-13:13:16	505-01:50:29
<input checked="" type="checkbox"/>		3	0							828	633-15:03:45	128-13:13:16	505-01:50:29
<input type="checkbox"/>		4	0							872	633-15:03:45	128-13:13:16	505-01:50:29
<input type="checkbox"/>		5	0							828	633-15:03:45	128-13:13:16	505-01:50:29
<input type="checkbox"/>		6	0							828	633-15:03:45	128-13:13:16	505-01:50:29
<input type="checkbox"/>	Light 7	7	2							576	633-15:03:45	201-09:01:25	432-06:02:20
<input type="checkbox"/>		8	2							576	633-15:03:45	201-09:01:25	432-06:02:20
<input type="checkbox"/>		9	2							1339	633-15:03:45	201-09:01:25	432-06:02:20
<input type="checkbox"/>		10	2							1339	633-15:03:45	201-09:01:25	432-06:02:20
<input type="checkbox"/>		11	2							1339	633-15:03:45	201-09:01:25	432-06:02:20
<input type="checkbox"/>		12	2							1339	633-15:03:45	201-09:01:25	432-06:02:20
<input type="checkbox"/>		13	2							964	05-16:37:17	01-23:12:43	03-17:24:34
<input type="checkbox"/>		14	2							1339	633-15:03:45	201-09:01:25	432-06:02:20
<input type="checkbox"/>		15	1							868	633-15:03:45	159-21:09:54	473-17:53:51
<input type="checkbox"/>		16	1							868	633-15:03:45	159-21:09:54	473-17:53:51
<input type="checkbox"/>		17	1	0	LEDPD150K	8	69.116	350.984	281.868	633-15:03:45	159-21:09:54	473-17:53:51	
<input type="checkbox"/>		18	1	0	LEDPD150K	8	69.116	350.984	281.868	633-15:03:45	159-21:09:54	473-17:53:51	
<input type="checkbox"/>		19	1	0	LEDPD150K	8	69.116	350.984	281.868	633-15:03:45	159-21:09:54	473-17:53:51	
<input type="checkbox"/>		20	1	0	LEDPD150K	8	69.116	350.984	281.868	633-15:03:45	159-21:09:54	473-17:53:51	
<input type="checkbox"/>		21	3	24	LEDPD150K	21	143.557	403.328	259.771	633-15:03:45	191-15:57:47	441-23:05:58	
<input type="checkbox"/>		22	3	24	LEDPD150K	21	143.557	403.328	259.771	633-15:03:45	191-15:57:47	441-23:05:58	
<input type="checkbox"/>		23	3	24	EL240LED	8	56.165	128.000	71.835	633-15:03:45	191-15:57:47	441-23:05:58	

Obr. 9 Výběr typu svitidla pro výpočet spotřeby elektrické energie

Systém dále umožňuje monitorovat chod záložního zdroje, který napájí PLC, displej a DALI čidla. V případě výpadku elektrické energie systém hlásí tento stav do nadřazeného řídicího systému nebo může odeslat e-mail na zadané adresy. V okně Nastavení lze přepínat mezi jazykovými mutacemi systému (čeština, angličtina a němčina). V případě potřeby lze jednoduše přidat další jazyk. Lze zde nastavit NTP server pro automatickou aktualizaci času, přidávat a upravovat přístupová práva uživatelů.

Příloha 2: Návrh FVE pro snížení provozních nákladů rekuperační jednotky

Přehled projektu

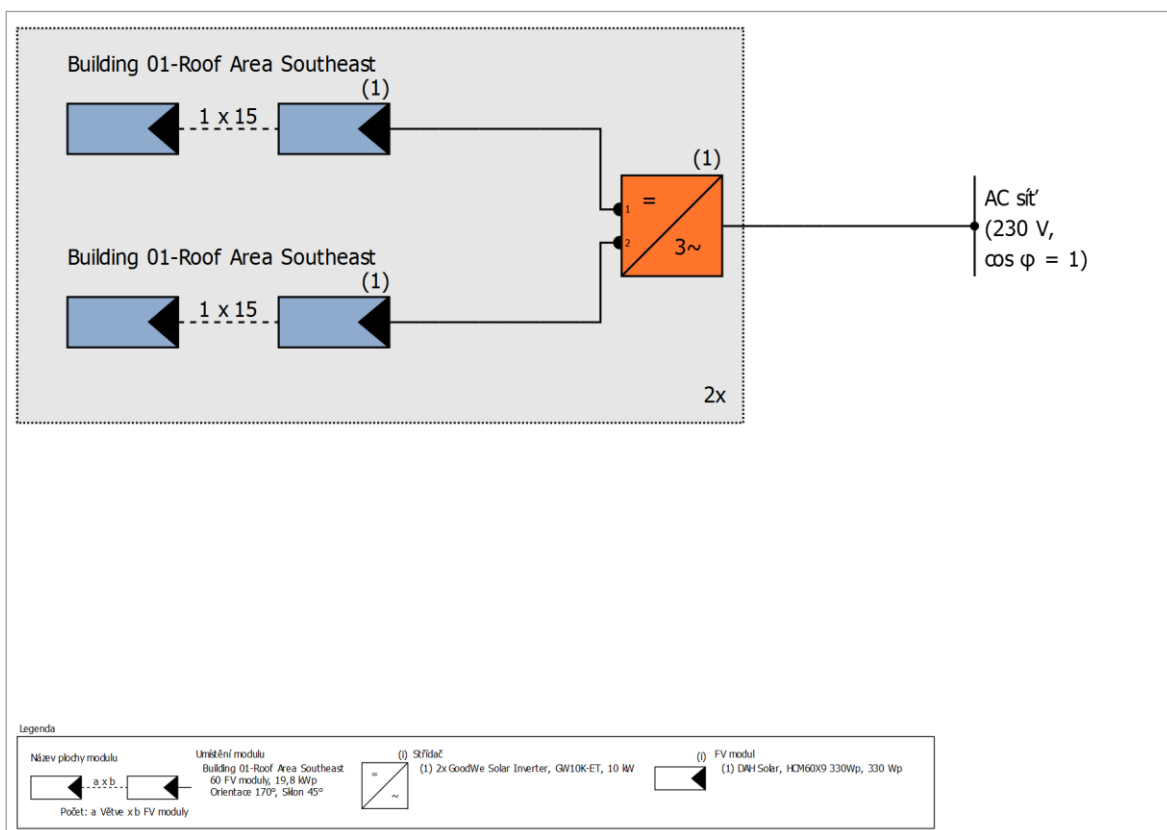


Obrázek: Obrazový přehled, 3D design

FV zařízení

3D, FV zařízení připojené do sítě

Klimatická data	Pilsen, CZE (1991 - 2010)
Instalovaný výkon	19,8 kWp
Plocha FV modulů	101,4 m ²
Počet FV modulů	60
Počet měničů	2



Obrázek: Schéma zapojení

Roční výnos

Energetický výnos FVS (AC síť)	18 359 kWh
Dodávka do objektu	18 359 kWh
Ztráta energie omezením přetoků do sítě	0 kWh
Podíl vlastní spotřeby	0,0 %
Podíl pokrytí solární energií	0,0 %
Spec. roční výnos	926,21 kWh/kWp
Stupeň využití zařízení (PR)	79,3 %
Snížení výnosu zastíněním	8,1 %/Rok
Snížení emisí CO ₂	8 619 kg/rok

Výsledky byly zjištěny matematickým modelovým výpočtem firmy Valentin Software GmbH (algoritmy PV*SOL). Skutečné výnosy solární elektrárny se mohou lišit z důvodu výkyvů počasí, stupně účinnosti modulů a měničů a také jiných faktorů.

Konstrukce zařízení

Přehled

Data zařízení

Druh zařízení	3D, FV zařízení připojené do sítě
Začátek provozu	12. 2. 2021

Klimatická data

Lokalita	Pilsen, CZE (1991 - 2010)
Řešení dat	1 min

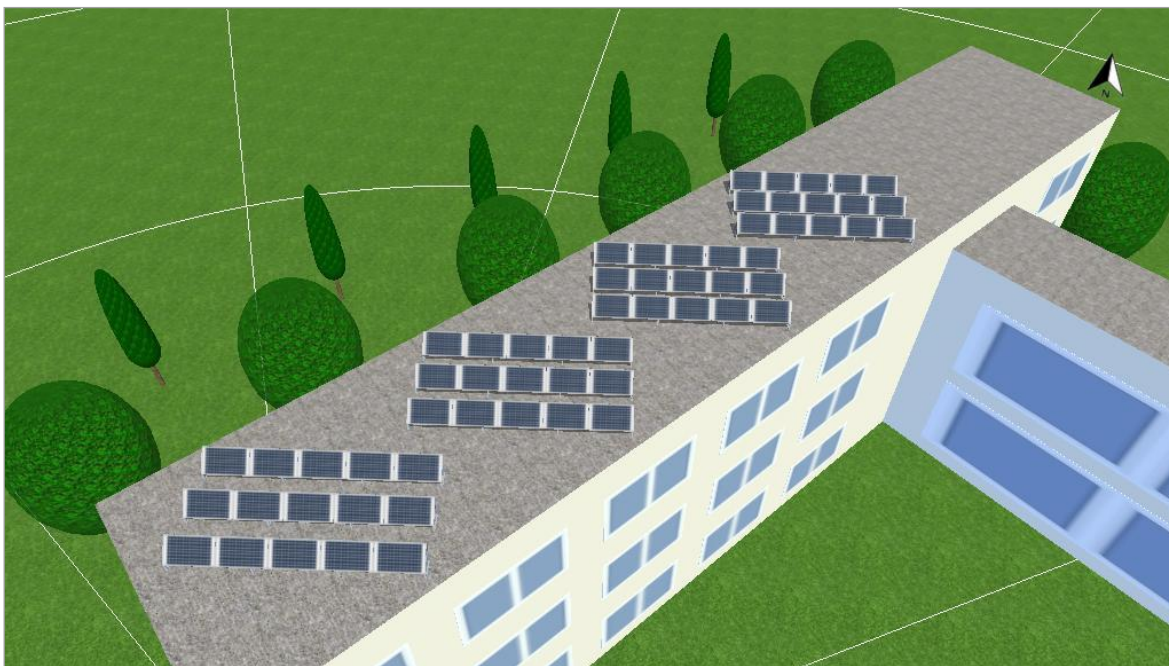
Použité simulační modely:

- Difúzní záření na vodorovné rovině	Hofmann
- Ozařování na skloněnou plochu	Hay & Davies

Plochy modulů

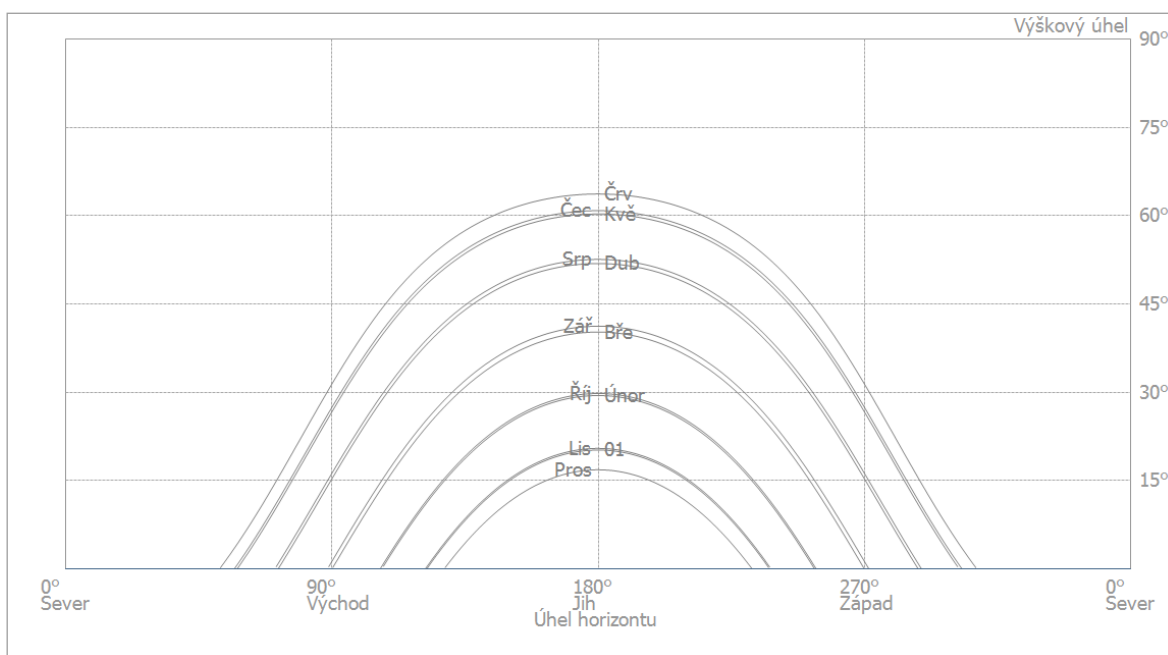
FV generátor, 1. Umístění modulu - Building 01-Roof Area Southeast

Jméno	Building 01-Roof Area Southeast
FV moduly	60 x HCM60X9 330Wp (v1)
Výrobce	DAH Solar
Sklon	45 °
Orientace	Jih 170 °
Situace při vestavbě	Montáž na stojanech na střeše
Plocha FV modulů	101,4 m ²



Obrázek: 1. Umístění modulu - Building 01-Roof Area Southeast

Linie horizontu, 3D design



Obrázek: Horizont (3D design)

Konfigurace měniče

Propojení stringů 1

Umístění modulu	Building 01-Roof Area Southeast
Střídač 1	
Model	GW10K-ET (v1)
Výrobce	GoodWe Solar Inverter
Počet	2
Faktor dimenzování střídače	99 %
Propojení stringů	MPP 1: 1 x 15 MPP 2: 1 x 15

AC síť

AC síť

Počet fází	3
Síťové napětí (jednofázové)	230 V
Účinnost (cos phi)	+/- 1

Výsledky simulace

Výsledky Celkové zařízení

FV zařízení

Instalovaný výkon	19,8 kWp
Spec. roční výnos	926,21 kWh/kWp
Stupeň využití zařízení (PR)	79,3 %
Snížení výnosu zastíněním	8,1 %/Rok
Dodávka do objektu	18 359 kWh/Rok
Síťové napájení v prvním roce (včetně degradace modulů)	18 359 kWh/Rok
Spotřeba v provozní pohotovosti (Střídač)	20 kWh/Rok
Snížení emisí CO ₂	8 619 kg/rok

Výsledky na plochu modulu

Building 01-Roof Area Southeast

Instalovaný výkon	19,8 kWp
Plocha FV modulů	101,4 m ²
Globální záření na modul	1167,6 kWh/m ²
Energetický výnos FVS (AC síť)	18358,8 kWh/Rok
Spec. roční výnos	927,2 kWh/kWp
Stupeň využití zařízení (PR)	79,4 %

Kusovník

Kusovník

#	Typ	Číslo položky	Výrobce	Jméno	Množství	Jednotka
1	FV modul		DAH Solar	HCM60X9 330Wp	60	Kus
2	Střídač		GoodWe Solar Inverter	GW10K-ET	2	Kus

Katalogový list FV modulu

FV modul: HCM60X9 330Wp (v1)

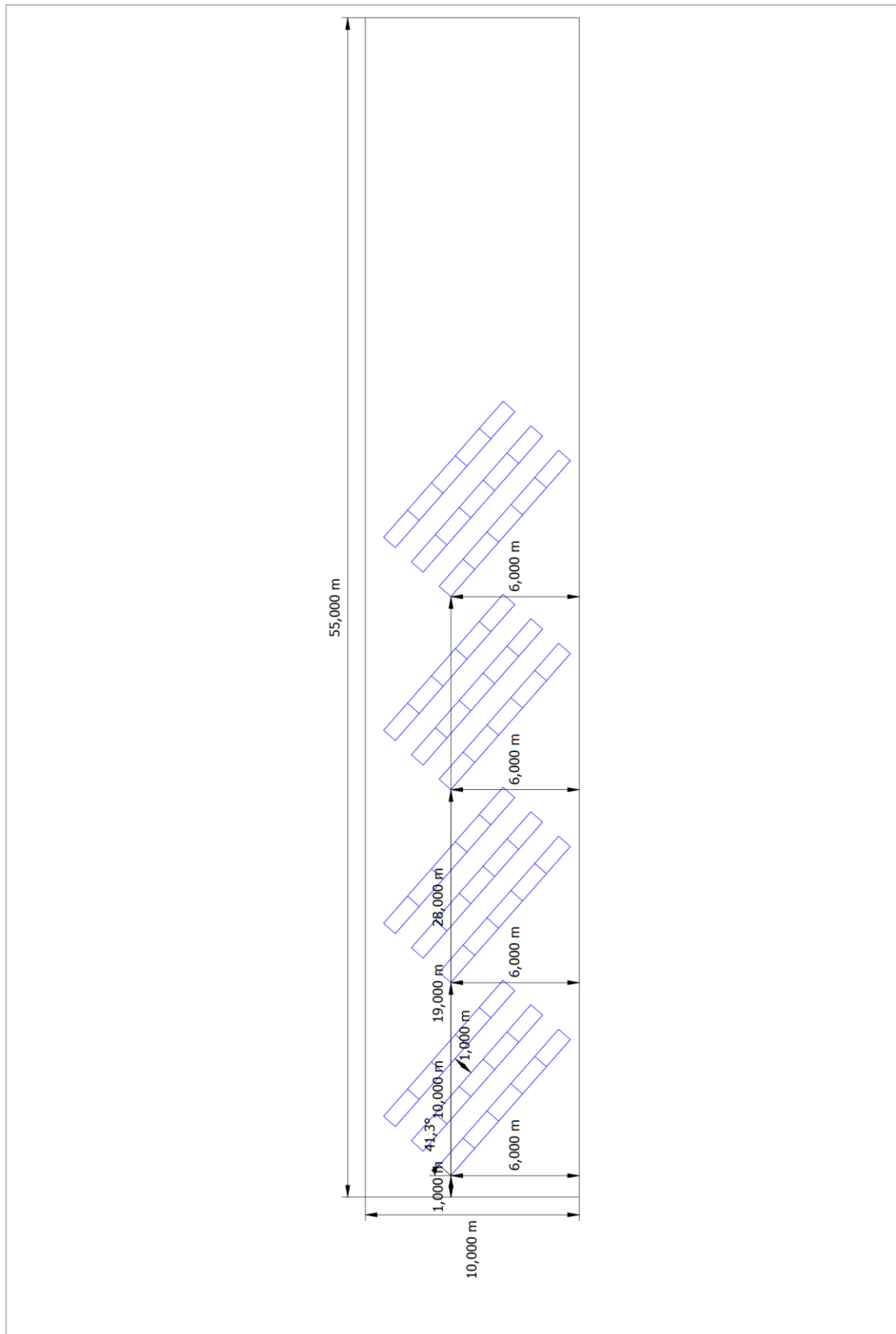
Výrobce	DAH Solar
Možno dodat	Ano
Elektrické údaje	
Typ buňky	monokrystalický Si
Pouze vhodný transformátor-měnič	Ne
Počet buněk	120
Počet obtokových diod	3
Half-cell module	Ne
Mechanické údaje	
Šířka	1002 mm
Výška	1686 mm
Hloubka	35 mm
Šířka rámu	35 mm
Hmotnost	19 kg
U/I charakteristiky při STC	
Napětí v MPP	34,2 V
Proud v MPP	9,65 A
Jmenovitý výkon	330 W
Stupeň účinnosti	19,54 %
Volnoběžné napětí	41,4 V
Zkratový proud	10,14 A
Faktor naplnění	78,62 %
Zvýšení volnoběžného napětí před stabilizací	0 %
Dílčí charakteristiky zátěže U/I (vypočítáno)	
Zdroj hodnot	Standardní (Model PV*SOL)
Ozařování	200 W/m ²
Napětí v MPP při dílčí zátěži	32,32 V
Proud v MPP při dílčí zátěži	1,93 A
Volnoběžné napětí při dílčím zatížení	37,27 V
Zkratový proud při dílčím zatížení	2,03 A
Další	
Napěťový koeficient	-147,5 mV/K
Proudový koeficient	4,6 mA/K
Koeficient výkonu	-0,41 %/K
Faktor korekce úhlu	95 %
Maximální systémové napětí	1500 V

Katalogový list měniče

Střídač: GW10K-ET (v1)

Výrobce	GoodWe Solar Inverter
Možno dodat	Ano
Elektrické údaje	
Jmenovitý výkon DC	10 kW
Jmenovitý výkon AC	10 kW
Max. výkon DC	13 kW
Max. výkon AC	11 kVA
Spotřeba v provozní pohotovosti	10 W
Noční spotřeba	0 W
Min. Výkon pro dodávku do sítě	0,01 W
Max. vstupní proud	25 A
Max. vstupní napětí	1000 V
Jmenovité napětí DC	620 V
Počet fází	3
Počet DC vstupů	2
S transformátorem	Ne
Změna stupně účinnosti při odchylce vstupního napětí od jmenovitého napětí	0,2 %/100V
MPP Tracker	
Rozsah výkonu < 20 % jmenovitého napětí	99,81 %
Rozsah výkonu > 20 % jmenovitého napětí	99,99 %
Počet MPP Tracker	2
Max. vstupní proud	12,5 A
Max. Příkon	120 kW
Min. napětí MPP	200 V
Max. napětí MPP	850 V

Rozměrový výkres



Obrázek: Building 01-Roof Area Southeast