

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Disertační práce

Únor 2015

Ing. Richard Najman

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

ENERGETICKÝ MANAGEMENT CHYTRÉHO DOMU

Disertační práce

Ing. Richard Najman

Praha, únor, 2015

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Elektroenergetika

Školitel: Doc. Dr. Ing. Jan Kyncl

Školitel specialista: Ing. Ladislav Musil, Ph.D.

Čestné prohlášení

Jméno a příjmení doktoranda: Richard Najman

Prohlašuji, že jsem svou disertační práci vypracoval samostatně a v předložené práci důsledně citoval použitou literaturu.

Specifikace autorského podílu:¹ Předložená disertační práce a prezentované výsledky vznikly bez autorské spoluúčasti jiných osob.

V Praze 5.2.2015

podpis:

¹ V případě, že některé části disertace vznikly ve spoluautorství s jinými osobami, doktorand slovně specifikuje svůj podíl.

Spoluautorem se rozumí osoba, která tvůrčím způsobem přispěla ke vzniku disertace, např. návrhem studií a pokusů a jejich provedením, přispěla k analýze, interpretaci, teoretickému zpracování či modelování dat, podílela se na návrhu a realizaci experimentálních zařízení nebo se podílela na sepsání disertace.

V opačném případě doktorand uvede: „Předložená disertační práce a prezentované výsledky vznikly bez autorské spoluúčasti jiných osob.“

1. Obsah

1. Obsah.....	4
1.1. Seznam symbolů.....	7
2. Úvod	9
2.1. Motivace.....	10
2.2. Vymezení a formulace cíle práce	10
2.3. Rozsah a obsah práce	10
2.4. Předpoklady a omezení	11
2.5. Použitý software a hardware	11
3. Současný stav řešené problematiky	12
3.1. Rozbor literatury, existující modely	12
3.2. Přehled aplikací	14
3.3. Teorie a metodologie	14
3.3.1. Tepelné ztráty v objektu.....	14
3.3.2. Tepelné zisky objektu	16
3.3.3. Otopná soustava	22
3.3.4. Elektrotepelná analogie	22
3.3.5. Ekonomické vyhodnocení	23
3.3.6. Metody optimalizace.....	23
3.3.7. Definice optimalizační úlohy	24
3.3.8. Vytvoření matematického modelu	27
3.3.9. Řídící rovnice matematického modelu.....	28
3.3.10. Počáteční a okrajové podmínky	29
4. Tepelné ztráty objektu	31
4.1. Metoda konstanty budovy	31
4.2. Vyhodnocení tepelných kapacit	31
4.3. Metoda tepelných toků	38
4.3.1. Teplá užitková voda.....	38
4.3.2. Otopná soustava	39
4.3.3. Ztráty (tepelný tok) stěnou	40
4.3.4. Ztráty (tepelný tok) stropem	41
4.3.5. Ztráty (tepelný tok) podlahou	42
4.3.6. Ztráty (tepelný tok) okny.....	42

4.3.7. Ztráty (tepelný tok) ventilací	43
4.3.8. Vyhodnocení metody tepelných toků	44
5. Funkce tepelného čerpadla – základní model.....	45
5.1. Určení typu tepelného čerpadla.....	45
5.1.1. Dimenzování bivalentního zdroje.....	46
5.1.2. Vyhodnocení již osazených tepelných čerpadel	46
5.2. Vyhodnocení chování tepelného čerpadla v objektu.....	46
6. Ekonomické vyhodnocení.....	52
7. Komplexní model objektu	54
7.1. Popis systému, předpoklady a požadavky.....	54
7.2. Matematický popis systému	55
7.2.1. Oslunění.....	55
7.2.2. Tepelné ztráty.....	58
7.2.3. Otopná soustava	64
7.2.4. Zemní výměník	65
7.2.5. Tepelné čerpadlo.....	67
7.2.6. Solární kolektor	67
7.2.7. Vyhodnocení modelu	67
7.3. Ekonomické vyhodnocení komplexního modelu	70
8. Příkladová studie 1	72
8.1. Definice objektu	72
8.2. Vyhodnocení zjednodušeného modelu	72
8.2.1. Model ztrát a chování tepelného čerpadla	72
8.3. Vyhodnocení komplexního modelu	73
8.3.1. Zdrojová data - počasí	73
8.3.2. Sluneční toky a úprava zdrojových dat	73
8.3.3. Výsledek modelu, vyhodnocení funkce.....	77
8.3.4. Celkové zhodnocení objektu, ekonomické vyhodnocení alternativ	82
9. Příkladová studie 2	85
9.1. Definice objektu	85
9.2. Vyhodnocení zjednodušeného modelu	85
9.2.1. Ekonomické vyhodnocení základního modelu.....	87
9.3. Vyhodnocení komplexního modelu	88
9.3.1. Varianta s uvážením kapacit.....	88
9.3.2. Varianta s uvážením kapacit - TČ	90

9.3.3. Varianta bez uvážení kapacit.....	90
9.3.4. Varianta bez uvážení kapacit – TČ.....	92
9.3.5. Celkové energetické a ekonomické vyhodnocení.....	95
10. Příkladová studie 3	97
10.1. Definice objektu	97
10.2. Vyhodnocení zjednodušeného modelu	97
10.3. Ekonomické vyhodnocení zjednodušeného modelu	99
10.4. Komplexní model, sluneční toky	99
10.5. Vyhodnocení komplexního modelu s kapacitami	100
10.6. Vyhodnocení komplexního modelu bez kapacit	101
10.7. Celkové energetické a ekonomické vyhodnocení.....	102
11. Shrnutí poznatků modelování objektů.....	105
12. Problematika kombinovaných fotovoltaicko-termických solárních panelů	108
12.1. Model pro analýzu solárních kolektorů	110
12.2. Vyhodnocení typů kolektorů.....	117
12.2.1. Osazení na plochou střechu	117
12.2.2. Osazení na šikmou střechu.....	122
12.3. Závěry pro kombinované kolektory	126
13. Závěr	127
13.1. Přehled výsledků disertace včetně původního přínosu doktoranda	127
13.2. Hodnocení dosažených výsledků	128
13.3. Závěry pro další rozvoj vědy nebo pro realizaci v praxi	128
14. Literatura	130
15. Seznam publikací autora vztahujících se k disertaci	130
16. Seznam ostatních publikací autora	131
17. Přílohy.....	132
17.1. Příloha A - výstupní údaje modelů nezařazené do těla publikace	132
17.2. Příloha B – Matematické modely	150

1.1. Seznam symbolů

q	Měrný tepelný tok ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
\mathbf{q}	Vektor měrných tepelných toků ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
α	Součinitel přestupu tepla ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)
T	Teplota ($^{\circ}\text{C}$, K)
λ	Součinitel tepelné vodivosti (měrná tepelná vodivost) ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
d	Tloušťka materiálu (m)
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta $5,670373\cdot 10^{-8}$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$)
ε	Emisivita materiálu (-)
\dot{m}, m	Hmotnostní tok ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)
c	Měrná tepelná kapacita ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
ΔT	Rozdíl teplot (K)
P	Příkon, výkon (W)
t	čas (s)
Q	Výkon (W) (zejména ve smyslu ztrát či tepelného výstupu)
COP	Koeficient výkonnosti (topný faktor) tepelného čerpadla (-)
S	Plocha (m^2)
kS	koeficient přenosu tepla, konstanta výměníku ($\text{W}\cdot\text{K}^{-1}$)
\mathbf{v}	vektor rychlosti ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
\mathbf{r}	vektor polohy (m)
\mathbf{x}	vektor polohy (m)
x	souřadnice polohy (prostorově jednorozměrný případ) (x)
U_g	součinitel tepelného prostupu zasklení ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)
U_w	součinitel tepelného prostupu okna ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)
U_f	součinitel tepelného prostupu rámu ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)
η	účinnost (-)
os	počet osob (pro výpočty z obsazenosti objektu)
ρ	hustota ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
V	objem (m^3)
$de(d)$	sluneční deklinace (rad), kde d je pořadí dne v roce
zs	zeměpisná šířka (rad)
\vec{N}_x	normálový vektor roviny x
$ \vec{x} $	velikost vektoru

E_{inf}	koeficient růstu ceny energie (-)
inf	koeficient obecné inflace (-)
E	energie (J)

V textu jsou případně uvedeny další podružné symboly či lokální označení korespondující s místně řešeným problémem. Definice je pak prováděna lokálně. Případně zde uváděné symboly jsou využívány s doplňkovým označením, které provádí lokalizaci v modelu či jiné upřesnění zřejmé z daného použití.

2. Úvod

SUMMARY

This dissertation thesis is focused on models of the economy aspects of energy management of the houses and of the behavior of the entire system. The key aspect is the convenience of the entire solution.

There are a lot of partial models used for this thesis. Some of them are simplified versions for a quick solution; some on the other hand are quite complex and therefore used for verification of the results of the simplified ones. Since one of the key assets of this work should be doing precise calculations based on the location and specifics of the object, main models always use weather data for the exact location (temperature, cloud coverage) and sun gains are outcome of the model with precise sun movement and cloud coverage, not numbers from some year (or month) table. Thanks to it, the behavior of the objects in models corresponds well with the experience from the real life.

Generally models allow working with heat pumps and covers their nonlinear function very well (especially air to water ones). Models also calculate every possible heat source. In models there are included installations of solar panels, central accumulation tank, earth heat exchanger, insulation of the object, orientation and surfaces of windows and other aspects.

Functionalities of each model are illustrated on case studies, while the objects for case studies were chosen so there is possibility of comparison of the model outcome with real data from that year. Each object is unique in a way, so each case study can point out some different aspects, based on the models outcome.

Final part of the dissertation thesis is focused on the fixed combined photovoltaic and thermal solar collectors with diffusive concentrator. This part is not directly incorporated to energy management, because so far this work is aimed to prove feasibility of the future research and potential installations. Still it is connected in a way, because those panels could be best used for small installations (like on houses), where is best chance to use thermal part of the collector output. Of course, the model of these collectors can be easily integrated to models mentioned before and make it a part of the calculation of the energy management, once these collectors are in production.

Keywords:

Energy management, heat pump, solar panel, combined solar panel, solar panel with concentrator, model, earth heat exchanger, central accumulation tank

2.1. Motivace

Náklady na bydlení a energie tvoří ve většině domácností majoritní výdaj (ve státech střední Evropy se průměr pohybuje v rozmezí 20-30%), přitom návrhy nových budov či opatření na budovách stávajících se jen málokdy drží zásad ekonomické výhodnosti. Jistě, existují normy (například ČSN 73 0540-2 Tepelná ochrana budov – Požadavky), které stanoví, co musí budovy dnes splňovat a existují certifikace „zelených budov“ typu BREEAM či LEEDS, ale stále se setkáváme s tím, že projekty a následná realizace jsou řešeny na zcela jiných základech než je objektivní analýza. Jinak by se nemohlo stát, že budova s excelent BREEAM ratingem má řešenu kondenzaci vody na fasádních tepelných mostech otopnými kabely, či že do domku za 2,5 miliónu je z důvodu „provozních úspor“ instalován systém vzduchotechniky a měření a regulace za další milión.

Zároveň žijeme v době, kdy dochází k rychlému vývoji na poli užívaných technologií jak na poli konstrukčních materiálů, tak technologií osaditelných do budov. V neposlední řadě jsme pak byli svědky rapidního pokroku v oblasti obnovitelných zdrojů, kdy za posledních deset let zlevnila instalace fotovoltaických systémů o 90%.

Mou motivací je tedy analyzovat reálné chování budov a běžně užívaných systémů, nalézt možné cesty k optimálnímu využití existující technologie a analyzovat některé možné budoucí trendy v souvislosti se závěry plynoucími z analýzy chování budov.

2.2. Vymezení a formulace cíle práce

Cílem práce je vytvořit funkční Matematické modely a zobecněný soubor přístupů k optimalizaci energetického managementu budov, s konkrétním zaměřením na individuální bydlení. Cílem je vyhodnotit chování těchto budov a formulovat strategie k ekonomicky výhodným řešením. Dále je cílem této práce ověřit koncept fixního kombinovaného fotovoltaicko-termického solárního kolektoru s koncentrátorem jako perspektivního zdroje energie pro malé instalace typu rodinných domů.

2.3. Rozsah a obsah práce

Obsah disertační práce je členěn následujícím způsobem. Na začátku jsou uvedeny ty nejobecnější kapitoly teoretických informací vztahujících se k tématu.

Následují kapitoly shrnující poznatky pro konkrétní aplikaci v navrhovaných modelech.

Následně jsou uvedeny vzorové studie na kterých je popsáno, které specifika se uplatní a je provedeno srovnání modelových výstupů s reálně známými daty o objektech.

Kapitoly týkající se kombinovaných fotovoltaicko-termických kolektorů jsou pak uspořádány tak, že je uvedena kapitola popisující využívané vztahy a následně kapitola s výsledky modelu.

Obecně pak pro doplnění všech kapitol slouží přílohové kapitoly, kde jsou jednak uvedeny zdrojové kódy využitých modelů a některé doplňkové výstupy neuváděné v hlavním těle disertační práce. S ohledem na limitovanou velikost samotné práce jsou zdrojové kódy vedeny jako příloha samostatná, nejlépe využitelná v elektronické podobě.

2.4. Předpoklady a omezení

V jednotlivých případech jsou přijímána dílčí zjednodušení, zejména pak tam, kde by komplexní model překračoval požadavek na vyhodnocení v přiměřeném časovém rámci. Všude, kde je to možné, bylo provedeno porovnání zjednodušeného modelu s modelem komplexním či s reálným měřením a byl popsán efekt zjednodušení modelu na obdržené výsledky. Vždy, když to bylo možné byly využity reálné parametry z databází (například zamračení, teploty) pro konkrétní lokalitu a zvolený časový úsek.

Aby tato práce naplnila svůj účel, mají být výsledky pochopitelné i pro poučené laiky, pro většinu problémů byl proto zvolen přístup analýzy vzorových případů, kdy lze výsledky jednoznačně interpretovat a jednoduše ověřit jejich soulad s praxí.

2.5. Použitý software a hardware

Pro výpočty matematických modelů byl použit software Mathematica ve verzích 5.2 a 8.0. Pro zpracování textové části byl použit program Microsoft Word 2007, pro tabulky a vybrané grafy Microsoft Excel 2007. Grafy byly rovněž využity přímo z výstupů SW Mathematica.

Výpočty byly prováděny na PC v konfiguracích dvoujádrový AMD Athlon x64 2800+, 4GB RAM, Windows XP a šestijádrový AMD FX 6300, 8GB RAM, Windows 7.

Maximální přípustná doba výpočtu byla uvažována 30 minut na slabším stroji, v případě jejího překročení bylo voleno řešení umožňující rychlejší vyhodnocení.

3. Současný stav řešené problematiky

Tato kapitola má za cíl sumarizovat současný stav řešené problematiky.

První podkapitola se zabývá dostupnou literaturou k tomuto tématu a definuje vztah této práce k již existujícím publikacím. Rovněž pokrývá vztah k existujícím modelům.

Druhá podkapitola se zabývá okruhem aplikací ve kterých lze uplatnit výstupy této práce.

Třetí podkapitola podává shrnutí teoretických základů na kterých tato práce staví a obecný přehled optimalizační metodologie.

3.1. Rozbor literatury, existující modely

Literatura

Z hlediska využití literatury bylo toto relativně okrajové, v případě citací je daný odkaz uveden v textu, většinou je využití publikací omezeno na přebírání údajů technických a materiálových, v případě teorie je jsou převzaty základní vzorce (tabulky).

Danou problematikou se samozřejmě zaobírá různá literatura, každý autor (kolektiv) přistupuje k řešení segmentu, který považuje za zajímavý. V této disertační práci jsem vycházel většinou z vlastních publikací a z vlastních modelů, protože jsem na publikaci se srovnatelným rozsahem a obsahem nenarazil. Využití externích zdrojů je následující:

Využití literatury:

- [1] Definice tepelně technických vlastností
- [2] Hodnoty technických a fyzikálních veličin, základní definice vztahů
- [3] Hodnoty technických a fyzikálních veličin, základní definice vztahů
- [4] Podklady pro vyplnění dat tepelných čerpadel
- [5] Konstrukce Matematických modelů
- [6] Vliv znečištění, polohy a rozptylu na sluneční záření
- [7] Základní funkce a charakteristiky solárně-termických panelů
- [8] Hodnoty technických a fyzikálních veličin, základní definice vztahů
- [9] Podklady pro vyplnění dat solárně-termických systémů
- [10] Základní aspekty pro srovnání fotovoltaicko-termických panelů
- [11] Základní aspekty pro využití difúzních reflektorů pro fotovoltaicko-termické aplikace
- [12] Základní definice a popis hybridních kolektorů
- [13] Vztahy a definice využité pro tepelně-technický popis objektu
- [14] Vztahy a definice využité pro konstrukci modelu optické části kolektoru a pro účinnosti slunečních zisků

Modely, software

Celkově existuje celá řada programů využívající nejrůznější modely, obecně srovnání bude vždy poněkud pokulhávat, protože srovnávám softwarový produkt z pohledu uživatele s mými modely, kde z pohledu programátora znám interní architekturu. Proto zde provedu alespoň stručné srovnání s některými z nich, nebudu však srovnávat uživatelské prostředí, protože moje modely jsou určeny ke spouštění přímo v Mathematice.

K-CAD

Tento software je velmi komplexní a umožňuje provést simulaci ztrát budovy řádově přesnější, než modely v Mathematice. Cílovou skupinou jsou projektanti specializovaní na otopné soustavy a konkrétní konstrukční řešení objektu. Program tedy jednoznačně vede v možnosti podrobného vyhodnocení a širokých katalogů bloků.

V čem jsou mé modely lepší:

- 1) Rychlejší výsledky – korektní definice objektu v programu K-Cad mi zabrala několik dní, vyhodnocení mých modelů je podle volby složitosti záležitost desítek minut až dvou hodin.
- 2) Integrace reálných údajů o počasí – program K-Cad umožňuje počítat chování objektu nemá však možnost automatického vyhodnocení v reálných podmínkách, pro dlouhodobější vyhodnocení užívá normované hodnoty.
- 3) Integrace řešení problému – využívám sice samostané modely na přípravu dat, samotné technické vyhodnocení je však vždy realizováno v jednom modelu a lze rychle a jednoduše provést vyhodnocení řady technicky rozličných variant. Například varianty k příkladové studii 3 (18 variant včetně srovnávací) jsem vyhodnotil za dvě hodiny a za půl hodiny jsem v navazujícím modelu vyhodnotil ekonomický potenciál zajímavých variant. V programu K-Cad bych nad takovou studií strávil minimálně týden.
- 4) Modifikovatelnost – díky využití prostředí SW Mathematica lze poměrně jednoduše upravit modely aby zohlednily nějaký netypický rys budovy bez nutnosti mít komplikovaný model/zadávaní ve všech objektech.
- 5) V návaznosti na reálné hodnoty (oslunění včetně zamračenosti, teplota) modely počítají velmi korektně chování tepelných čerpadel v konkrétních objektech.

TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation)

je modulární program určený především pro dynamickou analýzu energetických systémů staveb. Zejména energetických bilancí budov, solárních fototermálních soustav teplovodních, teplovzdušných, fotovoltaických systémů a vzduchotechnických systémů pro větrání a teplovzdušné vytápění. Zdroj: <http://www.tzb-info.cz/1956-simulacni-prostredi-trnsys>

Tento program jak základní popis z TZB-info napovídá je svým určením a svou náplní bližší mým modelům. V jednodušších objektech je srovnání ve výsledku stejné jako s programem K-CAD. Program TRNSYS je jednoznačně lepší nástroj pro modelování složitějších systémů (například vícezónové objekty), pro náhled na řešení objektu typu rodinného domu je však zbytečně komplikovaný a obsáhlý.

Vyzkoušel jsem řadu dalších programů, z těch dostatečně komplexních (DESIGNBUILDER, CONTAM, ESP-r, ...) mají všechny obdobné výsledné srovnání.

Existují samozřejmě i jednodušší programy jako například HESTIA VIVID 5, kde ovšem již dochází ke značnému zjednodušení a omezení dostupných variant, přestože po stránce konstrukční lze objekt definovat poměrně podrobně. Například právě Hestia má možnost poměrně přesného a rychlého výpočtu ztrát objektu, ale práce s osluněním a vyhodnocením solárních kolektorů a chováním tepelných čerpadel je méně vypovídající, zvláště uvažíme-li některou výrazněji nelineární instalaci (např.: tepelné čerpadlo vzduch/voda v objektu s klasickou radiátorovou soustavou).

Výsledkem mého srovnání tedy je, že modely, které jsem vytvořil jsou určeny k zaplnění díry v nabídce, kdy v současném portfoliu programových řešení není program, který by umožňoval obdobnou přesnost a rychlost, kterou dosahuji ve svých modelech.

3.2. Přehled aplikací

Z hlediska energetického managementu budov je aplikace této disertace (potažmo vytvořených modelů) racionalizace investičních a provozních nákladů stávajících i projektovaných budov. Vytvořený model umožňuje vypočítat přínosy různých opatření a po jejich ocenění spočítat ekonomickou návratnost i se zohledněním výhledu inflace a ceny energií.

Aplikace modelu kombinovaného fotovoltaicko-termického solárního kolektoru je určena pro další rozvoj této technologie, která umožňuje zajímavé využití sluneční energie v malých instalacích.

3.3. Teorie a metodologie

3.3.1. Tepelné ztráty v objektu

V každém objektu dochází k tepelným ztrátám působením stejných základních mechanismů, byť v každém objektu je jejich zastoupení různé. Zastoupeny jsou tyto fyzikální procesy.

Nejprve pro ustálené stavy:

Přenos tepla konvektivní

Dochází k přenosu tepla ze vzduchu do pevných látek a naopak, přičemž jednotkový tepelný tok je v tomto případě definován rovnicí [13]

$$q = \alpha * (T_1 - T_2) \quad (1.1)$$

Kde T_1 je uvažována teplota zdroje a T_2 teplota příjemce tepelného toku.

Návazně dochází k přenosu tepla vedením v dané pevné látce. Ustálený stav vedení tepla je dán rovnicí [13]

$$q = \frac{\lambda}{d} * (T_2 - T_3) \quad (1.2)$$

Dále dochází k přenosu tepla zářením [13]

$$q = \sigma * \varepsilon * (T_3^4 - T_4^4) \quad (1.3)$$

Tyto rovnice slouží k popsání ustáleného stavu, což sice přesně nastává málokdy, ale v řadě situací jsou tyto rovnice dostatečně přesnou aproximací i pro stavy dynamického rázu, v případech, že jde buď o systém s velmi nízkými tepelnými kapacitami, nebo je změna veličin pomalého rázu.

Kromě výše popsaných dějů, které zachycují prostup tepla obálkou objektu existuje možnost prostupu tepla za pomoci vhodného fyzického nosiče, v našich příkladech se jedná buď o ventilaci (tedy teplo obsažené ve ventilovaném vzduchu), případně pro systémy solárních kolektorů a tepelných čerpadel uvažujeme prostup tepla obálkou budovy ve vhodné tekutině. Obecně tepelnou ztrátu či zisk pro každé jednotlivé médium vyjadřuje rovnice [13]

$$q = \dot{m} * c * \Delta T \quad (1.4)$$

Pro dynamické vyhodnocení je třeba uvažovat i tepelné kapacity jednotlivých zúčastněných objektů, zejména těch, kde tepelná kapacita hraje významější roli. Pro stěnu pak platí (zjednodušeno na 2D přístup) [13]

$$\rho_s(x) * c_{p_s}(x) * \frac{\partial T_s(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} * (\lambda(x)_s * \frac{\partial T_s(x, t)}{\partial x}) \quad (1.5)$$

Pro λ_s konstantní lze také upravit do tvaru

$$\frac{\partial T_s(x, t)}{\partial t} = \frac{\lambda_s}{\rho_s(x) * c_{p_s}(x)} * \frac{\partial^2 T_s(x, t)}{\partial x^2} \quad (1.6)$$

Kde člen $\frac{\lambda(x)_s}{\rho_s(x) * c_{p_s}(x)}$ vyjadřuje teplotní vodivost, tedy schopnost změnit svou teplotu vlivem tepelného toku proudícího do daného elementu (případně vyrovnat teplotu uvnitř látky) a bývá označován „a“. Hodnota teplotní vodivosti je zajímavým ukazatelem chování materiálu, ale z pohledu vyhodnocení budovy může být spíše zavádějícím vodítkem. Například lehký polystyren vykazuje stejnou či vyšší teplotní vodivost jako beton či cihlové zdivo, protože má o tolik nižší hustotu o kolik má nižší tepelnou vodivost.

A ve stejném duchu pak lze uvažovat i vzduch. Pro vzduch uvažujeme zjednodušení v tom smyslu, že vzduch v místnosti se promíchává natolik ideálně, že jej lze uvažovat jako homogenní hmotu, pak pro něj platí rovnice

$$\rho_v * c_{p_v} * \frac{dT_v(t)}{dt} = \frac{P(T_v(t)) - S * \alpha * \Delta T_1}{V} - \frac{\rho_v * c_{p_v} * \Delta T_2}{t_v} \quad (1.7)$$

Kde $P(T_v(t))$ je výkon vnitřního tepelného zdroje, $S * \alpha * \Delta T_1$ je konvekce do okolí a $\frac{\rho_v * c_{p_v} * \Delta T_2}{t_v}$ je tepelná ztráta ventilační kde t_v je čas v sekundách na kompletní výměnu vzduchu.

3.3.2. Tepelné zisky objektu

Abychom mohli vyhodnotit objekt jako celek, musíme správně postihnout i oblast zdrojů tepla, zejména nás bude zajímat efektivita získávání tepla s ohledem na správné vyhodnocení ekonomiky provozu.

Elektrokotel, přímotop

V případě zdroje typu elektrokotel či přímotop je to jednoduché, tento zdroj ze své fyzikální podstaty pracuje s účinností 100%. Může dojít pouze k tomu, že část energie je zmařena na přípojce nízkého napětí, pokud však nejde o velmi dlouhou poddimenzovanou přípojku, lze toto zanedbat (typicky 1%). Jak uvedu ještě v příslušné kapitole, roli v ekonomice provozu hraje také zlevnění elektrické energie pro jiné účely.

Plynový kotel

V případě zdroje typu plynový kotel je dnes škála zdrojů široká a účinnosti se pohybují od 60 do 108%, proto je třeba k tomuto zdroji přistupovat vždy individuálně a jeho parametry řešit vždy v kontextu celé instalace. Proč má ale tak „jednoduchý“ zdroj takové rozpětí účinnosti a proč je uváděna účinnost nad 100%? Důvodů je samozřejmě více, probereme zde ty dominantní:

- Účinnost vnitřního výměníku, teplota spalin – řada starších nekondenzačních kotlů má na dnešní dobu špatně řešený výměník a zejména u klasických kotlů se samostatným nasáváním a samostatným odtahem spalin se můžeme setkat s velmi vysokou teplotou spalin na výstupu z komína (klidně 160-200°C). O něco lepší bývá situace u turbokotlů, ale i zde se můžeme běžně setkat s teplotou spalin 120-150°C, což pořád není optimální stav.
- Přizpůsobení kotlů otopné soustavě – v řadě instalací jsou kotle předdimenzovány, jelikož jsou výkonově navrhovány tak, aby násobně pokryly uvažované ztráty v objektu. Běžný stav je, že vypočtená tepelná ztráta 10kW znamená kotel 25-30kW. V případě, že se kotlem nahřívá větší zásobník a kotel může pracovat na svůj nominální výkon a zásobník poskytuje dostatečnou časovou konstantu pro celý systém, aby nemusel kotel spínat často, tak to není problém. Řada instalací ale takovéto podmínky nemá a kotel je nucen pracovat buď na zlomek jmenovitého výkonu, nebo stále spínat. Obě varianty se velmi negativně podepisují jak a účinnosti, tak na době života daného kotle. Proto se může například stát, že po zateplení objektu zůstane spotřeba plynu beze změny, protože dojde k poklesu účinnosti kotle.
- Užití kondenzačních plynových kotlů obecně zvyšuje účinnost a při optimálním návrhu se lze dostat právě nad oněch 100%. Princip je jednoduchý, v zemním plynu se účtuje jako 100% výhřevnost, spalné teplo

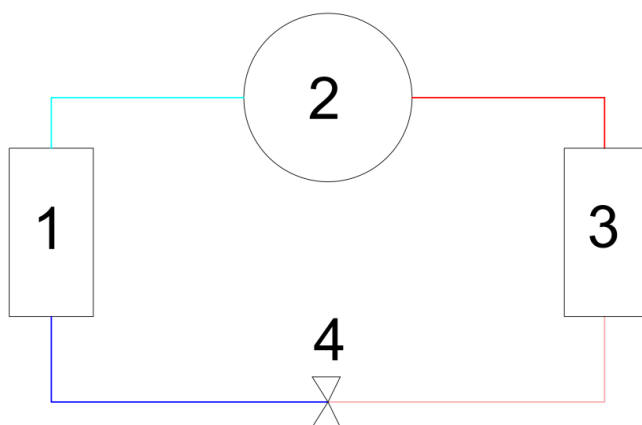
je ve skutečnosti vyšší o 10-12%, ale pro klasické kotle je toto teplo navíc nevyužitelné a ve formě vodní páry unikne ve spalínách. U kondenzačních plynových kotlů lze část tohoto tepla kondenzací zachytit a vylepšit tak účinnost systému. Z výše uvedeného plyne – fyzikální účinnost je vždy pod 100%, pouze obchodní model ceny za odebraný plyn je nastaven k hodnotě, která je menší než skutečných 100%. Hlavní problém kondenzačních kotlů je opět návrh navazující otopné soustavy. I když může teoreticky kotel pracovat s účinností 108%, může se taky lehce stát, že to bude jen 70%. Kondenzační kotel potřebuje pro funkční kondenzaci nízkou teplotu vratné vody, pokud je teplota 60°C ke kondenzaci už fakticky nedochází a ztrácí se tak hlavní výhoda kondenzačního kotle. Navíc i kondenzační kotle podléhají výše zmíněným vlivům ohledně správného dimenzování výkonu.

- Kondenzační kotel může také vykazovat odlišné účinnosti v režimu vytápění a TUV, protože výrobce nepočítá s pomalým nahříváním TUV a na rozdíl od práce do otopné soustavy kotel nereguluje výkon tak, aby udržel teplotu vratné větve v kondenzační oblasti ani při ohřevu TUV na 45°C!
- Proto v případě plynového kotle nelze stanovit paušální účinnost a je nutno povést přesné vyhodnocení pro daný objekt, nejlépe ve spolupráci se specializovaným projektantem. Samozřejmě pro obecné srovnání můžeme použít model s nejllepší a nejhorsí možnou účinností.

Tepelné čerpadlo

Tepelné čerpadlo (TČ) pracuje na principu odebírání tepla zdroji o nižší teplotě a předávání tepla otopné soustavě na teplotě vyšší. Oběh pak pracuje ve směru 1-2-3-4.

Obr.1



- 1 Výparník - Venkovní zdroj nízkopotenciálové energie
- 2 Kompresor - transformace energie na vyšší potenciál
- 3 Kondenzátor - odevzdání energie na vyšším potenciálu

4 Expanzní ventil - uvedení pracovní látky do stavu schopného příjmu nízkopotenciálové energie (snížení tlaku)

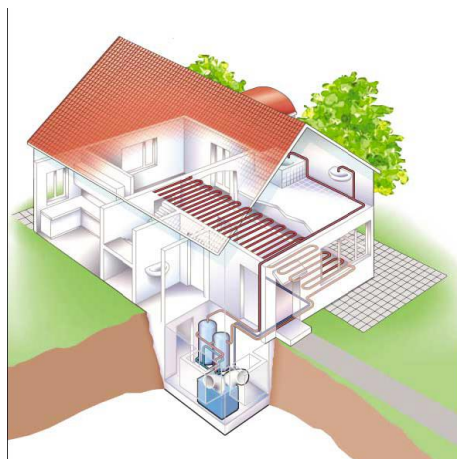
Základním ukazatelem účinnosti tepelného čerpadla je koeficient [13]

$$COP = \frac{P_{el} + Q_{TC}}{P_{el}} \quad (1.8)$$

Kde P_{el} je příkon tepelného čerpadla, Q_{TC} je energie získaná z vnějšího zdroje, tedy zjednodušeně řečeno COP udává kolikrát je tepelné čerpadlo účinnější než elektrokotel. COP pro dané tepelné však není konstanta (byť to někteří výrobci uvádí, jako by byla), ale COP závisí na teplotě vstupního média a teplotě média výstupního, obecně čím jsou si teploty bližší, tím je COP větší. Proto seriózní výrobci uvádí v katalogových listech tepelných čerpadel křivky P_{el} , Q_{TC} a někdy i COP v závislosti na teplotě otopné vody a na teplotě zdroje vnější energie. Proto je škála COP v reálném provozu velmi široká a může nabývat hodnot od 1 po 6 v závislosti na podmínkách instalace tepelného čerpadla. Jak uvedu ještě v příslušné kapitole, roli v ekonomice provozu hraje také zlevnění elektrické energie pro jiné účely.

- Systém čerpání a využívání se rozlišuje podle média kterému je teplo odebíráno/předáváno. V úvahu přichází systémy vzduch/voda, voda/voda a země/voda.
- Systém vzduch/voda je investičně nejméně náročný, ale vykazuje nejnižší topný faktor a velkou závislost na venkovních podmínkách. Při snižování teploty vzduchu topný faktor prudce klesá, proto je výhodnost tohoto řešení sporná.
- Systém voda/voda je investičně náročnější a je závislý na dostatečném množství vody specifikované kvality. Odběr vody navíc musí být povolen místními úřady. Má však dobrý topný faktor a ve většině aplikací lze počítat s tím, že se teplota vody nemění.
- Systém země/voda je obecně investičně nejnáročnější avšak nejkvalitnější co se topného faktoru týče. Pro dodávku energie je třeba buď dodávat teplo z vrtu, nebo zemního kolektoru. Ilustrační obrázky[4]:

Vzduch/voda



Obr.2

Voda/voda



Obr.3

Země/voda



Obr.4

- Pro systém vzduch/voda může být aplikován zemní výměník, který zajišťuje do jisté míry menší závislost této instalace na teplotě vzduchu, zároveň ale navyšuje investice a výsledek je tedy jistým kompromisem mezi instalací vzduch/voda a voda/voda.

Kotel na tuhá paliva

Obecně jsou kotle na tuhá paliva velmi rozšířeným způsobem vytápění, zároveň legislativa směřuje k jejich potlačení, respektive výraznému omezení nabízené škály. Přesto zastávají podstatnou pozici ve vyhodnocení alternativ vytápění. Účinnost se pohybuje zpravidla v rozmezí 60 – 95% v závislosti na typu paliva a kotle. Obecně nejvyšší účinnost vykazují kotle plně automatizované na peletky.

- I u kotlů na tuhá paliva existují kondenzační varianty. Udávaná účinnost by však neměla být přes 100%, protože pro jiná paliva než plyn (kde je historicky zaveden jiný princip) by se měla brát účinnost vždy ke spalnému teplu a tedy fyzikálně nemůže překročit 100%.

- Kotle na tuhá paliva jsou v reálné účinnosti závislé na provozování na konkrétní výkon, změny však zpravidla nejsou tak drastické jako u kotlů plynových.
- Pro obecné vyhodnocení je pak třeba vzít krajní hodnoty a vyhodnotit tak rozpětí možných výsledků.

Okna – solární tepelné zisky

V dnešní době hrají výraznou úlohu v energetické bilanci objektů solární tepelné zisky. Přestože každé okno představuje z pohledu zateplené stěny nežádoucí tepelný most, představuje zároveň cestu pro zisk sluneční energie a při správném návrhu tyto zisky převažují. Tepelné ztráty se počítají stejným mechanismem jako prostup stěnou, pro korektní kalkulaci tepelných zisků je třeba uvážit jaký mechanismus zvolit. Existuje možnost využít statistických údajů o průměrné osluněnosti, ale to nekoresponduje s cílem, kterým je vyhodnotit chování systému v reálných provozních stavech, proto pro vyhodnocení tepelných zisků z oslunění uvažují přesnou velikost a orientaci okenních otvorů, vystavení slunci pak počítám z konkrétního pohybu slunce po obloze a redukuji pro jednotlivé časové úseky daty o zamračenosti získanými pro konkrétní časový úsek a konkrétní umístění.

Výšku slunce vůči obzoru můžeme vypočítat ze vztahu

$$\text{Arcsin}(\text{Sin}(de(d)) * \text{Sin}(zs) + \text{Cos}(de(d)) * \text{Cos}(zs)) * \text{Cos}(15 * (\text{hod} - 12)) \quad (1.9)$$

Kde sluneční deklinace

$$de(d) = \frac{\pi}{180} * (-23,5 * \text{Cos}(\frac{\pi}{180} * (d+9))) \quad (1.10)$$

d je pořadí dne v roce, zs je zeměpisná šířka v rad a hod je konkrétní hodina daného dne.

Účinnost osvětlení je dána jako cosinus úhlu, jež svírá normála osvětlované roviny s dopadajícím paprskem (viz bodový světelný zdroj)[14]. Se znalostí výšky slunce (a samozřejmě znalostí úhlu slunce vůči světovým stranám) můžeme polohu slunce vyjádřit jako jednotkový vektor a totéž provést s normálou roviny okna [14].

Jelikož nás zajímá kosinus úhlu těchto vektorů, který je roven účinnosti zachycení slunečního svitu rovinou okenního otvoru stačí nám na těchto vektorech provést operaci skalárního součinu. Zde je třeba uvést, že na rozdíl od solárních panelů, které mají fakticky nulovou hloubku je u oken situace taková, že oslunění otvoru okna není rovno energii dodané do objektu z důvodu ztráty části toku na ostění. V závislosti na konstrukci konkrétního objektu může být správnou aproximací nějaká vyšší mocnina jako $\text{Cos}^{1,5}\varphi$ až $\text{Cos}^2\varphi$. Určující je poměr kratší hrany okna vůči jeho hloubce. Při poměru 4 je odpovídající aproximace $\text{Cos}^{1,5}\varphi$, při poměru 2 už $\text{Cos}^2\varphi$, při poměru 1 (což už začíná být střílna, nikoli okno) vychází přibližná aproximace $\text{Cos}^3\varphi$. U oken nás pochopitelně zajímá rovněž materiál a počet skel, potažmo koeficient prostupu slunečního záření, který jim odpovídá. Obvyklé rozmezí je dnes 0,4-0,8.

Obecně $\text{Cos}\varphi = \frac{\vec{N}_1 \cdot \vec{N}_2}{|\vec{N}_1| * |\vec{N}_2|}$ přičemž jmenovatel zde je při jednotkových vektorech roven jedné.

Tento postup lze poměrně jednoduše provést pro libovolný časový úsek a získat tak funkci zachycení slunečního záření na kterou lze aplikovat data o zamračení v daném časovém úseku.

Solární zisky – fotovoltaické či termické panely

Kromě pasivních tepelných zisků (pohlcení fasádou, okny) je dnes rozšířeným trendem využívat aktivních systémů solárních kolektorů.

Pro všechny typy solárních kolektorů lze využít stejný princip pro určení účinnosti oslunění jako pro oslnění oken. Rozdílná je však účinnost dalšího nakládání se získanou energií. V případě fotovoltaických panelů dojde ke konverzi určité části (8-45%) na elektrickou energii, zbytkové teplo je nežádoucí, jelikož snižuje účinnost fotočlánků a mělo by být co nejrychleji odvedeno do okolí. S ohledem na další nutné zpracování stejnosměrného výstupu fotočlánků bývá zhruba 10% získané energie ztraceno než energie dojde svého cíle (ať už se jedná o spotřebu v objektu či zpětnou dodávku do sítě). Obecně systémy s vyšším využitím využívají koncentraci slunečního svitu a patří mezi ty dražší.

V případě termických článků je využíváno přímo teplo a je tedy naopak velmi nežádoucí, aby docházelo k jakémukoli ochlazení panelu, cílem je maximum energie předat objektu. Účinnost kolektorů závisí na jejich stavbě a obecně se pohybuje v rozmezí

- Kapalinové kolektory bez selektivního povrstvení 25– 40%
- Kapalinové kolektory se selektivním povrstvením 30 – 55%
- Vakuové trubicové kolektory 40 – 85%

Rozmezí účinností je orientační, protože termické panely na rozdíl od fotovoltaických vykazují poměrně strmou závislost na intenzitě dopadajícího záření a cílové výstupní teplotě. Do jisté míry lze toto modelovat tak, že spočítáme ztráty panelu do okolí, tedy

$$P_{ZTSP} = S * \alpha * (T_{SP} - T_{okoli}) + S * \sigma * \varepsilon * (T_{SP}^4 - T_{okoli}^4)$$

Kde T_{SP} uvažujeme průměrnou teplotu systému kolektoru. Jak je z pohledu na vzorec ztrát patrné, ztráty jsou závislé na povrchové teplotě kolektoru, proto vychází vakuované trubicové kolektory (optimálně s koncentrátory) ze srovnání nejlépe, protože vnější vrstva má velice omezené sdílení tepla se samotným kolektorovým tělesem uvnitř.

Vakuované trubicové kolektory zároveň vykazují menší tendenci optimálně zužitkovat vysokou intenzitu záření.

Vnitřní zdroje – ostatní

Každý spotřebič je zároveň zdrojem tepla, stejně jako každá osoba či zvíře. U standardních nízkoenergetických domů lze tyto zdroje tepla z hlediska chování systému jako celku zanedbat, typicky je takto pokryta energie v řádu jednotek procent roční spotřeby na vytápění a srovnatelný objem energie jako z nich objekt získá, zároveň ztratí nezmapovanými tepelnými mosty. Samozřejmě, čím více se blíží budova standardu pasivního či nulového domu, tím více je třeba i tyto vlivy korektně vyhodnotit.

V případech, kdy je toto vyhodnocení nutné jsou tyto zdroje dosazeny do modelu jako zdroje tepla nepodléhající regulaci. Modely, které jsem v rámci této práce pro simulace využil toto umožňují, neřešil jsem však pasivní domy, proto jsem je zanedbal.

Pro úplnost uvedu, že na muže se uvažuje 100W, na ženu 85W a na dítě 65W jako ekvivalentní zdroj tepla.

Výměník jako zdroj energie

V moderních budovách se výměník vyskytuje často v mnoha exemplářích. Podstatná pro všechny aplikace je schopnost předat energii mezi různými médii. Ať se jedná o spaliny a otopnou vodu v kotli, nebo ventilovaný a čerstvý vzduch v rekuperaci, solární tekutinu a otopnou vodu v systému solárních kolektorů nebo zemní výměník, který může sloužit jako zdroj tepla či chladu v extrémnějších klimatických podmínkách.

Obecně ve výměníku přechází energie dle vzorce

$$Q = kS * \frac{T_5 - T_7 - (T_6 - T_8)}{\ln \frac{T_5 - T_7}{T_6 - T_8}} \quad (1.11)$$

Kde T_5, T_6 jsou teploty ohřevu (vstup, výstup) a T_7, T_8 jsou teploty ohřivaného média (vstup, výstup), kS je konstanta výměníku. Samozřejmě stejně tak platí pro výměník rovnice bilancující energii vstupů a výstupů

$$m_5 * c_5 * T_5 + m_7 * c_7 * T_7 - Pz = m_6 * c_6 * T_6 + m_8 * c_8 * T_8$$

V některých aplikacích má smysl počítat i energetické ztráty na výměníku Pz (pokud nahříváme zásobník TUV výměníkem ze solárního okruhu mimo akumulární nádrž, výměník je tepelně neizolovaný). Tyto ztráty mohou být během topné sezóny jen uvolněním žádoucí energie do objektu jinou cestou, ale přesto mají vliv na chování systému. V použitých modelech toto neuvažují, počítám vliv TUV jako ztrátu pokrývanou z akumulární nádrže.

3.3.3. Otopná soustava

Z hlediska energetického vyhodnocení lze otopnou soustavu vnímat jen jako další výměník, který předává teplotu z jednoho média druhému, jen konstantu výměníku nahradíme konstantou otopné soustavy.

$$Q = k_{TOP} * \frac{T_{i1} - T_{i2} - (T_{o1} - T_{o2})}{\ln \frac{T_{i1} - T_{i2}}{T_{o1} - T_{o2}}} \quad (1.12)$$

Kde i značí vstup, o výstup a index 1 odpovídá topné vodě, index 2 ohřivanému vzduchu.

Z hlediska vlivu na zbytek instalace je pro nás právě konstanta topení klíčová, jelikož pro většinu tepelných zdrojů je výhodná nízkoteplotní otopná soustava, což znamená, že konstanta topení je potřebná co nejvyšší. Tuto konstantu lze získat jednak z údajů projektu topení, nebo u stávajících instalací změřit, případně vypočítat, známe-li udržovaný stav otopné soustavy v některém provozním stavu.

3.3.4. Elektrotepelná analogie

Pro snadnější konstrukci schémat lze vyjít z elektrotepelné analogie [13], ve které jsou tepelným veličinám přiřazeny odpovídající elektrické veličiny a k sestavení rovnic modelu lze následně použít postupy teorie elektrických obvodů.

Stabilní teplota odpovídá zdroji napětí, tepelný zdroj zdroji proudu, tepelný tok elektrickému proudu a úbytek napětí úbytku teploty, tepelné vodivosti odpovídají vodivostem elektrickým, tepelná kapacita kapacitě elektrické a tepelný odpor elektrickému odporu.

3.3.5. Ekonomické vyhodnocení

Při správném vyhodnocení způsobu vytápění, ztrát a zisků v objektu získáme všechna potřebná data pro provedení ekonomické analýzy. Je třeba zvolit nějaký vhodný mechanismus, který umožní vyhodnocení provést parametricky, aby výsledkem bylo nejen minimum nákladů ale aby bylo z výsledků zřejmé jaký rozsah parametru přinese rozumný výsledek, jelikož například výpočet vedoucí k půlmetrové izolaci objektu v praxi realizován nebude, pokud ale bude minimum mělké a s 20cm izolace se dosáhne srovnatelný výsledek, tak je tato cesta pro investora hned zajímavější.

Proto pro vyhodnocení volím variantu, že sčítám veškeré náklady po vyhodnocované období. Jejich hodnotu vždy přepočítávám inflačními koeficienty na současné ceny tak, aby byla jednotná báze pro všechna srovnání.

3.3.6. Metody optimalizace

Návrh otopných soustav, izolací, zdrojů tepla a celkově energetického managementu lze optimalizovat řadou metod. Aktuální stav, alespoň z mé zkušenosti projektanta, je takový, že se tak neděje. Běžně „optimalizace“ návrhu spočívá v tom, že se vypracují dvě až tři varianty vycházející z dříve realizovaných projektů a ty se předloží investorovi k posouzení, ten vybere tu investičně nejlevnější (pokud jde o developera, či soukromého investora s omezenými zdroji) nebo tu nejkompexnější (pokud jde o člověka, kterého finanční náročnost nezajímá) a tím optimalizace končí.

Jelikož dostatečně komplexní model objektu je záležitost vysoce překračující schopnosti projektantů a finanční rámec toho, co je investor za projekt ochoten zaplatit je třeba hledat optimální kompromis. Proto by v rovině vědecké měla tato práce představit dostatečně komplexní a robustní pohled na věc, ale vždy by měly být výsledky zjednodušeny do závěrů sdílitelných a aplikovatelných v běžné praxi. Časová náročnost vyhodnocení objektu při znalosti vstupních dat musí být řádově maximálně v jednotkách hodin, aby se tímto někdo zajímal.

Proto i když budu zpracovávat složitější modely, tak ty mají hlavně sloužit k ověření parametrů potřebných pro ekonomické vyhodnocení, potažmo ke srovnání s modely zjednodušenými. Nepředpokládám využití komplexních modelů v běžné praxi.

Postup tedy spočívá v popsání systému takovým modelem, kde lze poměrně snadno měnit parametry objektu, výstupem tohoto modelu by pak měly být údaje, které lze dosadit do ekonomického vyhodnocení a optimalizací dojít ke správnému řešení z hlediska optimálního využití prostředků.

Pro dílčí i celkové vyhodnocení lze využít nejrůznější optimalizační metody, v některých případech jsou zvolené funkce tak snadné na analýzu, že můžeme přistoupit k řešení s libovolnou metodou a dosáhneme výsledku v rozumném čase, v jiných případech je nutno volit metodu, která je pro daný typ funkce vhodná. [13]

3.3.7. Definice optimalizační úlohy

Identifikace problému

V prvním kroku návrhu optimálního řešení není je nutná přesná identifikace problému. Ta zahrnuje dokonalé vymezení problému, exaktní formulace jasných a přesných cílů a analýzu omezujících a podpůrných prostředků.

Dále je nutné stanovit globální kritéria (detailní budou rozvedena až při tvorbě matematického modelu). Těmi jsou parametry a ukazatele, podle kterých budeme řešení posuzovat. Na úplnosti těchto kritérií závisí úspěšnost rozhodovací analýzy. I když v tomto případě je pro většinu vyhodnocení jednotné kritérium finanční, pořád je třeba dbát na průběžnou kontrolu fyzikálního významu výsledků, jenž k němu vedou. Pokud například vyjde pro rodinný dům jako optimální osazení 120m² solárních panelů na jižní střechu s plochou 50m², je na zpracovateli výpočtu, aby doplnil vhodnou penalizační funkci, aby tyto výsledky vyloučil a mohl tak dojít k řešení optimálnímu a zároveň reálnému.

Je také na zpracovateli, aby vážil, které parametry jsou vhodné pro optimalizaci a které ne. Lze například optimalizovat prosklenou plochu v jižní fasádě, pokud u daného objektu není nevhodně zastíněná, nemá ale určitě smysl volit optimalizaci okenních ploch celkově, protože severní stěna by vyšla vždy s minimální dovolenou okenní plochou a její výpočet by zbytečně zatěžoval model.

Se znalostí konkrétního objektu se řada optimalizačních úloh redukuje na variantní zpracování, protože pokud je pro objekt přípustné osadit panely 0-12 m², tak je jednodušší během pěti minut zpracovat pět vzorových výpočtů a z nich vybrat vhodné varianty pro ekonomické srovnání, než definovat optimalizační úlohu jako funkci k vyhodnocení s celkovým modelem.

Geometrická reprezentace modelu

Úlohy optimálního návrhu geometrie zařízení je možné klasifikovat do různých tříd. V pořadí podle výpočetní složitosti jsou to následující typy úloh:

- rozměrové optimalizace (stanovení specifických rozměrů jako např. tloušťka materiálu, poloměr kruhové součásti atd.), v našem případě například tloušťka izolace, plocha kolektorů, objem nádrže – změna jednoho parametru bez vazby na parametry ostatní
- tvarová optimalizace (stanovení proměnných umožňujících změnu tvaru, tj. pohyb hranice) – změna vzájemně svázaných parametrů (vzájemný úhel receptoru a difuzoru v kombinovaném fotovoltaicko-termickém článku)
- topologická optimalizace (pracuje současně s rozměrovou a tvarovou optimalizací)

Podle složitosti zvoleného modelu pak volím vhodný způsob vyhodnocení.

Analýza modelu

Stvořený model je nutno podrobit analýze a v případě a zejména ošetřit povolený rozsah proměnných. Typickým způsobem ošetření rozsahu proměnných v optimalizačních úlohách jsou penalizační funkce. S ohledem na vhodný průběh a spojitost úlohy i v první derivaci je vhodnou penalizační funkcí

$$PEN = A * (1 + Tanh(k * x + B)) \quad (1.13)$$

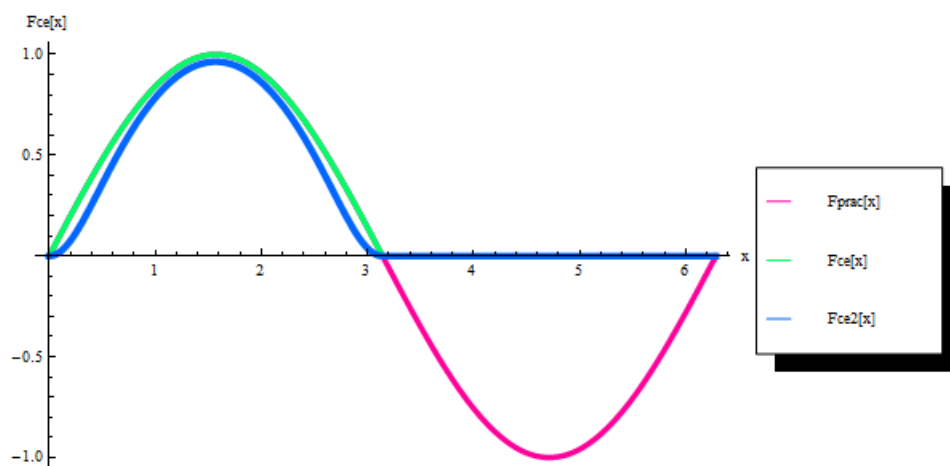
Míru penalizace A, a strmost k lze zvolit na základě experimentu, pokud ale není optimalizovaná funkce velmi strmá stačí i malé hodnoty. Nevýhodou této metody je, že v bodě krajní podmínky B je funkční hodnota již ovlivněna. Toto lze eliminovat větší strmostí a posunem penalizační funkce.

Kromě klasických penalizačních funkcí využívám v algorytmech funkce nulovací, pro případy, kdy matematická reprezentace voleného děje generuje i záporné výsledky, které ale neodpovídají fyzikální realitě. Tvar této funkce volím většinou,

$$Fce(x) = 0,5 * (|Fprac(x)| + Fprac(x)) \quad (1.14)$$

či obdobně s funkcí Sign. V případě problémů v numerickém řešení s nespojitostí této funkce lze upravit také na řešení pomocí Tanh

$$Fce2(x) = Fprac(x) * Tanh(k * (|Fprac(x)| + Fprac(x))) \quad (1.15)$$

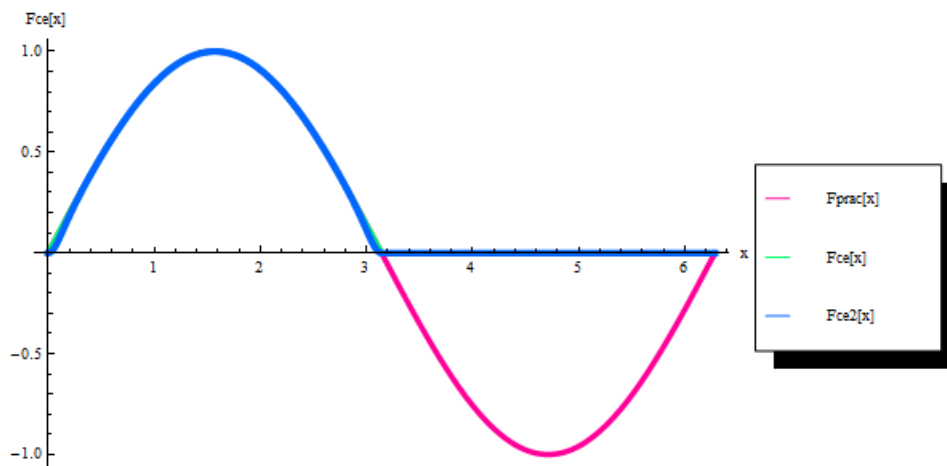


Obr.5

V grafu na ukázkou je znázorněn efekt na funkci Sin (x).

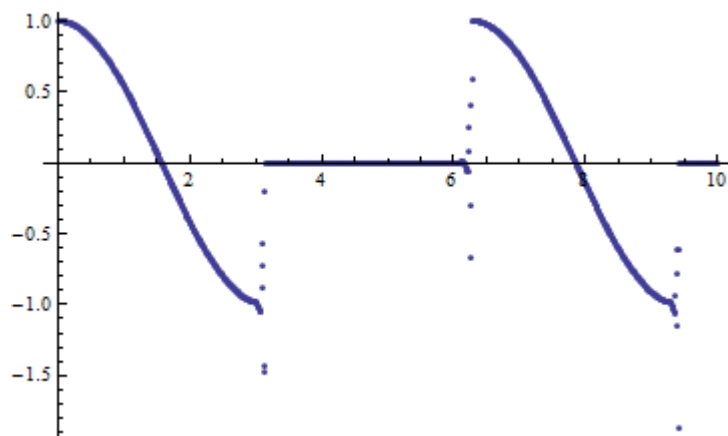
Řešení Fce(x) přesně kopíruje průběh pracovní funkce a vrací přesnou nulu v úseku, kde je pracovní funkce záporná.

Řešení Fce2(x) vrací funkční hodnotu ovlivněnou, zde aby bylo ovlivnění názorné je zvolena konstanta k=1, což je pro reálné využití většinou málo, ale jako ilustrativní příklad se hodí. Pro srovnání v dalším grafu je využita konstanta k=4 a rozdíl mezi Fce(x) a Fce2(x) již téměř zaniká.



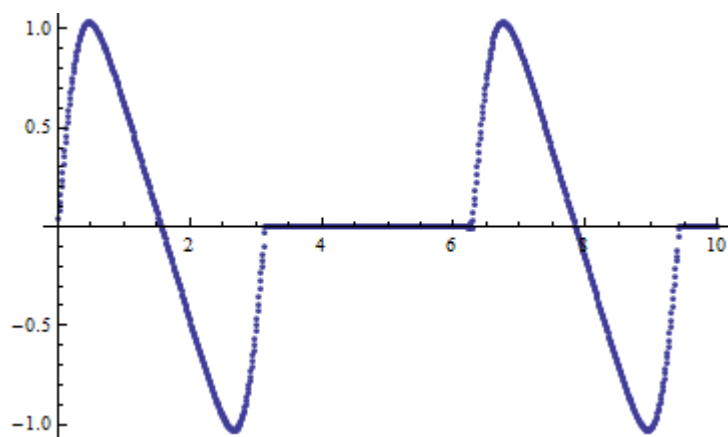
Obr.6

Důvod proč se v modelech někdy uplatní spíše přístup využívající Tanh je zřejmý, když nechám numericky vyhodnotit první derivaci uvedených funkcí. Takto se jeví derivace Fce(x):



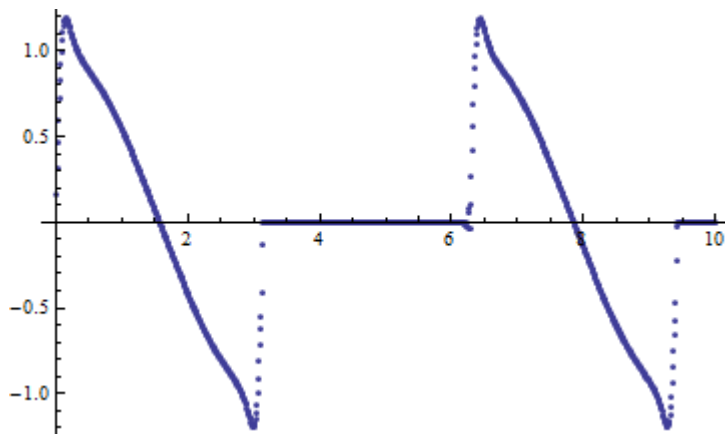
Obr.7

A takto se jeví derivace Fce2(x) s k=1:



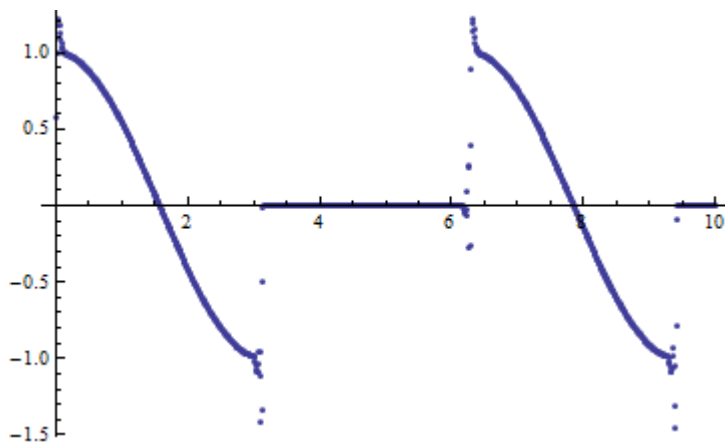
Obr.8

A takto se jeví derivace $F_{ce2}(x)$ s $k=4$:



Obr.9

A takto se jeví derivace $F_{ce2}(x)$ s $k=15$:



Obr.10

Přičemž spojitá derivace je pro řadu numerických metod zárukou rychlejšího a přesnějšího vyhodnocení. Jak je vidět, vzhledem k triviálnímu zvolenému příkladu, kdy analyticky vychází správná první derivace $F_{ce}(x) = \cos(x)$ pro interval $(0, \pi)$ a nula pro interval $(\pi, 2\pi)$, nejpřesněji drží tvar funkce derivace metody bez Tanh, ale zároveň dochází k největší nespojitosti a numerickým chybám v řešení kolem bodů nespojitosti. Řešení s Tanh vykazuje vždy spojitou derivaci a tedy numerické řešení nikdy nevyprodukuje body s tak velkou chybou, ovšem za cenu jisté odchylky, přičemž platí, že čím vyšší je koeficient k , tím přesnější je průběh, ale tím vyšší je překmit první derivace v bodě, kde by byla v původním řešení nespojitost.

3.3.8. Vytvoření matematického modelu

Pro vytvoření matematického modelu je potřeba analyzovat a matematicky popsat všechny důležité fyzikální aspekty celého systému. V jednotlivých krocích je postup následující:

- určení fyzikálních veličin, které systém popisují
- matematický popis fyzikálních zákonů dějů, které v systému probíhají (řídící modelové rovnice)

- určení podmínek řešení (obvykle počáteční a okrajové podmínky pro řešení diferenciálních rovnic)
- na základě analýzy sestaveného modelu přijmout zjednodušující předpoklady a potřebné matematické úpravy (prioritizace předpokladů)
- rozdělit složitý systém na jednodušší subsystémy a zpracovat je odděleně, ovšem se zřetelem na jejich vzájemné souvislosti,
- zavést neexistující formy, např. ideální plyn, ideální kapalina,
- předpokládat nezávislost látkových vlastností na teplotě,
- předpokládat, že materiál je homogenní a izotropní,
- u systémů, kde probíhají současně pomalé a rychlé děje, předpokládat, že rychlý děj již dosáhl rovnovážného stavu,
- zanedbat podružné ztráty a zisky,
- linearizace závislostí,
- zjednodušení geometrických proporcí a zvolení vhodné souřadnicové soustavy,
- výběr metod řešení modelových rovnic s počátečními a okrajovými podmínkami

Výsledkem postupu jsou matematické modely, které se liší svým účelem a přesností. Žádný řešitelný matematický model nepopisuje zcela přesně skutečnost, ale při správných zjednodušujících předpokladech je přesnost dostačující. Při pohledu na principy aplikací elektrotepelné techniky [13], uvedených v kapitole 3.3, je zřejmé, že v uvedených případech musíme uvažovat současný přenos tepla vedením, konvekcí a zářením.

Matematicky tak lze uvažovat řešený problém jako sdruženou úlohou popsanou řídicími diferenciálními a integro-diferenciálními rovnicemi a vhodnými okrajovými a počátečními podmínkami.

Současným řešením těchto rovnic jsou generovány výsledky pro tepelný systém, jako např. Určení průběhů teplot, tepelných toků příkonů zařízení, atd.

Ve většině případů není žádoucí řešit obecné výsledky, ale aplikací na konkrétní vstupní data získat konkrétní výstupy pro danou oblast.

U modelů popsaných diferenciálními rovnicemi je třeba popis doplnit příslušným počtem okrajových a počátečních podmínek. Pro každou nezávisle proměnnou tolik vzájemně nezávislých podmínek, jaký je nejvyšší v rovnicích se vyskytující řád derivace podle této proměnné. Formulace počátečních a okrajových podmínek je nedílnou součástí vytváření matematického modelu. Některé podmínky vyplývají zcela jednoduše ze zadání úlohy (např. na počátku je teplota ve všech bodech stejná a rovná určité hodnotě), jiné je třeba odvodit stejnými postupy jako matematický model (např. na základě bilance).

3.3.9. Řídící rovnice matematického modelu

Každý zpracovaný model (viz jednotlivé kapitoly) má svou konkrétní řídicí rovnici, obecně je většina rovnic odvozena z Fourier–Kirchhoffovy rovnice (FKR) [13].

$$\rho * c_p * \frac{\partial T(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \rho * c_p * \mathbf{v} * \nabla T(\mathbf{r}, t) = \nabla * (\lambda_c \nabla T(\mathbf{r}, t)) - \nabla * \mathbf{q}_r(\mathbf{r}, T) + \sum Q_v \quad (1.16)$$

Kde první a druhý člen vyjadřují změnu vnitřní energie, třetí rychlost konduktivního přívodu tepla, čtvrtý měrný výkon tepelného záření a poslední suma pokrývá objemové vnitřní zdroje tepelné energie, jako například chemické reakce. Tato rovnice nebývá využívána v plném formátu, pro většinu aplikací jsou některé členy nulové.

3.3.10. Počáteční a okrajové podmínky

Počáteční podmínka

Počáteční podmínka je jednoduchá, volím vždy nějaký jednoduchý stav, například

$$T(\mathbf{x}, 0) = 0, \quad (1.17)$$

nebo stav odpovídající ustálenému stavu.

Okrajová podmínka I. druhu (Dirichletova)

Například je zadána teplota povrchu tělesa jako funkce času.

$$T(\mathbf{x}, t) = F_{ce}(t) \quad (1.18)$$

Příkladem pro takovou aplikaci je intenzivně ohřívání či ochlazování tělesa, kdy dojde k vyrovnání teploty povrchu tělesa a bezprostředního okolí. Ideálním případem je ohřev párou či chlazení odparem vroucí vody, ale velmi se k tomuto stavu blíží i masivně zateplená budova, kdy na povrchu zateplení je teplota téměř totožná s teplotou venkovní, protože izolací postupuje tak malý tepelný tok, že na ekvivalentním tepelném odporu konvektivním nevzniká žádný úbytek teploty (viz elektrotepelná analogie).

Okrajová podmínka II. druhu (Neumannova)

Je zadána hustota tepelného toku na povrchu tělesa \mathbf{q} jako funkce času.

$$\mathbf{q}_s(t) = -\lambda_c \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.19)$$

Příkladem pro aplikaci této podmínky může být například elektrický ohřev (při daném výkonu ohřevu a ploše působení je daný tepelný tok plochou)

Okrajová podmínka III. druhu (Fourierova)

Podmínka spojitosti hustot tepelného toku na mezifázovém rozhraní proudící kapalina-povrch tělesa. Teplo převedené tělesu/z tělesa vedením je rovno teplu odvedenému či přivedenému prouděním prostředím.

$$-\lambda_c \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha * (T_a - T_s), x = 0 \quad (1.20)$$

Kde T_a je teplota v jádru proudícího prostředí, T_s teplota povrchu tělesa a α součinitel přestupu tepla.

Okrajová podmínka IV. druhu

Podmínka spojitosti hustot tepelného toku na styku dvou těles.

$$\lambda_{c1} \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_{c2} \frac{\partial T_2}{\partial x}, x = H \quad (1.21)$$

Pro tuhá tělesa a dokonalý styk pak tato podmínka přechází v podmínku spojitosti teplotního rozložení.

$$T_1 = T_2 \quad (1.22)$$

Ve zde řešených modelech je toto případ například kontaktního zateplovacího systému na zdi.

4. Tepelné ztráty objektu

4.1. Metoda konstanty budovy

Pro správné vyhodnocení energetického managementu hraje modelování ztrát objektu klíčovou roli. Nejjednodušší varianta spočívá v uvažování budovy jako prostý objekt [13], kde platí

$$P_Z = k_{budova} * (T_{budova} - T_{okoli}) \quad (1.23)$$

Kde k_{budova} je tepelná konstanta budovy (WK^{-1}).

Výhodou této metody je jednak numerická jednoduchost, ale tak to, že tuto konstantu lze poměrně jednoduše zjistit měřením, kdežto zjistit vstupy pro přesný výpočet bývá podstatně složitější.

Nevýhodou této metody je, že je zcela nevhodná pro optimalizační úlohy, kde uvažujeme změnu tepelných vlastností budovy a pro budovy s vyšší tepelnou setrvačností je i velmi nepřesná, protože její základní předpis vůbec nepočítá s tepelnými kapacitami objektu, ve změřené hodnotě se přitom tepelné kapacity projeví.

4.2. Vyhodnocení tepelných kapacit

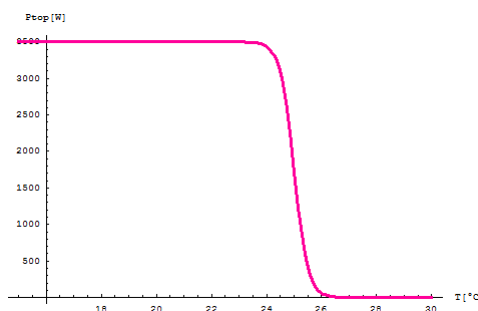
Jak je zmíněno v předchozí podkapitole, ty nejjednodušší modely nepočítají s vlivem tepelných kapacit a jelikož se v modelech vždy snažím uvažovat reálné pracovní podmínky zdrojů, musím vyhodnotit jaký vliv tepelné kapacity na chování objektu mají.

Jednoznačně dominantní tepelnou kapacitou objektu je tepelná kapacita jeho konstrukčního systému (zdí), proto vytvořím model jen pro zeď (kvádr tvořený jen zdí s dokonalou izolací podlahy a stropu) a vytvořím srovnání pro různé materiály.

Nejprve si definuji funkci topení jako:

$$P_{top} = P_{max} * 0,5 * (1 - Tanh(k * (T_V - 25))) \quad (1.24)$$

Na udržování konstantní vnitřní teploty $25^{\circ}C$, přičemž P_{max} , v případě známých ztrát volím přímo, v případě neznámých nechávám vypočítat. Výsledná regulační křivka topení pak vypadá pro $P_{max} = 3500$ a $k = 2$



Obr.11

Následně spočítám děje v systému, kde stěna je pospána

$$\rho_s * c_{p_s} * \frac{\partial T_s(x, t)}{\partial t} = \lambda_s * \frac{\partial^2 T_s(x, t)}{\partial x^2} \quad (1.25)$$

Počáteční podmínku volím $T_s(x, 0) = 0$. Okrajové podmínky jsou III. druhu ve tvarech

$$-\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = \alpha_{ext} * (T_{ext} - T_s), x = 0 \quad (1.26)$$

$$-\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = \alpha_{int} * (T_v - T_s), x = d \quad (1.27)$$

Veličiny int jsou vnitřní, ext jsou vnější, T_v je vnitřní teplota vzduchu a $T_{ext} = 10 * \text{Sin}(\frac{t}{13757})$, což simuluje denní změnu teploty na +10°C a -10°C.

Dále doplním rovnice pro vzduch, tuto část mám řešenu v Mathematice 5.2 a abych dosáhl korektního vyhodnocení není vhodné kombinovat parciální diferenciální rovnici o dvou proměnných (stěna) s jednoduchou diferenciální rovnicí jedné proměnné, proto definuji vzduch ve stejném formátu $T_v(x, t)$ i když uvažuji vzduch jako homogenní a x souřadnice pro něj nemá význam. Definuji tedy rovnici vzduchu tak, aby řešení nezáviselo na x.

$$\frac{\rho_v * c_{p_v} * \frac{\partial T_v(x, t)}{\partial t}}{t_v} = 100 * \frac{\partial^2 T_v(x, t)}{\partial x^2} + \frac{P_{top}(T_v(x, t)) - S * \alpha_v * (T_v(x, t) - T_s(x, t))}{V} \quad (1.2)$$

kde právě člen $100 * \frac{\partial^2 T_v(x, t)}{\partial x^2}$ zaručuje, že řešení bude na x nezávislé.

Počáteční podmínku volím

$$T_v(x, 0) = 0 \quad (1.29)$$

a okrajové podmínky

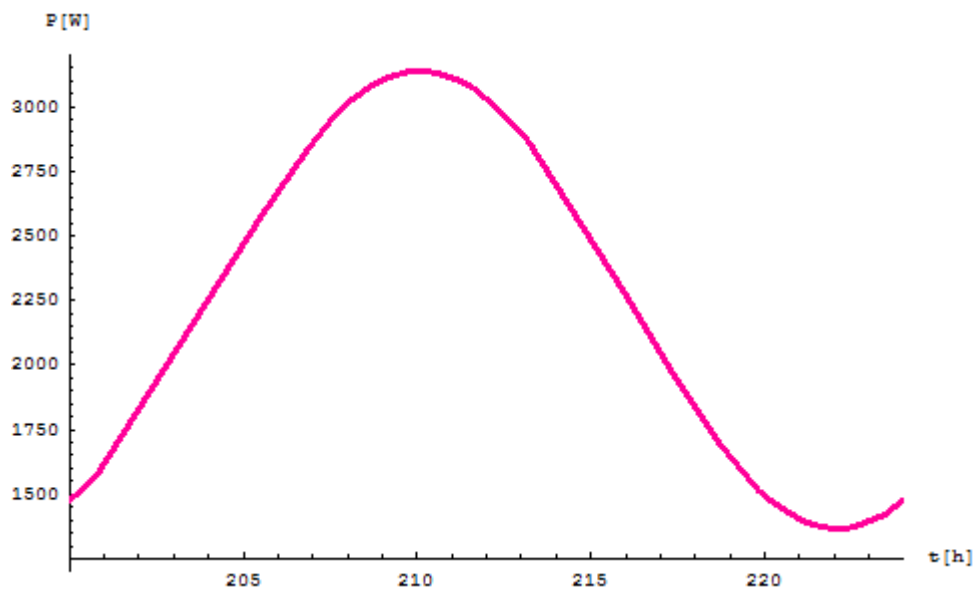
$$\frac{\partial T_v}{\partial x} = 0, x = 0 \text{ a } x = d. \quad (1.30)$$

Takto je systém připraven k vyhodnocení, přičemž pro porovnání vlivu kapacit vybírám úsek jednoho dne po odeznění přechodového děje.

Abych výsledné srovnání vypovídalo něco o teplotních kapacitách neměním tepelné vodivosti, aby nebyly odlišné ztráty. Parametry objektu půdorys 4x4m, výška 3m, tloušťka zdi 0.6m, $\lambda_s = 0,8$, $\alpha_{ext} = 15$, $\alpha_{int} = 3$, konstanta výměny vzduchu = 6 hodin a $\rho_s * c_{p_s}$ je proměnná veličina jednotlivých variant

Varianta 1: $\rho_s * c_{p_s} = 1$, vyhodnocení bez tepelné kapacity

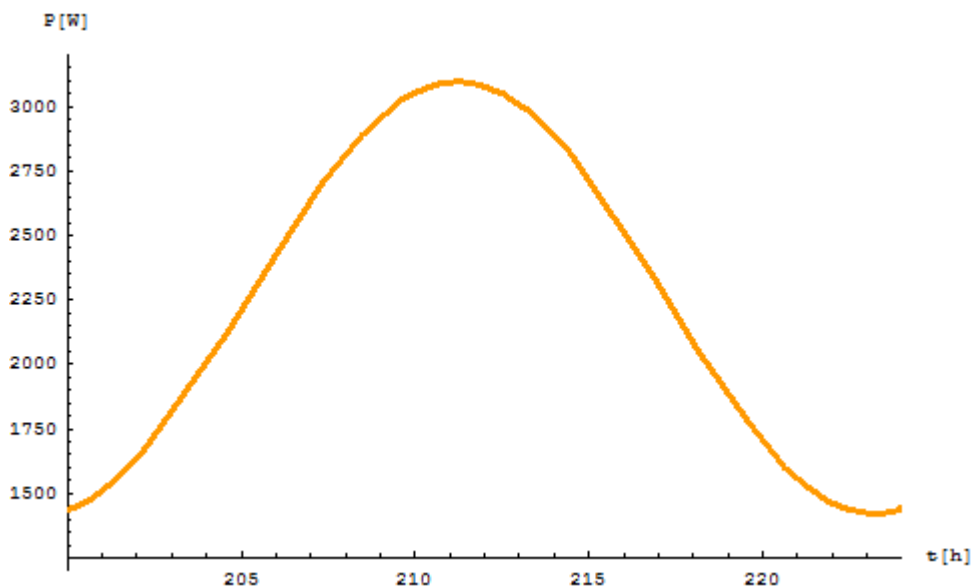
Obr.12



Z grafu lze odečíst, že pro tuto variantu topný výkon kolísá v rozmezí 1360-3140W.

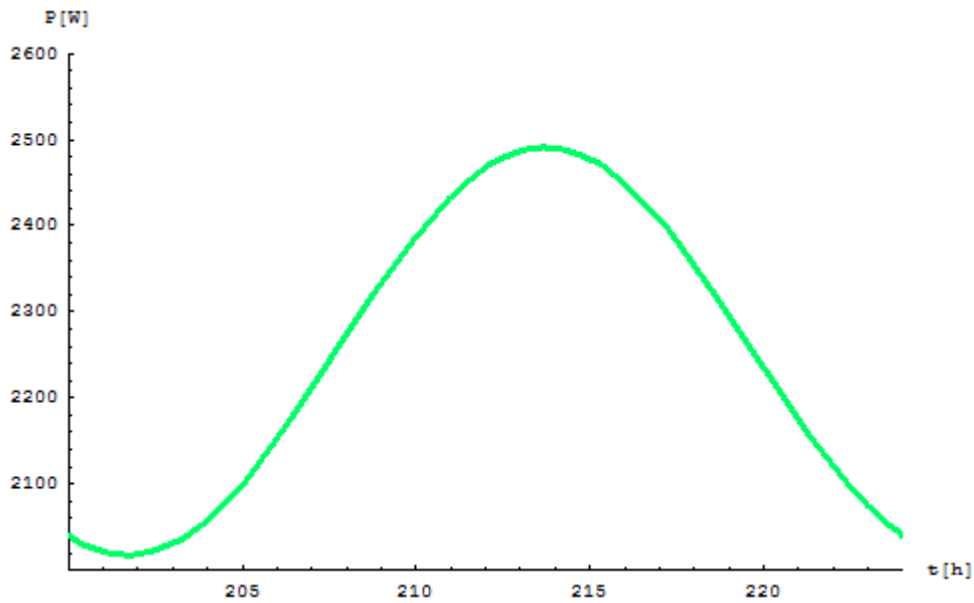
Varianta 2A: $\rho_s * c_{p_s} = 50\,000$, koeficient odpovídající dřevostavbě, kde většinu zdi tvoří izolační materiál.

Obr.13



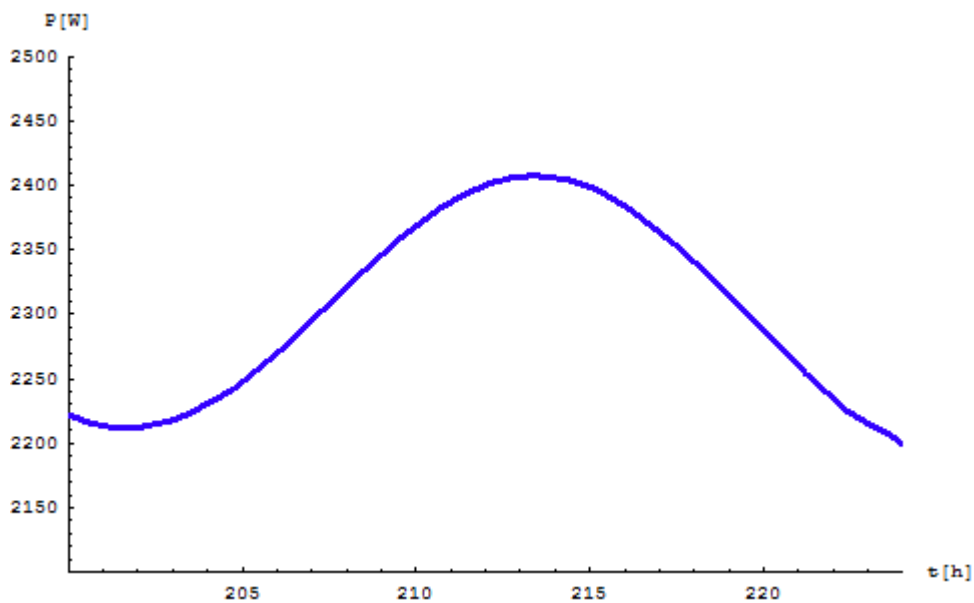
Z grafu lze odečíst, že topný výkon kolísá v neznatelně menším rozmezí, cca 1420-3075W, je ale znatelný časový posun odběru, vyvolaný nenulovou kapacitou stavby.

Varianta 3A: $\rho_s * c_{p_s} = 660\,000$, koeficient odpovídající lehké zděné stavbě (Porotherm, Ytong).



Na této variantě je znatelný další posun ve zmenšení rozkmitu na cca 2010-2500W a další posun odběru vlivem kapacit stavby.

Varianta 4A: $\rho_s * c_{p_s} = 2\,500\,000$, koeficient odpovídající těžké stavbě (beton).

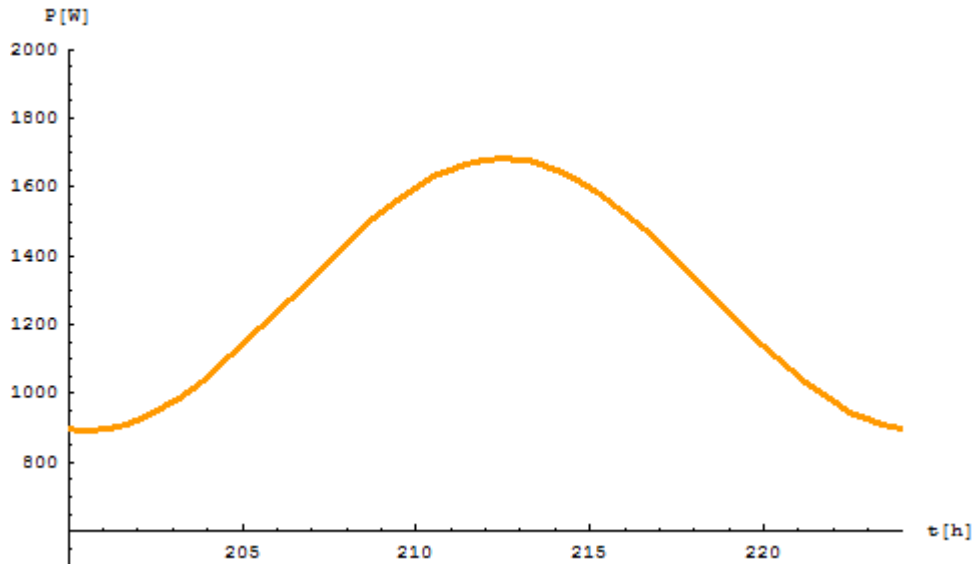


V této variantě dochází ke kolísání v rozmezí 2200 – 2400W, tedy vliv tepelných kapacit je zde jednoznačně dominantní. V tomto případě ještě lehce doznívá přechodový děj nabíjení tepelných kapacit.

Co se ale stane, když uvážím vnější stěnu izolovanou? Pro jednoduchost je namodelováno přidáním tepelného odporu 30 cm polystyrenu do koeficientu α_{ext} , který je teď roven 1.

Varianta 2B: $\rho_s * c_{p_s} = 50\,000$, koeficient odpovídající dřevostavbě, kde většinu zdí tvoří izolační materiál.

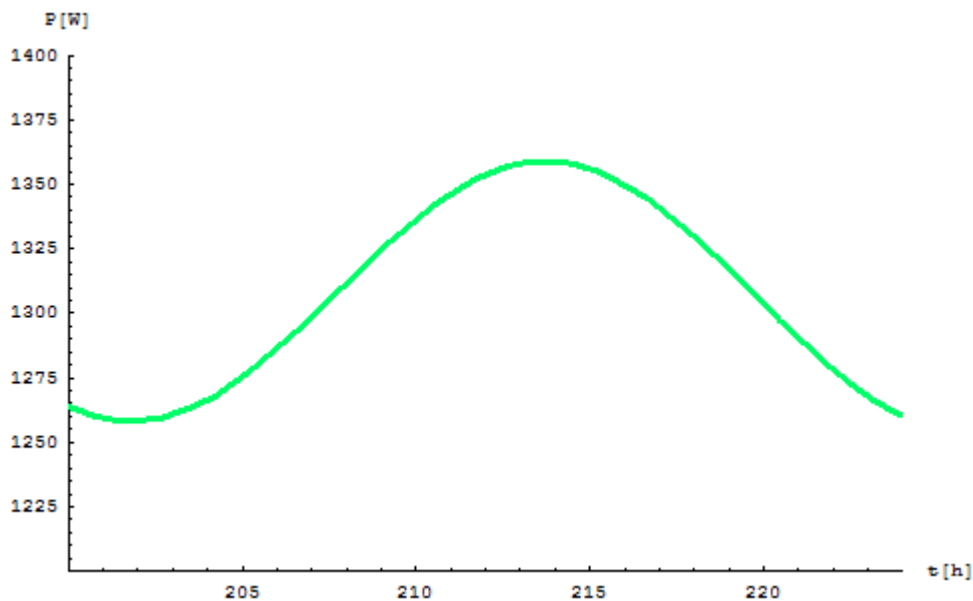
Obr.16



Pro tuto variantu není navržené zjednodušení optimální, ale hlavní je, že rozpětí výkonů topení je stále 900-1650W, došlo tedy ke snížení ztrát, ale stavba kolísá pořád stejně.

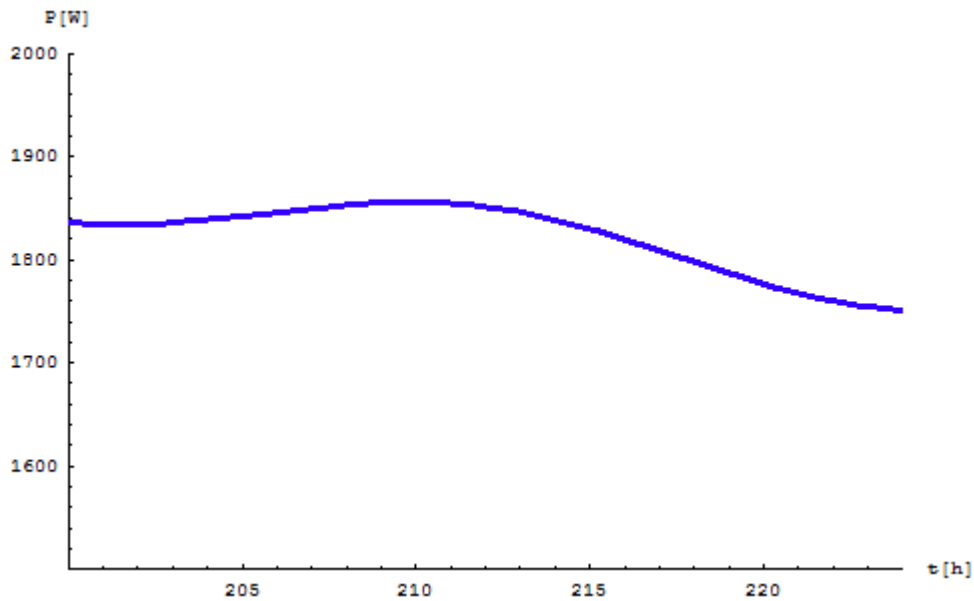
Varianta 3B: $\rho_s * c_{p_s} = 660\,000$, koeficient odpovídající lehké zděné stavbě (Porotherm, Ytong).

Obr.17



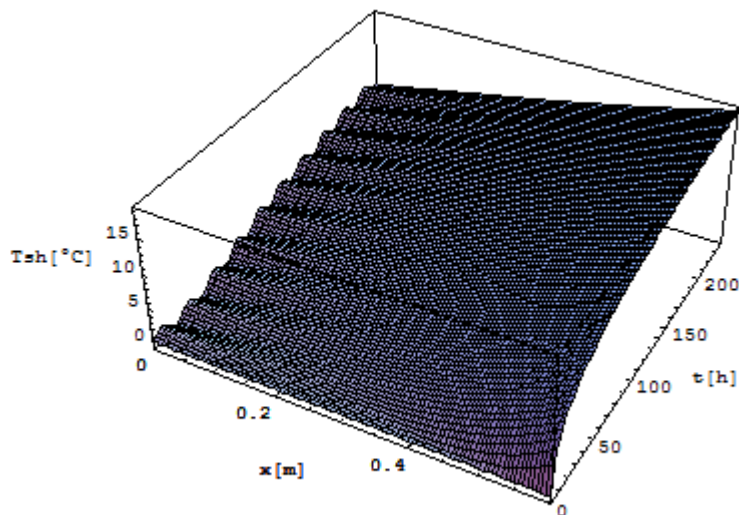
Zde výkon kolísá v rozmezí 1260 – 1360W, tedy značně méně, než u nezateplené varianty i když uvážíme poměrné snížení příkonů.

Varianta 4B: $\rho_s * c_{ps} = 2\,500\,000$, koeficient odpovídající těžké stavbě (beton).



Obr.18

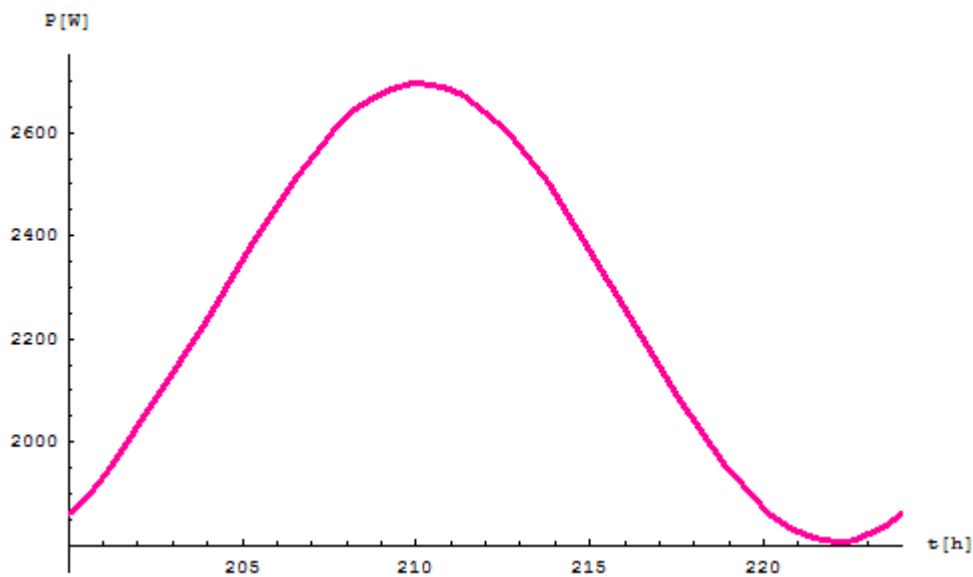
Oproti tomu přidání izolace na těžkou zeď jednak snížilo oscilaci, ale také prodloužilo dobu přechodového děje, který v této variantě i po 8 dnech stále znatelně probíhá a vliv tepelných kapacit se dále prohloubil. Pro tento případ zde vložím i 3D graf, protože v tomto případě lze optimálně pozorovat průběh přechodového děje, kdy zcela zřetelně dochází stále ještě ke zvyšování teplot ve stěně i po deseti dnech.



Obr.19

Tato varianta velice dobře ilustruje chování starých zateplených objektů, kde se snadno setkáme s tím, že tepelná setrvačnost se počítá v týdnech až měsících, proto také ale mohou mít v letních měsících problém s kondenzací vody, protože teplota zdiva může být i nižší, než je v letním období rosný bod, uživatelé se ale zároveň nesnaží o rychlé vyhřátí objektu, protože by přišli o „příjemný letní chládek“, nejedná se přitom jen o hrady a zámky, ale celá řada objektů typu různých měšťanských domů, radnic a podobně je stavěna masivně a z těžkých materiálů. Zním z praxe i případ domu z osmdesátých let dvacátého století s masivním, převážně betonovým nosným zdivem, který byl zateplen a vykazuje tyto tendence.

Varianta 1C: $\rho_s * c_{ps} = 1$, vyhodnocení bez tepelné kapacity, kolísání vnější teploty sníženo na +5/-5°C



Obr.20

V této variantě dochází ke kolísání výkonu 1750-2700W.

Další 3D grafy přechodového děje a rozložení teploty ve stěně jsou v příloze.

Co vyplývá z tohoto vyhodnocení? Předně to, že pro objekty typu dřevostaveb, kde nejsou větší tepelné kapacity, které by byly spojeny s venkovní teplotou lze bez větší ztráty přesnosti využít zjednodušený model, který neuvažuje tepelné kapacity.

Pro objekty, kde jsou použity relativně lehké zdící materiály je odchylka větší a pokud by byl využit jednoduchý model, který je zanedbává byl by výsledek v případě větší nelinearity zdroje už poměrně nepřesný. Pořád lze ale využít jednoduchý model, pokud adekvátně upravíme teplotní křivku vnějších teplot, jako rozumná aproximace těchto případů se jeví omezit denní výkyvy teploty na polovinu, což lze v Mathematice provést jednoduchou úpravou zdrojové funkce (průměr funkční hodnoty a 24hodinového průměru).

V případě těžkých staveb, případně výrazněji izolovaných lehčích staveb je při využití zjednodušeného modelu opět cestou k přesnější aproximaci úprava zdrojové funkce teploty a to nejlépe použít pro každý den jeho průměrnou teplotu, jelikož tepelné kapacity mají už natolik vyrovnávací efekt, že se kolísání teplot během dne příliš neprojeví. Toto platí zejména

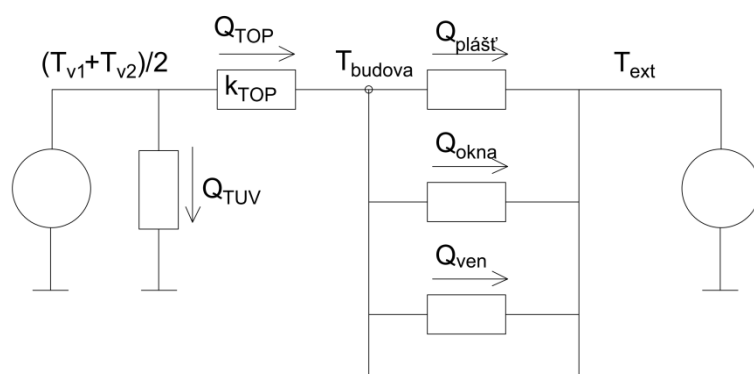
pro objekty které jsou navíc vybaveny systémem rekuperace, který dále snižuje vliv venkovní teploty na aktuální potřebu výkonu topné soustavy.

Toto se týká samotné budovy, je potřeba ale mít na paměti, že pro tepelné čerpadlo, solární kolektor a další externí aplikace je nutné vzít funkci venkovní teploty originální, bez úprav.

Mimo jiné z těchto výsledků plyne ještě jeden zajímavý závěr do praxe a to, že lehké sádkartonové příčky se nemusí vyplatit, protože u lehkých staveb znamená zvýšení vnitřní tepelné kapacity menší nároky na špičkový výkon topení, což umožňuje držet otopnou soustavu na nižších teplotách i při extrémních výkyvech venkovních teplot.

4.3. Metoda tepelných toků

Jelikož různé typy tepelných ztrát se vzájemně neovlivňují můžeme popsat ztráty objektu na základě následujícího diagramu:



Obr.21

Přičemž platí, že počet paralelních toků z budovy je v závislosti na rozčlenění a podrobnosti řešení různý.

4.3.1. Teplá užitková voda

Část tepla je spotřebována k přípravě teplé užitkové vody, zde závisí na konkrétním systému, zda je třeba uvažovat soudobost s odběrem otopné soustavy (z hlediska dimenzování zdroje). Pokud nemá systém TUV a topení společnou akumulaci nádrž, tak k soudobému odběru zpravidla nedochází a ohřev zásobníku TUV probíhá v jiných okamžicích než zásobníku topení.

Ohřev TUV v modelech uvažují jako stálý energetický odběr, byť to neodpovídá zřejmě fyzikální realitě, dobře to zohledňuje aspekt, že v reálném provozu, kde má ohřev TUV nadřazenou prioritu (uživatel nebude ve sprše čekat, až se vytopí obývací pokoj) vznikají drobná maxima vzniklá oddálením optimálního času sepnutí ohřevu pro systém vytápění.

Ohřev TUV pak uvažují [13]

$$Q_{TUV} = \frac{82 * os * c_{pw} * (55 - 7)}{3600 * 24} \quad (1.31)$$

Kde os je počet osob, c_{pw} tepelná kapacita vody, konstanta 82 je uvažování denní spotřeba teplé vody na osobu, uvažovaný je ohřev ze 7°C na 55°C.

4.3.2. Otopná soustava

V jednoduchém modelu můžeme uvažovat otopnou soustavu jen jako tepelný odpor přenosu do vzduchu,

$$Q_{top} = k_{top} \left(\frac{T_{i1} + T_{o1}}{2} - T_{budova} \right) \quad (1.32)$$

Kde T_{i1} je teplota vody na vstupu do otopné soustavy, a T_{o1} teplota vody na výstupu, k_{top} je konstanta topení (WK^{-1}) a T_{budova} je vnitřní teplota.

V přesnějších modelech můžeme uvažovat otopnou soustavu jako výměník voda/vzduch,

$$Q_{top} = k_{top} * \frac{T_{i1} - T_{budova} - (T_{o1} - T_{budova})}{\ln \frac{T_{i1} - T_{budova}}{T_{o1} - T_{budova}}} \quad (1.33)$$

význam prvků je stejný.

Je-li k dispozici projekt topení dané budovy, pak bývá zadán teplotní spád a topný výkon, můžeme tedy konstantu topení odečíst. Lze ji také v praxi změřit monitorováním ostatních hodnot v rovnici. V praxi bývá tato hodnota přesnější, pokud je změřena, protože málo soustav je natolik věrných ideálním hodnotám v projektu, aby byly plně odpovídající.

Vlivy na k_{top} :

- Základním parametrem pro určení k_{top} bývá plocha radiátorů či smyček podlahového topení.
- V případě podlahového topení bývá nejčastějším vlivem různá tepelná vodivost podlah a nepřesné dodržení předepsaného krytí a materiálů. Pro chování podlahového topení je samozřejmě zásadní jestli je kryto 3cm vrstvou anhydritu a dlažbou na 4mm flexilepidla, nebo 4cm betonové stěrky a plovoucí podlahou. Takovéto změny proti projektu jsou přitom velmi běžné.
- Obecně pro podlahové vytápění i pro radiátorové soustavy je důležité správné vyvážení všech větví, zejména pak to, aby nějaká větev nevykazovala charakteristiku hydraulického zkratu – tedy větev s tak malým odporem, že se většina oběhu uzavírá přes ni, a soustava jako celek pak pracuje s nižší konstantou k_{top} .
- Případně naopak jsou-li některé větve příliš zaškrnceny dochází ke stejnému efektu, byť ne tak dramatickému.
- Pro všechny otopné soustavy pak je důležité % zakrytí otopných ploch. Ať už jde o zakrytí radiátorů, nebo podlahové plochy, projekt může počítat vždy jen s jedním číslem, kdežto uživatelé objektů nakonec využívají objekt vždy jinak.

Zde poznámka pro projektanty – u teplovodního podlahového topení má smysl se vyhnout ploše, kde bude stát lednička a krb. První zmíněné abychom nenavyšovali náklady

na provoz, druhé protože jde často o velmi těžkou konstrukci a mohlo by časem dojít k poškození trubek. Jinak je nejlepší varianta navrhnout topení zcela celoplošně. Podlahové topení je prvek, který má sloužit velmi dlouhou dobu a je rozhodně lepší, když je pod komodou 35°C, než když na jinak příjemně vlněné podlaze je studený pruh, protože první uživatel plánoval mít tam skříň... Na rozdíl od elektrického podlahového topení nehrozí žádné lokální přehřátí.

Poznámka pro uživatele – podlahové topení v nízkoenergetických domech nehřeje. Pokud znáte podlahové topení ze starých budov, kde musí pouštět 40°C vodu, aby vůbec nějak objekt vytopili, tak v případě nízkoenergetické stavby je klidně reálné pro vnitřní teplotu 23°C mít průměrnou teplotu podlahy 26°C, zároveň při takto ohřáté podlaze 23°C dává subjektivní dojem (srovnatelnou tepelnou pohodu) jako 25-26°C při radiátorovém vytápění. Takže nepočítejte s „teplou dlažbou“ ale plánujte podlahu jako by tam podlahové topení nebylo. Má smysl se vyhnout jen extra izolačním kobercům, pokud by měly být v nějaké místnosti celoplošně.

4.3.3. Ztráty (tepelný tok) stěnou

V předchozí podkapitole jsem tuto problematiku již načal z hlediska pohledu na kapacity stěn. V souladu se závěry, které z vyhodnocení kapacit plynuly budu preferovat ve většině modelů zjednodušený přístup, tedy že vliv kapacit objektu budu podle povahy objektu promítat do funkce venkovní teploty a rovnice popisující objekt budu díky tomu využívat ve formě bez vlivu tepelných kapacit objektu.

Nejprve uvnitř objektu dochází k přenosu tepla ze vzduchu do stěny

$$Q = S * \alpha_{in} * (T_{budova} - T_{s1}) \quad (1.34)$$

Kde T_{s1} je teplota vnitřního povrchu stěny (°C), S plocha stěny (m^2), α_{in} je součinitel přestupu tepla pro vnitřní prostor ($Wm^{-2}K^{-1}$).

Návazně dochází k přenosu tepla vedením ve stěně,

$$Q = S * \frac{\lambda_s}{d_s} * (T_{s1} - T_{s2}) \quad (1.35)$$

A stejně tak dochází k přenosu tepla vedením v izolaci

$$Q = S * \frac{\lambda_{iz}}{d_{iz}} * (T_{s2} - T_{s3}) \quad (1.36)$$

Kde λ_s je tepelná vodivost zdiva ($Wm^{-1}K^{-1}$) a λ_{iz} tepelná vodivost izolace, T_{s2} je teplota v ploše styku zdiva a izolace, T_{s3} je pak teplota vnějšího povrchu stavby.

Dále dochází k přenosu tepla ze stěny do okolního vzduchu (princip totožný s vnitřním přenosem)

$$Q = S * \alpha_{ext} * (T_{s3} - T_{ext}) \quad (1.37)$$

Zde dochází ještě k jednomu principu přenosu tepla a to zářením

$$Q = S * \sigma * \varepsilon * (T_{s3}^4 - T_{ekv}^4) \quad (1.38)$$

Kde σ je Stefan-Boltzmanova konstanta $5,669 \cdot 10^{-8}$ ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$), ε emisivita objektu (-) a T_{ekv} je ekvivalentní vyzařovací teplota okolí.

Poslední 2 tepelné toky fungují paralelně klíčovou otázkou pro vyhodnocení je, zda můžeme přenos tepla zářením zanedbat či ne. Odpověď závisí na počítané aplikaci, ale pro 99% vyhodnocovaných objektů můžeme, protože můžeme bez větší ztráty přesnosti zanedbat tepelný odpor přestupu tepla konvekcí. Tepelný odpor přestupu tepla konvekcí na vnější stěně tvoří 0,5-2% celkového tepelného odporu zateplené stěny a jestli bude ze stejného bodu vyvedena ještě další paralelní cesta nebude mít na výsledek celkového toku stěnou vliv. Tento vliv začne být znatelný až u objektů s poměrně vysoce vodivými stěnami (např. 20cm betonu bez izolace – vliv vnějšího přestupu konvekcí 15%).

Něco jiného je příjem energie slunečního svitu, ten lze ale vyhodnotit mnohem lépe a přesněji na základě konkrétních výpočtů oslunění.

Na základě těchto závěrů lze zapsat celkový tepelný tok stěnou jako

$$Q_{steny} = S_{steny} * \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{in}} + \frac{d_s}{\lambda_s} + \frac{d_{iz}}{\lambda_{iz}} + \frac{1}{\alpha_{ext}}} * (T_{budova} - T_{ext}) \quad (1.39)$$

kde jednotlivé členy ve jmenovateli odpovídají tepelným odporům jednotlivých vrstev, jimiž tepelný tok prochází.

Tato reprezentace se obzvláště hodí pro modely, kde je jako jeden z parametrů optimalizace uvažována vrstva zateplení objektu.

4.3.4. Ztráty (tepelný tok) stropem

Zde se uplatňují totožné principy jako při prostupu stěnou, je ale vždy zásadní, jaké je složení stropu.

Vnitřní prostup tepla konvekcí lze vyhodnotit úplně stejně jako v případě stěny. Mohou se vyskytnout jisté odchylky, ale žádná není zásadního rázu.

Prostup tepla konvektivní se většinou chová jinak, není-li hodnocen zrovna betonový strop a plochou střechu, tak je běžným uspořádáním, že máme vrstvu plošné izolace a potom vrstvu izolace mezi trámy (v případě pochozí nezateplené půdy někdy naopak). Plošná vrstva izolace se chová stejně jako izolace stěny.

Trámy však ve vrstvě mezitrámové izolace vytváří tepelné mosty. Při hustotě trámů co 1m a šířce trámu 10cm vychází ekvivalentní zvýšení tepelné vodivosti +40% (uvažována izolace $\lambda_{iz} = 0,04$ a $\lambda_{tr} = 0,2$). Většinou ale není dostatek prostoru pro aplikaci tepelné izolace pouze plošně a i když je mezi trámy účinnost izolace snížena, pořád je její aplikace většinou optimálním krokem z hlediska nákladovosti, pokud uvažujeme, že jinak bychom museli o tloušťku trámů zvedat střechu.

$$Q_{strop} = S_{strop} * \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{in}} + \frac{d_{iz1}}{\lambda_{iz1}} + \frac{d_{iz2}}{\lambda_{iz2}} + \frac{1}{\alpha_{ext}}} * (T_{budova} - T_{ext}) \quad (1.40)$$

Každopádně ze zmíněných skutečností vychází několik závěrů a to zejména, že určující pro tepelné vlastnosti je celoplošná izolace a každý návrh by měl s touto izolací počítat. Izolace jen mezi trámy je příliš oslabená na to, aby poskytla požadovaný tepelný odpor sama o sobě. Ve výpočtech musíme uvážit činitel redukující vlastnosti této vrstvy (nebo počítat přesný tepelný odpor dané konfigurace). Má-li být nějaký parametr předmětem optimalizace tloušťky, měla by to být celoplošná izolace, která má vliv na využití prostoru a zásadnější nárůst může mít vliv na případné zvýšení konstrukce objektu (s ohledem na to, že podkroví bývá projektováno na minimální hygienickou světlou výšku).

4.3.5. Ztráty (tepelný tok) podlahou

Pro ztráty podlahou platí drobně odlišná úvaha. Pokud máme objekt vytápěný radiátorovým systémem, dochází k prostupu obdobně jako stěnou, pouze vnější sdílení je celoplošným stykem se zeminou, kterou v tomto případě uvažujeme jako objekt stále teploty a nekonečné tepelné kapacity. (pozn.: tato aproximace je platná pro klasicky zakládané budovy, budovy stavěná na patky se bude chovat jinak)

$$Q_{podl} = S_{podl} * \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{in}} + \frac{d_{m1}}{\lambda_{m1}} + \frac{d_{m2}}{\lambda_{m2}} + \dots} * (T_{budova} - T_{zem}) \quad (1.41)$$

Přičemž členy $\frac{d_{m1}}{\lambda_{m1}}$ a vyšší odpovídají jednotlivým vrstvám podlahy. Bavíme-li se o moderním objektu bude jedna z vrstev EPS izolace, která bude mít jednoznačně dominantní ráz a opět platí, že pokud se má uvažovat optimalizace zateplení, lze uvažovat jedinečně tuto vrstvu, zbylé vrstvy jsou řádově tepelně vodivější. Výjimkou z tohoto pravidla je tzv. Lehký beton, který v sobě obsahuje polystyrenový recyklát a jeho tepelný odpor není zanedbatelný, přesto jeho tloušťka bývá dána konstrukčně a hlavní zateplovací funkci tvoří vložená izolace.

V případě, že řešíme systém podlahového vytápění dochází k toku z podlahového topení do zeminy, tedy

$$Q_{podl} = S_{podl} * \frac{1}{\frac{d_{m2}}{\lambda_{m2}} + \frac{d_{m3}}{\lambda_{m3}} + \dots} * \left(\frac{T_{wh} + T_{wd}}{2} - T_{zem} \right) \quad (1.42)$$

Symbolicky jsem číslování vrstev začal od indexu 2, aby bylo zřejmé, že minimálně jedna vrstva skladby podlahy tímto z tepelného odporu odpadá a taky řešíme tepelný tok daný tepelným spádem vody v podlahovém topení oproti zemní teplotě. Při stejné skladbě bude tedy tepelný tok podlahou v tomto případě vyšší (vyšší teplota, menší tepelný odpor), proto pro systémy podlahového topení je třeba dbát na izolaci o to více. Ze stejných důvodů (teplejší podlaha) se v systému s podlahovým topením více uplatní tepelné mosty při špatném konstrukčním řešení dveří či francouzských oken.

4.3.6. Ztráty (tepelný tok) okny

Při ztrátách okny se uplatní stejné principy jako při ztrátách stěnou, vnitřní a vnější konvekce probíhá totožně. Rozdíl je pouze v konduktivní části, kde místo jednoduchého čistě konduktivního přenosu se uplatní celá škála dílčích přenosů (zvláště u multikomorových plastových oken), proto výrobci udávají index U_w ($W m^{-2} K^{-1}$), který vystihuje tepelnou vodivost okna. Zde je pouze potřeba dát pozor, jelikož v reklamních prospektech se velmi často setkáme s tím, že výrobci uvádí hodnotu U_g ($W m^{-2} K^{-1}$), která je nižší, protože zahrnuje pouze prostup skly, nikoli rámem, jehož tepelná vodivost je vyšší.

$$Q_{okna} = S_{okna} * \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{in}} + \frac{1}{U_w} + \frac{1}{\alpha_{ext}}} * (T_{budova} - T_{ext}) \quad (1.43)$$

Kromě výše zmíněných principů se uplatní ještě ztráta radiací, protože ale tepelné vyzařování probíhá z interiérových teplot (viz Wienův posunovací zákon) na takových vlnových délkách, pro které je sklo převážně neprostupné, lze tento aspekt zanedbat.

Dalším úskalím je, že i pokud výrobce uvádí index U_w , tak je to pro vzorové okno, tedy okno typických rozměrů, kde je typický poměr ploch. Obecně mívají totiž rámy index U_f v rozmezí 1,0 – 1,5, kdežto zasklení 0,5 – 1,1 a na poměru ploch tedy záleží. Běžný rozsah U_w bývá pak 0,75-1,1. Samozřejmě, většina oken se pohybuje kolem standardního poměru, vybočují okna v jednom či více rozměrech menší. Pro atypicky menší okna může být rozsah U_w 0,85 – 1,3. Záleží potom na přesnosti, je třeba hodnotit, na tom nakolik je v daném případě odlišné U_f a U_g a případně pak tyto atypická okna vyhodnotit zvlášť.

Činitel U_w také postihuje jen okno, ne už pak vliv okna na ztráty ve stěně a naopak není ani postižen vliv způsobu osazení okna na jeho vlastní tepelné ztráty. Pokud je posouzení prováděno ve fázi projektu, lze nadefinovat uložení tak, aby byl vliv směrem k vytvoření tepelných mostů minimální a dokonce se snížil vliv vyšší tepelné vodivosti rámu. Pro dřevostavby, kde jsou zdi tvořeny z velké části přímo izolačním materiálem jsou problémy v tomto směru menší, ale i tam se vyplatí tyto detaily dořešit.

Běžně se okna osazují do otvoru na montážní pěnu, která zároveň izoluje rám od zdiva a poměrně běžně se vnitřní špalety obkládají polystyrenem. Toto opatření vliv tepelného mostu sníží, ale zdaleka nezruší, zvláště když špaletový EPS bývá nejčastěji používán v 1cm variantě.

Řešením je buď použít speciální zdící prvky pro okna, kde v úrovni osazovaného rámu je do zdiva zapuštěn pás tvrzeného EPS, který přerušuje tepelný most, nebo použít výraznější zateplení špalet (pokud to daný rám dovolí) a to ideálně i z venkovní strany a zatepleně osadit i parapety. Zateplení venkovních špalet vyžaduje kvalitní řemeslnou práci z hlediska zafixování, aby nedocházelo k praskání fasády kolem špalet, ale výsledný efekt je jednoznačně pozitivní. Zároveň dojde k většímu překryvu rámu zateplením a tím i vypelšení U_w . Konstrukčně lze dnes využít i extra tvrzený polystyren, udělat okenní otvor záměrně větší a redukovat ho plošně 5cm-10cm polystyrenu (lze samozřejmě kombinovat i se speciálními zdícími díly). Toto opatření redukuje tepelné mosty kolem oken na minimum.

Pokud řešíme stávající objekt, kde je to nějak provedeno a výměnu oken neuvažujeme je třeba zjistit dostupné informace a provést vyhodnocení, abychom získali reálné podklady pro výpočet tepelných ztrát. Pokud totiž není provedeno žádné opatření pro eliminaci tepelného mostu, tak běžně užívané zdivo má tepelnou vodivost 3x – 6x vyšší než rám nového moderního okna a přes plochu tepelného mostu tak můžeme lehce ztratit více tepla, než celou plochou okna.

V modelu toto ošetřuji aplikací U_w navýšeného koeficientem ztrát tepelného mostu.

4.3.7. Ztráty (tepelný tok) ventilací

Ztráty ventilací jsou ve fyzikálním slova smyslu rozdílem vnitřní energie ventilovaného vzduchu

$$Q_{vent} = k_r * V * \frac{\rho_v * c_{p_v} * \Delta T_v}{t_v} \quad (1.44)$$

Přičemž k_r je koeficient rekuperace (-), V objem ventilovaného prostoru (m^3), ΔT_v rozdíl teplot vzduchu (K) a t_v konstanta ventilace (s) – doba na kompletní výměnu vzduchu. Koeficient rekuperace určíme jako $k_r = 1 - \eta_r$, kde η_r (-) je účinnost rekuperace.

Pro objekty bez centrální výměny vzduchu se pak hodí spíše vzorec

$$Q_{vent} = k_{vent} * k_r * \Delta T_v * os$$

Tento vzorec je empirický a v koeficientu os odráží zkušenost, podle které intenzivněji využívané objekty jsou i více větrané. Koeficient os odpovídá počtu uživatelů (-). Koeficient $k_{vent} = 10$ (WK^{-1}) je empiricky stanovená hodnota, nelze ji fyzikálně odvodit. Koeficient k_r (-) se většinou nevyužije, ale znám několik instalací, kde jsou rekuperačně odvětrávány vybrané pokoje a pak má tento koeficient smysl, byť jeho hodnota musí být upravena podle podílu ventilace prováděné rekuperací.

Obecně je ale problém ventilační ztráty správně spočítat, protože pokud nemáme systém, kde je vyloučen zásah uživatele, tak jakýkoli náš předpoklad bude vždy jen přibližnou aproximací. Je logické, že při extrémnějších klimatických podmínkách (extrémní teploty, smog, vlhkost...) budou uživatelé tíhnout k vyloučení ventilace.

Stejně tak záleží na charakteru uživatele, uvedu jednoduchý příklad z praxe:

Moje matka topí v bytě na 20°C, v ložnici netopí vůbec. V bytě větrá nárazově, v ložnici podle venkovní teploty i celonočně. Otec topí na 25°C celý byt, větrá přitom celodenně, okna zavírá až na noc. Pochopitelně otec má ventilační ztráty řádově vyšší i když oba mají všechny objektivní podmínky (velikost bytu, počet uživatelů, bez centrální ventilace) totožné.

Čili, pokud je model vyhodnocován pro konkrétního uživatele, je vhodné zpracovat data odpovídající jeho zvykům, pokud toto nelze, pak využít obecné vzorce. Navíc samozřejmě, pokud nemáme skutečně systém, kde by byla prováděna neustálá ventilace konstantního objemu, tak není odpovídající vyjádření průběhu ztrát jako funkce, kde je tepelná ztráta závislá jen na aktuální venkovní teplotě, bohužel postihnout toto nějak obecně je problém a jediná aplikace, která v tomto smyslu funguje správně je zpětné vyhodnocování ztrát objektu na základě údajů o provozu ze systému měření a regulace. Systém MaR v takovémto případě má všechny údaje a do modelu pak lze uvážit přesnou funkci pro vyhodnocovaný časový úsek.

4.3.8. Vyhodnocení metody tepelných toků

Výše jsem popsal veškeré elementy potřebné k vyhodnocení tepelných ztrát. Pro vyhodnocení je potřeba pouze veškeré elementární tepelné toky sečíst, čímž získám celkové ztráty objektu a ve vztahu ke zdrojům pak díky aplikaci modelu otopné soustavy i údaje o požadovaném teplotním spádu, potažmo potřebné výstupní teplotě „zdroje“, ať už ve smyslu tohoto vyhodnocení jde o skutečný zdroj typu kotle, nebo akumulární nádrž a uvažovaná výstupní teplota je výstupem z jejího výměníku.

5. Funkce tepelného čerpadla – základní model

Prvním modelem, který zde popíšu modeluji velice jednoduše objekt a tepelné čerpadlo. Tento model není zdaleka tak komplexní jako modely uvedené v práci dále, ale umožňuje získat podstatně rychlejší vyhodnocení chování tepelného čerpadla v objektu, díky čemuž lze v komplexnějších modelech postupovat správným směrem. Základní model uvažuje zjednodušený objekt, kde uvažuji jen plášť objektu vystavený vnějšímu prostředí, přičemž podle stupně izolace zahrnuji i střechu jako další stěnu (izolace řádově stejná) nebo ji z výpočtu vyškrtávám (izolace znatelně převyšuje izolaci pláště). Počítám tepelné ztráty stěnami, okny, ventilací a ostatní zanedbávám. Neuvažuji žádné tepelné zisky. Uvažuji ohřev TUV ve formátu, že tepelné čerpadlo provádí pouze přehřev a dohřev zajišťuje v horní vrstvě zásobníku TUV bivalentní zdroj (případně zajistí TČ celý ohřev, ale mimo systém topení, takže nemá vliv na jeho teplotu).

Výhodou tohoto modelu je velmi rychlé vyhodnocení.

5.1. Určení typu tepelného čerpadla

Prvním krokem je určení ztrát uvažovaného objektu. Jelikož je třeba volit výkon vždy s dostatečnou rezervou, aby tepelné čerpadlo bylo schopné zásobovat objekt i v atypických situacích (pro extrémní případy však počítám s využitím bivalentního zdroje - například rychlé vyhřátí objektu po týdnu temperace), můžu uvažovat velmi jednoduchý model. Dle metody tepelných toků popsané výše vyhodnotím celkové ztráty objektu (v ustáleném stavu) a zvolím čerpadlo o výkonu odpovídajícímu

- Chci vyhodnotit v souvislosti se zateplením objektu – osadím výkon odpovídající ztrátám při trvalé externí teplotě 0 až -5°C
- Chci vyhodnotit ve srovnání s jinými zdroji, ale bez zásahů do konstrukce objektu – osadím výkon odpovídající ztrátám při venkovní teplotě -10°C
- Chci vyhodnotit ve srovnání s jinými zdroji, ale bez zásahů do konstrukce objektu a jde o objekt velmi lehké konstrukce s podlahovým topením umožňujícím nízkoteplotní vytápění i při extrémnějších vnějších teplotách osadím výkon odpovídající ztrátám při venkovní teplotě -15°C

Toto vše platí pro systémy tepelných čerpadel voda/voda či země/voda. V těchto systémech se uplatňuje jeden nelineární vliv na funkci tepelného čerpadla, kterým je závislost na teplotě výstupní vody. Tento vliv má vliv na funkci a v modelu vyhodnocujícím celkové chování objektu a ekonomiku se projeví, z hlediska dimenzování výkonu nemá rozhodující vliv.

Oproti tomu při dimenzování tepelného čerpadla vzduch/voda je potřeba k výše uvedenému uvážit ještě proměnnou teplotu nasávaného vzduchu a dimenzovat čerpadlo tak, že uvážím nikoli jmenovitý topný výkon, ale výkon v nejnepříznivější situaci, kterou by tepelné čerpadlo mělo ještě zvládnout bez sepnutí bivalentního zdroje.

Pro názornou představu tepelné čerpadlo WPL 13 vykazuje při teplotě topné vody 35°C a při venkovní teplotě 2°C topný výkon 8,1 kW a 6,6kW při teplotě -7°C (zkušební údaje dle A2/W35 a A-7/W35 EN 14511). Pokud tedy chceme vyhodnotit objekt dle bodu b) je vhodným prvkem při ztrátách objektu cca 5kW a nízkoteplotní otopné soustavě. Tepelné čerpadlo WPL 13 má sice špičkový výkon cca 13kW, kterého ale dosahuje při režimu A15/W35, který nás zajímá skutečně jen velmi okrajově.

5.1.1. Dimenzování bivalentního zdroje

Zvláštní kapitolou je dimenzování bivalentního zdroje, protože po většinu své životnosti bude v závislosti na topologii soustavy využíván jen velmi málo. Zároveň ale platí pravidlo, že bivalentní zdroj by měl být schopen tepelné čerpadlo zcela nahradit. S ohledem na tuto skutečnost aby bylo dosaženo náhrady i pro stavy, kdy tepelné čerpadlo funguje za bodem bivalence je vhodné dimenzovat bivalentní zdroj na 1,5 násobek výkonu tepelného čerpadla. Z tohoto úhlu vychází jako optimální bivalentní zdroj buď elektrokotel, nebo kotel na tuhá paliva.

Naopak i pro domácnosti, které využívají plyn k vaření není vhodné osazovat jako bivalentní zdroj kotel plynový, protože nebude pracovat v optimálních provozních podmínkách, jeho provoz tedy bude neekonomický.

5.1.2. Vyhodnocení již osazených tepelných čerpadel

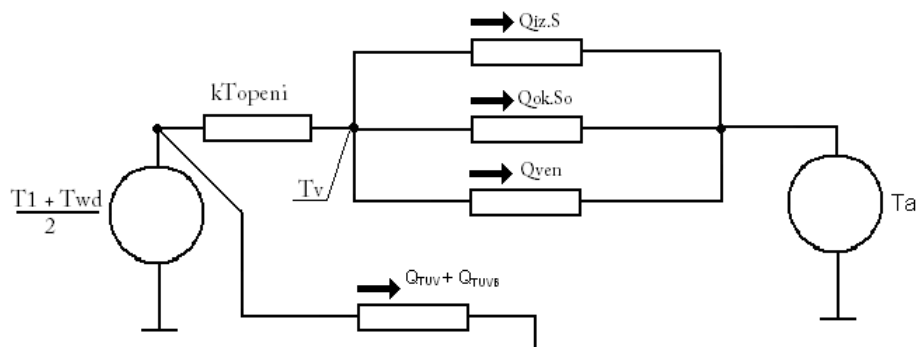
Setkáváme se s instalacemi, kde je tepelné čerpadlo již osazeno a majitelé třeba zvažují zateplení objektu. Jak si poradit s neexistencí katalogových listů a přesných technických údajů? Nejjednodušší a přitom nejefektivnější se jeví použít technická data odpovídajících nových modelů. I přes snahu výrobců prezentovat sortiment jako nový, inovativní a podobně se základní technická data za uplynulých 9 let, kdy se problematice tepelných čerpadel věnují nezměnila. Jistý posun nastal ve směru širšího využití tepelných čerpadel s možností chlazení v letních měsících, ale posuny základních energetických ukazatelů nastaly v řádech procent.

5.2. Vyhodnocení chování tepelného čerpadla v objektu

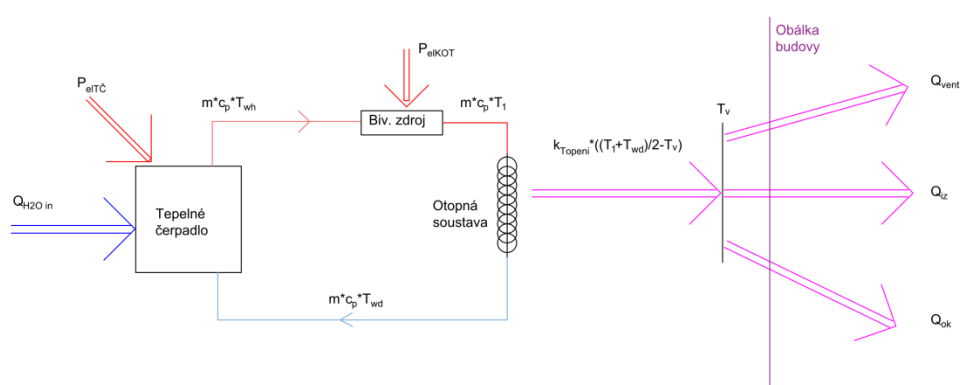
V základním vyhodnocení jsou dva parametry, na které se zaměřuji. Jeden je předpokládaný topný faktor a průběh bivalence. Tento výstup odpovídá na otázku, zda byl zvolen odpovídající typ tepelného čerpadla, potažmo zda je otopná soustava objektu vhodná k využití společně s tepelným čerpadlem, případně když využiji tloušťku izolace jako parametr vyjde mi i údaj o tom, kolik izolace objekt potřebuje, aby dané tepelné čerpadlo fungovalo optimálně, přičemž optimální funkcí se rozumí minimální využití bivalentního zdroje a průměrný topný faktor tepelného čerpadla blízký jmenovitým údajům.

Základem vyhodnocení je tento zjednodušený model:

Ztráty jsou určeny pomocí elektro-tepelné analogie. Teplota T_v je udržována regulací teploty T_1 .



Tepelný obvod modelu TČ



Obr.23

Tento model odpovídá tomu, že voda se v TČ ohřívá z teploty T_{wd} na T_{wh} . Při konstantní teplotě vstupní vody (systém země/voda či voda/voda) je teplota T_{wh} určující pro topný faktor čerpadla (proto je čerpadlo předřazené elektrokotli), v případě čerpadla vzduch/voda je uvážena proměnlivá teplota vstupu, pro topný faktor je pak určující rozdíl teplot vstupu a výstupu TČ. Dále pokračuje topná voda do elektrokotle, kde se ohřívá dále na teplotu T_1 . Kotel je zapotřebí jen při nižších venkovních teplotách, proto má zaveden bypass. Z kotle je voda rozváděna do nízkoteplotní otopné soustavy ($T_1=35-45^\circ\text{C}$). Teplota vody po průchodu soustavou klesne na T_{wd} a voda je zavedena zpět do TČ. Výkon je odváděn do interiéru, kde vyrovnává ztráty a udržuje tak požadovanou teplotu. Uvažované ztráty jsou ventilační, prostup stěnami s izolací a prostup okny. Dále je uvažován i předeřev teplé užitkové vody.

Rovnice popisující systém

$$COP(T_{wh}, T_a) * P_{elTC} = m_2 * c_{pv} * (T_{wh} - T_{wd}) \quad (1.45)$$

$$P_{elkot} = m_2 * c_{pv} * (T_1 - T_{wh}) \quad (1.46)$$

$$Q_{celk} = m_2 * c_{pv} * (T_1 - T_{wd}) \quad (1.47)$$

$$Q_{celk} = k_{top} * \left(\frac{T_1 + T_{wd}}{2} - T_v \right) \quad (1.48)$$

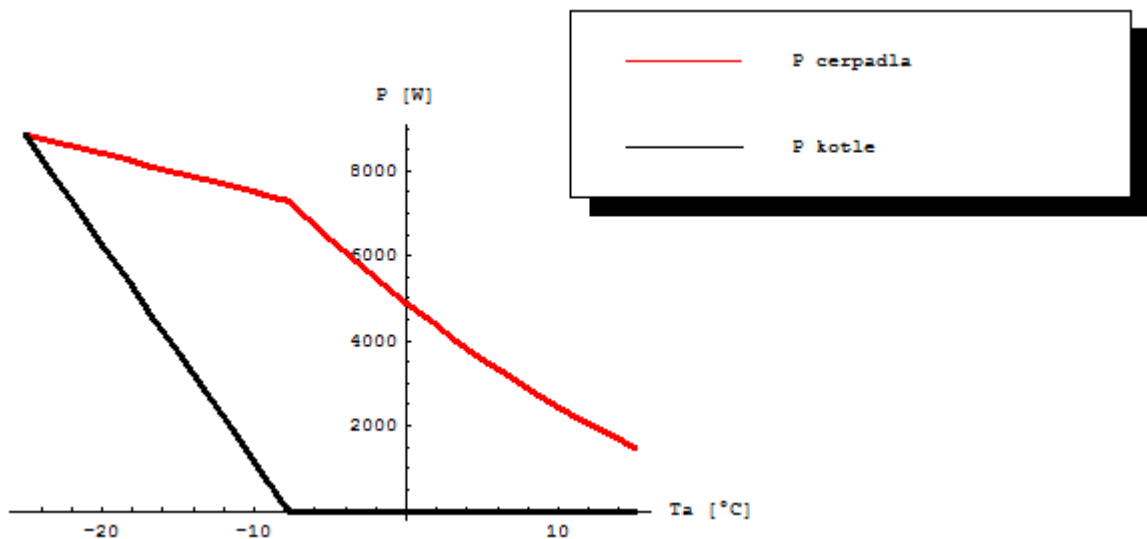
Přičemž zároveň platí, že

$$Q_{celk}(T_a, d_{iz}) = Q_s(T_a, d_{iz}) + Q_{ok}(T_a) + Q_{ok}(T_a) + Q_{TUV} \quad (1.49)$$

Viz popis v odpovídající kapitole, fyzikálně Q_{TUV} neprobíhá v rámci Q_{celk} , ale v rámci tohoto zjednodušeného modelu jde o dobrou aproximaci.

Jelikož m_2 je pro dané TČ obvykle dáno výrobcem (alespoň rozsah, případně lze odečíst z údajů oběhového čerpadla), T_v je dáno je soustava řešitelná. Proměnná je T_a , kterou pro konkrétní aplikaci vložíme na základě meteorologických údajů (upraveno dle kapitoly o zohlednění tepelných kapacit), a parametr je d_{iz} , pokud nezvolíme pevně.

Výsledkem tohoto modelu je pak pro konkrétní d_{iz} například takovýto graf,



který lze interpretovat pro konkrétní objekt jako křivku bivalence. Jelikož se jedná o výsledek ze zjednodušeného modelu, je potřeba interpretovat podle stejných pravidel, podle kterých byl objekt zjednodušen, zejména pak interpretovat teplotu T_a jako průměrnou denní, jedná-li se o objekt, kde jsme zanedbali větší tepelné kapacity.

Tento výstupní graf je prvotním kontrolním mechanismem. Pokud vychází bod bivalence do běžně se vyskytujících hodnot teploty, značí to, že by docházelo k většímu využívání bivalentního zdroje a je vhodné instalovat vyšší výkon TČ, nebo v případě, že zároveň zvažujeme i varianty zateplení zvážit větší zateplení objektu.

Naopak bod bivalence ve velmi nízkých hodnotách by značil velké předimenzování tepelného čerpadla a je indikací k užití modelu o menším výkonu.

Uvažujeme-li objekty s vyšší tepelnou kapacitou, pak platí, že bod bivalence by neměl ležet mimo interval $(-10, 0)$ °C ve většině lokací. V praxi jsem se často setkal s dimenzováním tepelných čerpadel na bod bivalence -15°C (tedy 100% pokrytí ztrát objektu při venkovní teplotě -15°C), s tím, že to je v podmínkách ČR poměrně běžně se vyskytující stav. Reálná data z provozu ale ukazují, že takto instalovaná tepelná čerpadla fungují zcela bez bivalence, protože do hry vstupují tyto faktory:

- tepelné kapacity – viz daná kapitola, objekt s dostatečnou tepelnou kapacitou se chová, jako by venku byla průměrná denní teplota a průměrná denní teplota -15°C je v podmínkách ČR výjimečný stav.
- Určení ztrát objektu – v případě, že jsou ztráty určeny výpočty bývají nadhodnocené a naopak konstanta topení bývá v projektech podhodnocena. Reálný bod bivalence je tedy na nižší teplotě, než vyplývá z výpočtu. Důvod je zřejmý, žádný projektant nechce riskovat stav, že by jím navržené řešení nebylo dostatečné a počítá vždy s bezpečnou rezervou.
- Tepelné zisky – tepelné zisky lze při vyhodnocování většiny věcí zanedbat, ale nelze jejich existenci popřít. Výsledkem je, že reálný bod bivalence je proti vypočtenému posunut na nižší hodnotu.

Z reálného provozu jsou pak známy případy, kdy ke spínání bivalentního zdroje nedochází vůbec ani u instalací, které byly instalovány s předpokládaným bodem bivalence -5°C , což dokládá stav, že drtivá většina instalovaných tepelných čerpadel je předimenzována.

Zde je na místě poznámka k ekonomice provozu, jak rozeberu v kapitole věnující se ekonomickému vyhodnocení. Výrobci často prezentují jako výhodu, že bivalentní zdroj nikdy nesepe, protože v porovnání s tepelným čerpadlem je neekonomický. Je pravda, že se nehodí, aby bivalentní zdroj pokrýval významnější procento spotřeby, ale pokud bivalentní zdroj poskytne řádově 1-3% energie na vytápění je rozdíl v ceně provozu zanedbatelný (k poskytnutí dochází v okamžiku, kdy má tepelné čerpadlo nejnižší COP), to že ale sepe je dobře, protože se s největší pravděpodobností bude jednat o optimální instalaci z hlediska nákladovosti, když uvážíme investiční i provozní náklady instalace.

Vyhodnocení ročního provozu

Tuto část vyhodnocení provádím v jednoduchém modelu tehdy, když je potřeba provést jen jednoduchou analýzu, jinak je vhodné využít komplexnější model (viz následující kapitoly).

Jelikož výstupem z popsaného modelu je konkrétní spotřeba tepelného čerpadla a elektrokotle v závislosti na venkovní teplotě, nic nebrání tomu vyhodnotit roční provoz na základě reálných meteorologických dat. Jednoduše integrací daných veličin

$$E_{TC} = \int_0^{1rok} P_{elTC}(T_a(t))dt \quad (1.50)$$

$$E_{KOT} = \int_0^{1rok} P_{elKOT}(T_a(t))dt \quad (1.51)$$

Získám údaje o spotřebě za jeden rok, následně integrací ztrát

$$E_{TOP} = \int_0^{1rok} Q_{celk}(T_a(t))dt \quad (1.52)$$

Získám údaj o energii spotřebované vytápěním. V případě, že vyhodnocuji případ, že bivalentní zdroj je elektrokotel a lze tedy uvažovat stejnou cenu energie lze uvést

$$COP_{real} = \frac{E_{TOP}}{E_{TC} + E_{KOT}} \quad (1.53)$$

Přitom COP_{real} (-) lze chápat jako koeficient účinnosti vytápěcí soustavy a lze jej využít pro základ vyhodnocení provozu. V případě tepelných zdrojů s rozdílnou vstupní energií pak závisí na účelu konkrétního vyhodnocení, ale většinou je třeba v těchto případech využít koeficienty v odlišném tvaru, přičemž nejčastěji (kvůli snadnější návaznosti) využívám tvar, kde bivalentní zdroj přepočítávám z pohledu ekonomiky provozu na ekvivalent elektrokotle.

$$COP_{real} = \frac{E_{TOP}}{E_{TC} + \frac{\gamma}{\eta} * E_{KOT}} \quad (1.54)$$

Kde γ (-) je koeficient zahrnující poměr ceny energie bivalentního zdroje a tepelného čerpadla a η (-) je účinnost bivalentního zdroje. COP_{real} tak dává opět koeficient účinnosti vytápěcí soustavy z hlediska ekonomiky provozu (nikoli z hlediska využití energie).

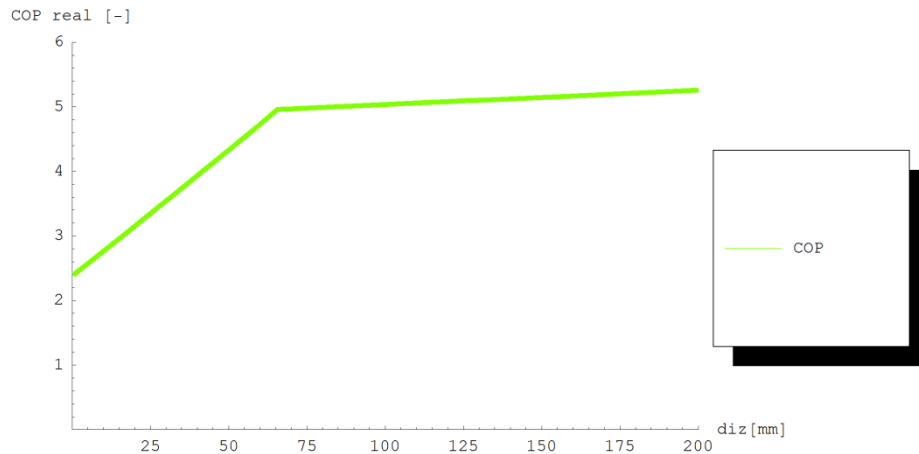
Vyhodnocení COP ve vztahu k izolaci

Opět platí, že v případě detailní analýzy se hodí využít komplexnější modely, ale pro rychlé vyhodnocení lze úspěšně využít výše popsané principy a dosazením několika tloušťek izolace získat pracovní body, kterými lze proložit křivku a získat tak $COP_{real}(d_{iz})$ což je koeficient (ve formě funkce) který lze využít při výpočtu optimální tloušťky izolace objektu.

Důvod k využití výše popsané metody namísto analytického stanovení je prostý. Jelikož $COP_{real}(d_{iz})$ je z fyzikální podstaty funkce spojitá, má spojitě derivace je výsledná aproximace na základě několika (typicky pěti) pracovních bodů velmi přesná. Vzhledem k tomu, že COP_{real} vzniká na základě numerické integrace ročního provozu, by jiné metody stanovení byly nevyužitelně pomalé.

Pro správné vyhodnocení je třeba vědět, že výsledná funkce bude z principu vykazovat dva odlišné úseky. Úsek, kde je využíván bivalentní zdroj a úsek, kde je izolace objektu na takové úrovni, že bivalentní zdroj už nesepe. Tedy i v tomto smyslu lze určit jistý „izolační bod bivalence“. Proto při vyhodnocování dat je třeba alespoň jedno z vyhodnocení provést v těsném okolí tohoto bodu. Typický postup je vyhodnotit objekt bez izolace, poté s větší než praktickou izolací (40 cm, což už bývá za „bodem bivalence“) a podle energetických údajů modelu další body vyhodnocení volit menší izolaci.

Obr.24



Vložený graf zachycuje typický průběh, kdy první část vykazuje strmý růst s tím, jak klesá podíl energie dodané bivalentním zdrojem. Ve druhé části dochází ještě k minoritnímu růstu způsobenému poklesem teploty vody v otopné soustavě. Z grafu lze odečíst, že zvolený typ čerpadla je jednoznačně zcela nedostatečně dimenzovaný pro nezateplený objekt, ale při zateplení kolem 10cm bude pracovat optimálně. Hodnota bodu bivalence vychází 6,5cm, ale jak bude zřejmé z kapitoly věnující se ekonomickému vyhodnocení izolace, nevyplatí se riskovat její podhodnocení.

Pořád platí, že optimálně navržený systém někdy bivalentní zdroj sepne, ale je poměrně široké rozpětí izolace, kdy dochází k sepnutí, ale dodaná energie je v rozmezí (0-1)%. K tomuto sepnutí však dojde v případě výskytu extrémního výkyvu teplot, nikoli na nějaké pravidelné bázi. Rozpětí tohoto intervalu lze získat z dat ročního provozu, ale v podstatě nepotřebujeme konkrétní hodnotu, protože ve vyhodnoceních nehraje roli, roli orientačního bodu plní „izolační bod bivalence“.

6. Ekonomické vyhodnocení

V předchozí kapitolech byly popsány jak mechanismy určení ztrát, tak mechanismy určení výkonů instalace s tepelným čerpadlem (v provedení základního modelu). Zde popíšu mechanismus ekonomického vyhodnocení výsledků základního modelu chování objektu.

Ekonomické vyhodnocení – ztráty

Základem pro vyhodnocení jsou údaje o ztrátách objektu. Při vyhodnocení dat potřebných k sestavení funkce $COP_{real}(d_{iz})$ jsou získána rovněž data o celkové roční spotřebě energie $E_{TOP}(d_{iz})$ v závislosti na tloušťce izolace. Opět platí, že vzhledem k jednoduchému charakteru této závislosti lze velice jednoduše těmito daty proložit křivku. Samozřejmě pokud nevyhodnocujeme varianty izolace objektu a pouze srovnáváme tepelné zdroje, použijeme údaj pro $d_{iz} = 0$ jako konstantu. Popíšu zde variantu s vyhodnocením tloušťky izolace, varianta bez ní funguje stejně, pouze je redukováno množství vyhodnocovaných variant.

Ekonomické vyhodnocení – náklady

Základní úvaha pro ekonomické vyhodnocení (viz úvodní kapitola) je srovnání nákladů všech variant, přičemž jsou uvažovány jak náklady investiční, tak náklady na energie po dobu T let od investice, které jsou přepočítávány na dobu investice.

$$\text{Celkový náklad} = \text{investice zdroj tepla} + \text{investice zateplení} + \text{celková cena za energie} \quad (1.55)$$

Přičemž postupuji tak, že investice počítám v současných cenách a ceny energií dopočítávám dle vztahu

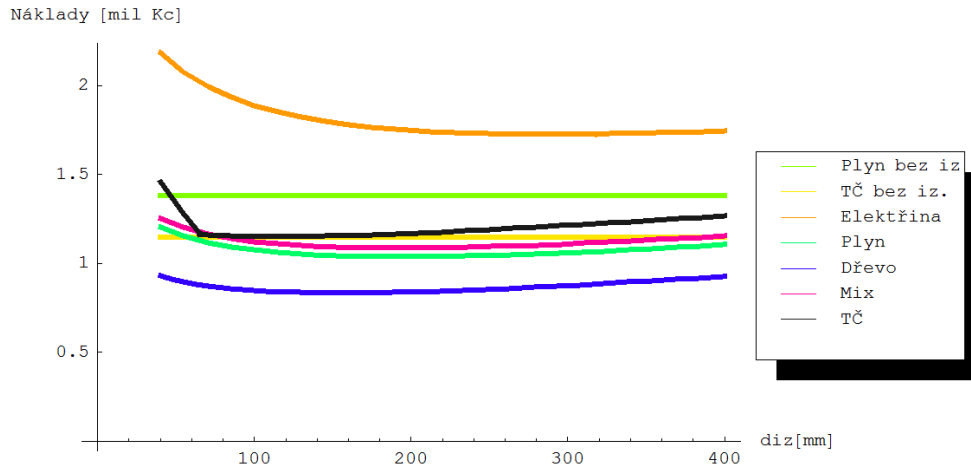
$$\sum_{i=0}^{T-1} \left(\frac{\text{cenaE} * E_{TOP}(d_{iz})}{COP_{real}(d_{iz})} + Pa \right) * \frac{E_{inf}^i}{inf^i} * red$$

Kde cenaE je cena dané energie, $E_{TOP}(d_{iz})$ jsou ztráty objektu za rok (J), Pa značí paušální výdaj spojený s odběrem dané energie (Kč), E_{inf}^i (-) je koeficient zdražení dané energie (exponent i zajišťuje každoroční aplikaci), koeficient inf (-) je obecná inflace, přičemž exponent i zajišťuje opět každoroční aplikaci, $COP_{real}(d_{iz})$ (-) zajišťuje přepočtení ztrát objektu na energii odebranou (zaplacenou) z distribuce a koeficient red (-) zajišťuje započtení dalších vlivů, které nesouvisí přímo s energetickou spotřebou. Zde využívám koeficient red jako koeficient zohledňující zlevnění odebrané elektrické energie při způsobech vytápění využívající tarif s levnější elektřinou.

Koeficient $COP_{real}(d_{iz})$ je popsán pro tepelné čerpadlo v předchozí kapitole, pro ostatní zdroje pak má význam $COP_{real}(d_{iz}) = \eta$, kde η (-) je účinnost daného zdroje. Pro většinu zdrojů nelze jednoduše zjistit závislost η na d_{iz} i když pro některé samozřejmě existuje. Pokud ale vyhodnocuji různé zdroje, tak předpokládám, že bude osazen nový zdroj, který bude dimenzován v relaci odpovídající ztrátám objektu a dosazuji obvyklou účinnost daného zdroje jako konstantu. Pouze v případech kdy je požadavek na vyhodnocení zdroje stávajícího doplním $\eta(d_{iz})$, přičemž vodítkem je pokles spotřeby a topologie soustavy (nakolik pokles spotřeby ovlivní regulaci zdroje). Tyto nelinearity jsou markantní u plynových zdrojů a soustav s malou akumulací (viz kapitola zdroje).

Výstupem tohoto typu vyhodnocení je pak graf celkových nákladů se závislostí na tloušťce izolace. Zdroje, které uvažuji ve variantě osazení do objektu bez izolace se pak samozřejmě jeví jako konstantní vůči tloušťce izolace.

Obr.25

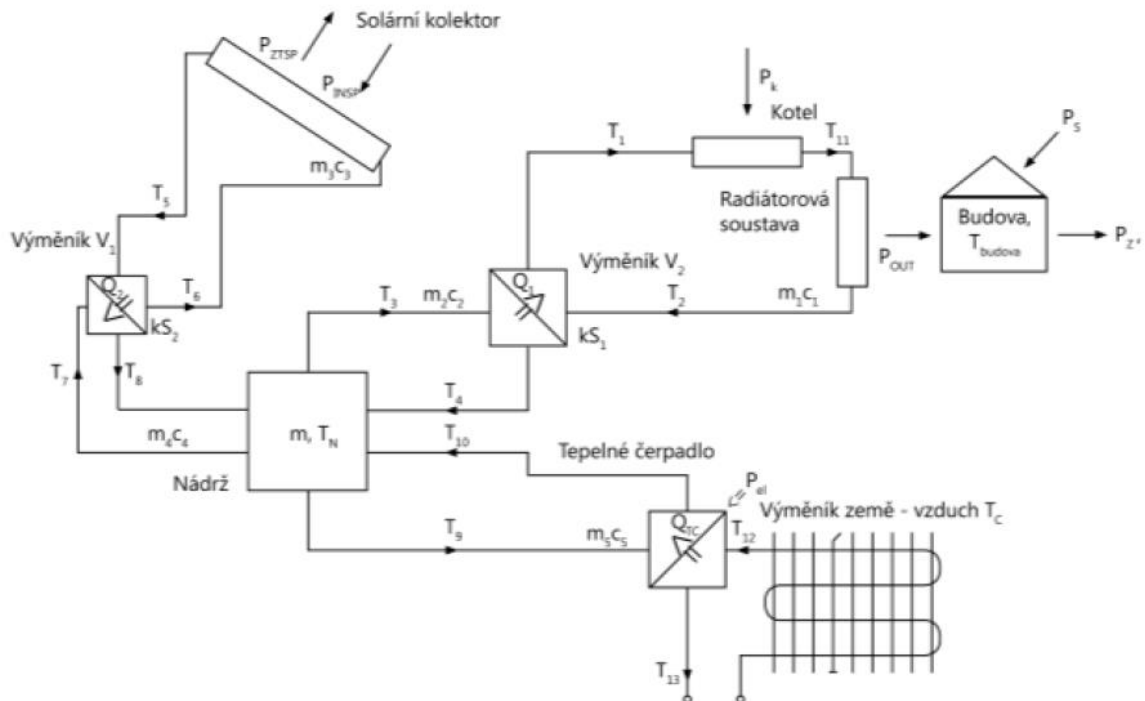


Na konkrétním případě budu ilustrovat přesný vliv jednotlivých parametrů. Obecně k výstupu z hlediska metody lze říci to, že výstup je samozřejmě závislý na vstupních parametrech, přičemž nemluvím jen o technickém řešení objektu, ale na vyhodnocení má samozřejmě velký vliv nastavení parametrů upravujících vývoj ceny energií a také inflace. Stejně tak je podstatná doba vyhodnocení, kdy při obecném dlouhodobém trendu zdražování energií bude delší doba vyhodnocení preferovat úspornější varianty i za cenu vyšších investičních nákladů.

7. Komplexní model objektu

Výše uvedený zjednodušený model včetně ekonomického vyhodnocení je platný, ale vzhledem omezujícím podmínkám a z hledem k omezenému množství vstupních veličin jej nelze uplatnit na složitější instalaci. Hodí se skutečně zejména na dimenzování výkonu tepelného čerpadla a na základní náhled z hlediska výhodnosti zateplení objektu. Pro cokoli složitějšího je potřeba využít model v rozšířené variantě.

7.1. Popis systému, předpoklady a požadavky



Obr. 1 – Schéma systému

Obr. 1 – Schéma stávajícího systému

Tato rozšířená varianta počítá s osazením solárního kolektoru, tepelného čerpadla s výměníkem země-vzduch, centrální akumulací nádrže a vyhodnocuje i tepelné zisky z oslunění. Samozřejmě pokud některá část systému není využita, lze jednoduše upravit zadáním nulové konstanty do odpovídající části (například nulová plocha solárního kolektoru). V modelu je uvažována rekuperace ventilace.

I když tento model označuji za „komplexní“ jsou přijata dílčí zjednodušení. Mám model koncipován ve dvou variantách, z nichž jedna přijala zjednodušení, které se týká tepelných kapacit (viz předchozí kapitoly), kdy používám aproximaci vlivu kapacit začleněním do exteriérové teploty, tak abych mohl využít jednoduché rovnice v popisu tepelných ztrát a příliš nezvyšoval výpočetní náročnost programu. V modelu lze rovněž využít popis přes konstantu budovy, běžně ale využívám model jednotlivých toků, který dává lepší přehled o vlivech jednotlivých typů ztrát.

Z hlediska kolektoru používám pro výpočet solárního zisku reálné oslunění [6,7], s ohledem na množství různých kolektorových systémů nemodeluji konkrétní interní

uspořádání, v modelu mám uvedeny korekční konstanty pro tři nejčastěji užívané principy (plošný kolektor, plošný kolektor se selektivním pokovením a vakuovaný trubicový kolektor), pokud je pro uvažovaný kolektor známa charakteristika výstupního výkonu v závislosti na výstupní teplotě, intenzitě oslunění a venkovní teplotě, lze vždy upravit na přesný typ.

U zemního výměníku uvažuji aproximaci ve formě uvažování země jako zdroje konstantní teploty. Tato aproximace je tím přesnější, čím je výměník větší a uložený ve větší hloubce, další korekce jsou případně možné v závislosti na proudění a hloubce. Mé osobní zkušenosti s těmito výměníky ukazují, že nelze jednoduše a jednoznačně vyjádřit míru a vliv ochlazení země na základě jakéhokoli konkrétního kritéria, je však na místě redukovat konstantu daného výměníku kS řádově o 20%, pokud neřešíme extra příznivé podmínky typu uložení výměníku hluboko v proudící spodní vodě.

7.2. Matematický popis systému

7.2.1. Oslunění

Jelikož se jedná o část, kterou neuvažuji jako předmět optimalizace, provádím vyhodnocení ve zvláštním programu a ukládám výsledky do datového souboru. Tím zamezuji nutnosti stálého přepočítávání, což model velmi zatěžovalo. Samotné oslunění je počítáno velmi jednoduše.

Výšku slunce vůči obzoru můžeme vypočítat ze vztahu

$$SV = \text{Arcsin}(\text{Sin}(de(d)) * \text{Sin}(zs) + \text{Cos}(de(d)) * \text{Cos}(zs)) * \text{Cos}(15 * (hod - 12)) \quad (1.56)$$

Kde sluneční deklinace

$$de(d) = \frac{\pi}{180} * (-23,5 * \text{Cos}(\frac{\pi}{180} * (d+9))) \quad (1.57)$$

d je pořadí dne v roce, zs je zeměpisná šířka v rad a hod je konkrétní hodina daného dne.

Účinnost osvětlení je dána jako cosinus úhlu, jež svírá normála osvětlované roviny s dopadajícím paprskem (viz bodový světelný zdroj) [14]. Se znalostí výšky slunce (a samozřejmě znalostí úhlu slunce vůči světovým stranám) můžeme polohu slunce vyjádřit jako jednotkový vektor a totéž provést s normálou roviny okna [14].

Normálu posuzované roviny vyjádřím jako:

$$(\text{Cos}(\alpha) * \text{Cos}(\text{Odklon}), \text{Cos}(\alpha) * \text{Sin}(\text{Odklon}), \text{Sin}(\alpha)) \quad (1.58)$$

Přičemž jednotlivé složky vektoru jsou vyjádřeny k bázi jednotkových vektorů – Jih, Západ, „z“.

Kde α (rad) je úhel posuzované roviny s rovinou vodorovnou a Odklon (rad) je úhel vodorovného odklonu od jižního směru (kladný směr na západ, záporný na východ). V programu využívám zadání ve stupních (intuitivnější forma) a v každé funkci Sin a Cos využívám parametr Degree, zde se přidržím matematicky přehlednějšího zápisu, který odpovídá tomu, že zadávané veličiny jsou v radiánech.

Obdobně vyhodnotím vektor pro sluneční paprsky,

1. Složka:

$$\cos\left(\pi - \frac{2\pi * \text{hod}}{24}\right) * \cos(SV) \quad (1.59)$$

2. složka

$$-\sin\left(\pi - \frac{2\pi * \text{hod}}{24}\right) * \cos(SV) \quad (1.60)$$

3. Složka

$$\sin(SV) \quad (1.61)$$

$$\cos\varphi = \frac{\vec{N}_1 \cdot \vec{N}_2}{|\vec{N}_1| * |\vec{N}_2|} \quad (1.62)$$

Obecně platí pro určení kosinu předchozí rovnice, přičemž jmenovatel zde je při jednotkových vektorech roven jedné.

Toto provedu pro jednotlivé stěny a střechu (většinou počítám střechu jako plochou, lze upravit na libovolný tvar (viz příkladová studie 2) tak, že se spočítá oslunění každého elementu) a stejný princip využiji i na spočítání oslunění kolektoru.

Takto mám vyjádřeny jednotkové toky dopadající na jednotlivé stěny objektu. Zásadní veličinou pochopitelně není oslunění, ale tepelný tok, který oslunění vyvolá ve stěnách a oknech a který následně mění tepelnou bilanci objektu.

V modelu, kde uvažuji vyhodnocení stěn včetně vlivů tepelných kapacit vstupuje oslunění do okrajové podmínky jako tok na rozhraní a okna jsou vyhodnocena jako přímý prostup, přičemž je uplatněna redukce k_{OK} 0,6 až 0,9 za částečnou neprůsvitnost oken (hodnota z katalogového listu) a u objektů, kde se vyskytují okna u kterých dochází k výraznějším ztrátám slunečního toku z hlediska osazení uvažuji ještě redukční koeficient aplikovaný jako exponent účinnosti zachycení dané orientací vůči slunci. To se týká jejich výška či šířka není řádově větší než hloubka osazení (vnější špaleta). Dále uplatňuji koeficient zastínění podle okolního terénu.

Výše uvedené vzorce se týkají prosté geometrické stránky věci. Pro získání tepelných toků je třeba aplikovat ještě dva faktory. Jedním je velikost slunečního toku (Wm^{-2}) a druhým je faktor zamračení (-).

Obecně lze ke slunečnímu toku přistoupit tak, že se vyjádří přímá složka (pro kterou platí výše uvedené závěry) a složka nepřímá, která závisí na okolí objektu. Pro správné vyhodnocení modelu je zde opět otázka co je nutné přesně vyčíslit a co lze zanedbat, abychom nezanášeli model vztahy, které nemají vliv na přesnost celkového výpočtu.

Platí, že přímá složka je dle Heindla a Kocha [6,7] dána vztahem:

$$I_p = I_0 * e^{-\frac{Z}{\varepsilon}} \quad (1.63)$$

Kde I_0 je sluneční konstanta $1360 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$, Z (-) součinitel znečištění atmosféry a ε je součinitel závisící na výšce slunce nad obzorem a nadmořské výšce daného místa. Součinitel Z lze pro konkrétní lokalitu ověřit měřením, což ale není praktické, proto využívám tabulkových hodnot [6].

Měsíc	Průměrné měsíční hodnoty součinitele Z pro oblasti s rozdílnou čistotou ovzduší			
	horské oblasti	venkov	města	průmyslové oblasti
I.	1,5	2,1	3,1	4,1
II.	1,6	2,2	3,2	4,3
III.	1,8	2,5	3,5	4,7
IV.	1,9	2,9	4,0	5,3
V.	2,0	3,2	4,2	5,5
VI.	2,3	3,4	4,3	5,7
VII.	2,3	3,5	4,4	5,8
VIII.	2,3	3,3	4,3	5,7
IX.	2,1	2,9	4,0	5,3
X.	1,8	2,6	3,6	4,9
XI.	1,6	2,3	3,3	4,5
XII.	1,5	2,2	3,1	4,2
roční průměr	1,9	2,75	3,75	5,0

Obr.26

Součinitel ε je dán vztahem

$$\varepsilon = \frac{9,38076 * (\sin(SV) + (0,003 + \sin^2(SV))^{0,5})}{2,0015(1 - H * 10^{-4})} + 0,91018 \quad (1.64)$$

Kde H je nadmořská výška daného místa (m) a SV (viz výše).

Mezi přímou složkou I_{pv} a složkou difúzní I_{Dv} platí (bereme intenzitu ve směru srovnávací vodorovné roviny) přibližný vztah $I_{Dv} = 0,33 * (I_0 - I_p) * \sin(SV)$; $I_{pv} = I_p * \sin(SV)$, na jednotlivé stěny se pak bude vyjádření lišit, ale využijí tento vztah k ověření míry vlivu difúzní složky.

Z výpočtů vyplývá, že v městském prostředí (fakticky nezávisle na nadmořské výšce) tvoří difúzní složka pro tuto konkrétní rovinu asi 13% (v horách 7%). Z hlediska vyhodnocení světelné pohody hraje difúzní složka významnou roli, z hlediska energetického nikoli. Je-li přímá složka plošně navýšena o 10-15% a difúzní složka zanedbána je výsledek z energetického hlediska rovnocenný. Vliv difúzní složky stoupá se znečištěním ovzduší.

Nyní se dostávám k druhému faktoru, kterým je faktor zamračení. Data o něm stahuji vždy pro danou lokalitu ve formátu 1 – zamračeno až 0 – čistá obloha pro konkrétní datum a

čas. Pro rozumnější využití (násobení se slunečním tokem) převádím do opačného formátu (1 čistá obloha, 0 zamračeno). S ohledem na výše řešenou problematiku difuzního záření ale platí, že čistá nula není dosažitelná a tyto data udávající pouze zakrytí oblohy mraky neříkají nic o podílu difuzního záření. Jelikož pro tuto veličinu neznám relevantní zdroj dat, provedu úpravu přímo v koeficientu zamračení a to tak, že rozsah funkčních hodnot <0;1> převedu lineárním zobrazením na rozsah <0,15;1> čímž zohledním skutečnost, že při zamračené obloze stále existuje difuzní záření, které se projeví, zároveň tento přístup koresponduje se zohledněním difuzního záření v přímé složce.

Takto definované toky se projeví v případě stěn ve výpočtu v okrajové podmínce, v případě oken počítám sluneční zisky jako vnitřní tepelný zdroj.

V případě zjednodušeného modelu (stěny bez kapacit) uvažuji vliv oslunění jako vnitřní tepelný zdroj jehož velikost je dána prostupem okny a tok stěnami určuji z konfigurace „proudového děliče“. Vliv tohoto zjednodušení na přesnost se projeví v závislosti na charakteru objektu, obecně vliv na energetickou bilanci je minoritní, jelikož pro model s kapacitami i bez kapacit dominuje sluneční zisk okny.

Pro sluneční tok prostupující okny tedy vždy platí, že jej vyhodnotím jako součet slunečních toků na všechna okna

$$Q_{slunZ}(t) = k_{OK} * (S_{okenS} * qsS(t) + S_{okenJ} * qsJ(t) + S_{okenZ} * qsZ(t) + S_{okenV} * qsV(t) + S_{okenSTR} * qsSTR(t)) \quad (1.65)$$

Kdy jednotlivé toky $qsX(t)$ (Wm^{-2}) jsou již násobeny jak příslušnou intenzitou slunečního toku, zamračením i geometrickou účinností danou úhlem paprsku vůči vyhodnocované stěně.

7.2.2. Tepelné ztráty

Prostup stěnou

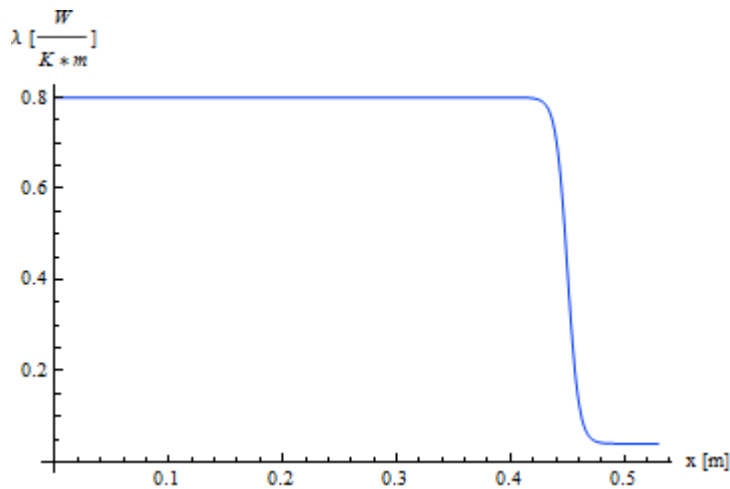
Když mám definovaný tok osluněním lze jednoduše vyhodnotit tepelné toky stěnami podle následujícího předpisu:

$$\rho_s(x) * c_{p_s}(x) * \frac{\partial T_s(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda(x)_s * \frac{\partial T_s(x, t)}{\partial x}) \quad (1.66)$$

Kde pro každou stěnu jsou definovány funkce $\rho_s(x)$, $c_{p_s}(x)$ a $\lambda(x)_s$ v závislosti na skladbě. Jelikož diskrétní hodnoty a nespojitý průběh by vedl ke špatnému numerickému vyhodnocení a jelikož fyzikální realita je ze své podstaty spojitá, uvažuji spojitě i tyto funkce, přičemž definuji přechodovou funkci ve tvaru

$$A + B * \tanh\left(\frac{x - \text{bod styku}}{\text{interval}}\right) \quad (1.67)$$

Přičemž typicky za bod styku dosadím souřadnici odpovídající tloušťce zdiva a za interval 1 cm, což vede typicky k takovému průběhu:



Obr.27

Příklad – tloušťka zdiva 45cm, λ zdiva 0,8, tloušťka izolace 8cm, λ izolace 0,04, interval přechodu nastaven na 1cm.

Aby vyhodnocení těchto funkcí bylo automatizováno, je v modelu integrován výpočtový modul, který vyhodnotí pro libovolně zadané hodnoty materiálových konstant vytvoří takto plynulý přechod vypočtením parametrů A a B na základě jednoduchého vztahu

$$A - B = zdivo \quad (1.68)$$

$$A + B = izolace \quad (1.69)$$

což je jednoduchá soustava dvou rovnic o dvou neznámých, kde za „zdivo“ a „izolace“ lze dosadit libovolnou dvojici vzájemně si odpovídajících fyzikálních parametrů těchto dvou vrstev.

Dále musím definovat počáteční a okrajové podmínky, tedy počáteční podmínku volím že teplota v celé stěně je rovna průměrné denní teplotě

$$T_S(x, t_0) = T_{denniPrumerna} \quad (1.70)$$

Okrajovou podmínku vlevo

$$-\lambda_S(x) \frac{\partial T_S(x, t)}{\partial x} = \alpha_{int} * (T_{int} - T_S(x, t)), x = 0 \quad (1.71)$$

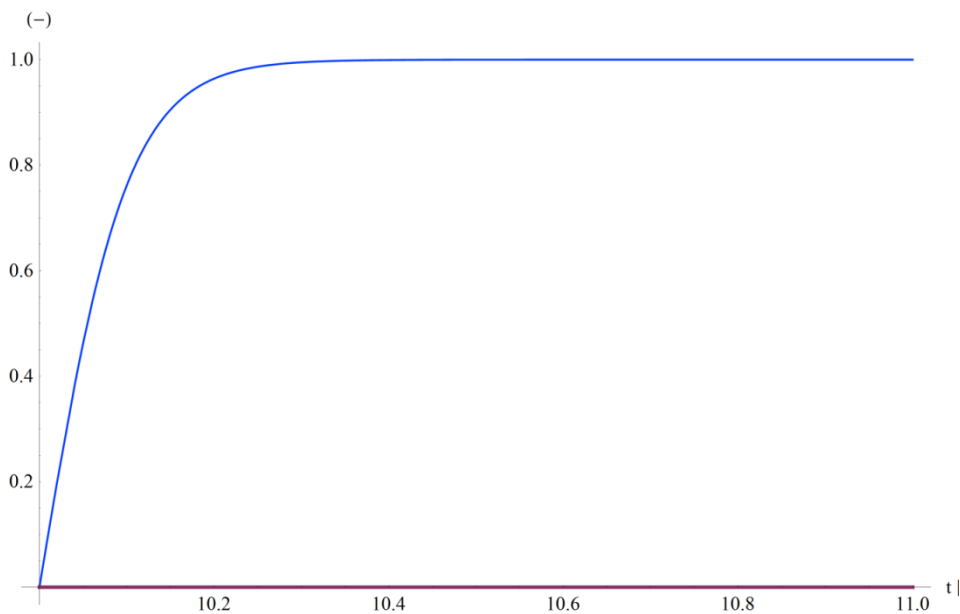
Upravuji do tvaru

$$-\lambda_S(x) \frac{\partial T_S(x, t)}{\partial x} = \alpha_{int} * (T_{int} - T_S(x, t)) * prechodStart(t), x = 0 \quad (1.72)$$

Kde

$$prechodStart(t) = \text{Tanh}(10 * (t - t_0)) \quad (1.73)$$

slouží k upravení do tvaru vhodnějšího pro numerické zpracování, jelikož v počáteční podmínce pro t_0 definuji konstantní teplotu, tak bych byl v rozporu, pokud bych zároveň nedefinoval $T_{int} = T_S(x, t_0)$. Díky přechodové funkci *prechodStart* mohu zadat libovolnou interirovou teplotu bez vlivu na řešitelnost. Jak je vidět z přiloženého grafu, k odeznění účinků přechodové funkce dochází ve zlomcích sekundy, čímž se uvolní systém a může dojít k přechodovému ději. Jelikož účelem není vyhodnotit numerický přechodový děj, ale chování systému v závislosti na teplotních vlivech, je vždy možné v případě numerické nestability řešení upravit konstantu na pomalejší přechod. První dny, kdy dochází k vlivu přechodového děje, z vyhodnocení vždy vylučuji.



Obr.28

Stejně upravím i okrajovou podmínku vpravo, která pak bude vypadat

$$\begin{aligned}
 -\lambda_S(x) * \frac{\partial T_S(x, t)}{\partial x} & \quad (1.74) \\
 & = \left(\epsilon * \sigma((T(x, t) + 273,15)^4 - (T_{ext} + 273,15)^4) + \alpha_{ext} \right. \\
 & \quad \left. * (-T_{ext} + T_S(x, t)) - \epsilon * qStena(t) \right) * prechodStart(t) \\
 & \quad x = dmax
 \end{aligned}$$

Kde $qStena(t)$ je tepelný tok (Wm^{-2}) osluněním dané stěny a jelikož pracuji s teplotami ve stupních celsia ($^{\circ}\text{C}$) ve vzorci vyzařování musím zohlednit převod na kelviny (K) konstantou + 273,15. Důvod pro uplatnění funkce *prechodStart*(t) zůstává stejný – spojitost podmínek zadání.

Vyřešením rovnice (NDSolve) získám data o průběhu $T_S(x, t)$ a potažmo také $\frac{\partial T_S(x, t)}{\partial x}$, proto si vyjádřím měrný tepelný tok (Wm^{-2}) z interiéru pro konkrétní stěnu jako:

$$qS = -\lambda_S(x) * \frac{\partial T_S(x, t)}{\partial x}, x = 0 \quad (1.75)$$

Toto vyhodnocení zopakují pro všechny stěny i střechu. (značení v modelu držím qJ, qS atd. podle konkrétních ploch)

Pro model s rozumnější dobou vyhodnocení využívám dříve popsáno zjednodušení využívající modelu stěn bez kapacit, což výrazně zrychlí potřebné výpočty.

Prostup podlahou

Pro získání tepelné toku podlahou (viz kapitola *Ztráty (tepelný tok) podlahou*) je zbytečné vyhodnocovat nějak dynamicky. V podstatě se podlaha vždy chová jako lineární systém, přičemž konstantou úměrnosti je tepelná vodivost podlahy ($\frac{1}{R_p}$).

$$qP = \frac{1}{R_p} * (T_i - T_{zem}) \quad (1.76)$$

Kde qP je měrný tepelný tok podlahou (Wm^{-2}), R_p představuje tepelný odpor podlahy ($W^{-1}m^2K$) a T_i, T_{zem} jsou teploty (K). Index zem odpovídá zemi (uvažujeme konstantní teplotu v nezamrzlé hloubce a takové založení objektu, že nejsou relevantní tepelné mosty základy do exteriéru. Index i odpovídá teplotě interiérové, pokud není využíván systém podlahového topení, jinak je to střední teplota v topném okruhu.

Hlavním důvodem pro možnost tohoto vyhodnocení je fakt, že uvažujeme že rozdíl teploty $T_i - T_{zem}$ jako téměř konstantní veličinu, proto se dá vliv tepelných kapacit zanedbat. Pokud by bylo třeba z nějakého důvodu řešit systém s vysoce proměnlivou interní teplotou, nebo by šlo o objekt založený na patkách, kde by měla pod podlahou hlavní vliv teplota exteriérová, musel by se tok podlahou vyřešit modulem pro výpočet stěny.

V závislosti na konkrétní skladbě se pouze liší pro konkrétní objekt které činitele lze započítat do tepelného odporu podlahy, typicky u nových objektů lze uvažovat pouze tepelný odpor vrstvy tepelné izolace $R_p = \frac{d_{iz}}{\lambda_{iz}}$, přičemž pokud nejde o objekt vytápěný podlahovým topením, rozšíří se tento výraz na $R_p = \frac{d_{iz}}{\lambda_{iz}} + \frac{1}{\alpha_{int}}$. U starých objektů může být vrstev řádově více, protože většinou nemají jednu tepelně izolační vrstvu, jejíž tepelný odpor by jasně dominoval.

Jelikož uspořádání modelu mám řešeny tepelné toky budovy před tím, než vyhodnocuji funkce otopné soustavy (což mi umožňuje vyhodnocovat různé konfigurace systému bez opětovných výpočtů pomalé části modelu) volím v případě podlahového topení místo skutečné střední teploty otopné soustavy teplotu interiéru navýšenou o 3 stupně. V případě, že by vyhodnocení další části modelu ukázalo na vyšší teplotu otopné soustavy, pak tuto hodnotu ručně upravím.

Celkový prostup stěnami, střechou i podlahou lze pak pro objekt shrnout jako:

$$\begin{aligned}
Q_{zdi}(t) = & (a * c - S_{oknaJ}) * qJ(t) & (1.77) \\
& + (a * c - S_{oknaS}) * qS(t) \\
& + (b * c - S_{oknaV}) * qV(t) \\
& + (b * c - S_{oknaZ}) * qZ(t) \\
& + (a * b - S_{oknaSTŘ}) * qSTŘ(t) \\
& + qP(t)
\end{aligned}$$

Ventilace

Pro určení ventilačních ztrát volím výpočet ve tvaru

$$Q_{vent}(t) = c_{pvz} * \frac{m_{vz}}{t_{vent}} * (T_{int} - T_{ext}(t)) * (1 - \eta_r) \quad (1.78)$$

Kde $Q_{vent}(t)$ jsou okamžité ventilační ztráty (W), $c_{pvz} = 1003 \text{ (J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1})$ je měrná tepelná kapacita vzduchu, m_{vz} je hmotnost (kg) vzduchu v objektu $m_{vz} = \frac{341}{T_{int}+273} * V$, přičemž objem $V = 0,95 * (a - 2 * dmax) * (b - 2 * dmax) * (c - dmaxStrecha)$. (m^3)

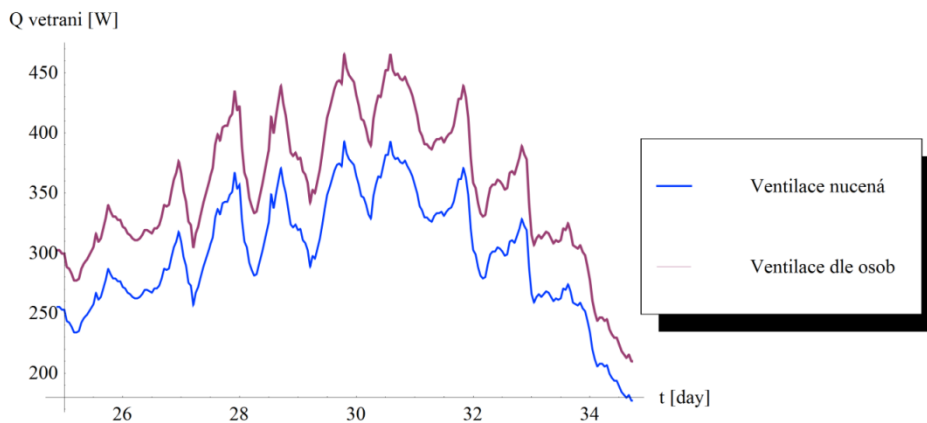
Koeficient 0,95 odpovídá naplněnosti prostoru, (a,b,c) jsou hrany objektu, přičemž jde o rozměry vnější, proto je odečtena tloušťka stěn a střechy. t_{vent} je čas na kompletní výměnu vzduchu v objektu (s) a η_r je koeficient účinnosti rekuperace (-).

Tento vztah se pak pro objekty, kde lze obtížně definovat koeficient výměny vzduchu nahradit empirickým vzorcem:

$$Q_{vent}(t) = k_{vent} * k_r * (T_{int} - T_{ext}(t)) * os \quad (1.79)$$

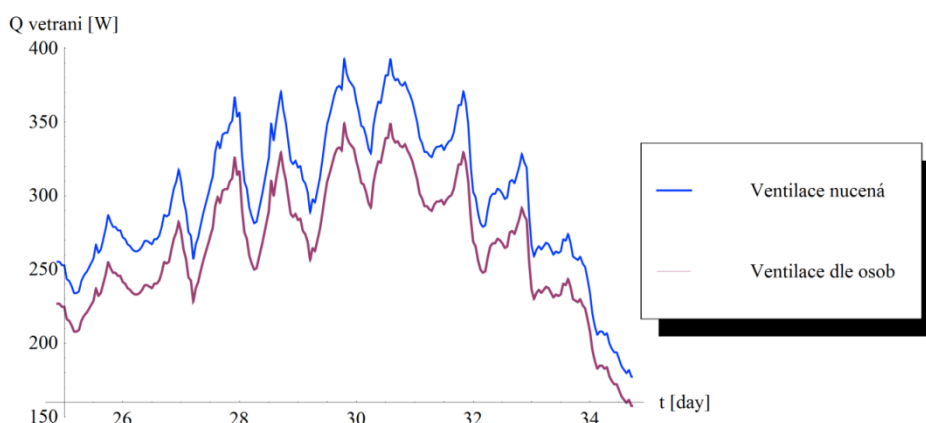
Koeficient os odpovídá počtu uživatelů (-). Koeficient $k_{vent} = 10 \text{ (WK}^{-1})$ je empiricky stanovená odnota, nelze ji fyzikálně odvodit. Koeficient k_r (-) odpovídá snížení ztrát rekuperací (například 50% ventilace přes rekuperaci, která má účinnost 80% znamená koeficient 0,6).

Pro srovnání uvádím vzorové grafy pro jeden objekt se šestihodinovou výměnou vzduchu nebo s ventilací podle 4 osob. Pro oba objekty uvažuji stejný podíl rekuperace, aby nebyl výsledek tímto ovlivněn.



br.29

Z grafů lze vyčíst shodný charakter funkce a srovnatelné hodnoty. V dalším grafu uvádím ventilaci dle osob pro 3 osoby:



Obr.30

Z výsledků vyplývá, že šestihodinová výměna vzduchu odpovídá 3-4 osobám aktivně užívajícím objekt, což se jeví jako reálná hodnota.

Ztráty okny

$$Q_{okna}(t) = S_{okna} * U_w * (T_{int} - T_{ext}(t)) \quad (1.80)$$

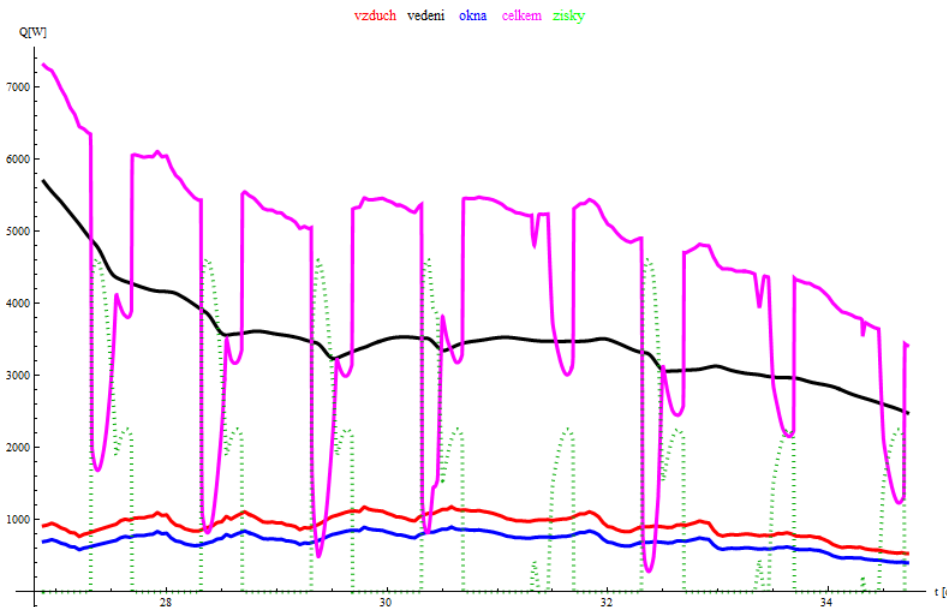
Kde S_{okna} je plocha oken (m^2), U_w je součinitel prostupu tepla daného okna ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$).

Přičemž tento jednoduchý vztah platí pro okna stejného typu na celém objektu, pro okna více typů je třeba rozepsat po dílčích plochách.

Celkové ztráty objektu

Celkové ztráty jsou určeny prostým součtem výše uvedeného, přičemž všechny měrné ztráty jsou aplikovány na výměry odpovídajících ploch a zde se sčítají již absolutní velikosti ztrát (a zisků). K výše rozepsaným ztrátám přičítám i „ztrátu“ ohřevu TUV (viz předchozí kapitoly).

$$Q_{celk}(t) = Q_{vent}(t) + Q_{zdi}(t) + Q_{okna}(t) - Q_{slunz}(t) + Q_{TUV} \quad (1.81)$$



Obr.31

Tato první část modelu dává tedy odpověď na otázku velikosti ztrát, v následující části se pak věnuji vyhodnocení systému.

7.2.3. Otopná soustava

Pro vyhodnocení otopné soustavy je třeba vzít v úvahu známé veličiny. Pro potřeby modelu potřebujeme znát parametry k_{top} a m_1 z hlediska schopnosti předat teplo interiéru

$$Q_{top} = k_{top} * \frac{T_{11} - T_{budova} - (T_2 - T_{budova})}{\ln \frac{T_{11} - T_{budova}}{T_2 - T_{budova}}} \quad (1.82)$$

$$Q_{top} = m_1 * c_{pw} * (T_{11} - T_2) \quad (1.83)$$

Většinou známe nominální teplotu T_{11} na kterou je topná soustava postavena a minimálně díky vyhodnocení v předchozím bodě známe maximální ztráty objektu Q_{top} . Pro zjednodušení značím $\Delta_1 = T_{11} - T_{budova}$, $\Delta_2 = T_2 - T_{budova}$. Z výše uvedeného vztahu bych obdržel jednoduše hodnoty „optimální“, tedy při jakých hodnotách T_2 , k_{top} a m_1 by byly tepelné ztráty objektu právě uspokojeny. Proto zavádím druhý krok výpočtu, kde definicí vztahu mezi Δ_1 a Δ_2 , kdy budu definovat, že $\Delta_2 = 0,7 * \Delta_1$, jinými slovy přinutím systém menšímu tepelnému spádu a k rychlejšímu průtoku. Výsledkem bude otopný systém odpovídající realitě, hodnoty z tohoto kroku budu interpretovat jako skutečný k_{top} a maximální m_1 .

Samozřejmě, v případě, že je pro daný objekt známá konstanta topení, či další veličiny, vyjmu je z vyhodnocení a dosadím přímo.

7.2.4. Zemní výměník

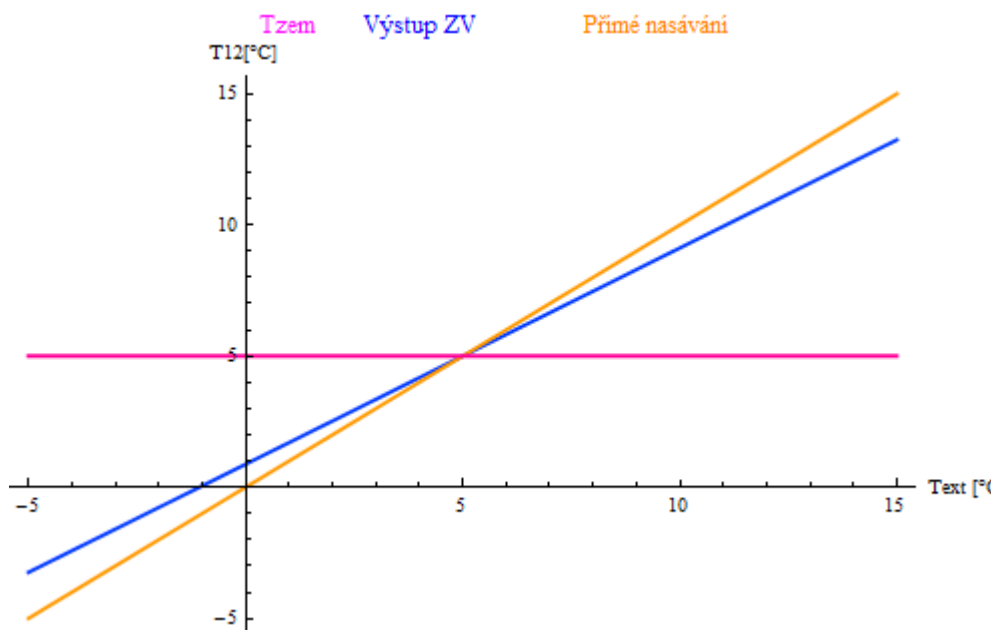
Zemní výměník lze do modelu začlenit poměrně jednoduše z hlediska výpočtu. Na základě parametru konstanty výměníku a hmotnostního průtoku (obojí jsou základní parametry instalace a tedy předpokládám jejich znalost, případně konstanta výměníku je předmětem optimalizace) můžu vyhodnotit chování. Popis rovnicemi je obdobný jako u otopné soustavy

$$Q_{ZV} = kS_{zem} * \frac{T_{zem} - T_{ext} - (T_{zem} - T_{12})}{\ln \frac{T_{zem} - T_{ext}}{T_{zem} - T_{12}}} \quad (1.84)$$

$$Q_{ZV} = m_6 * c_{pv} * (T_{ext} - T_{12}) \quad (1.85)$$

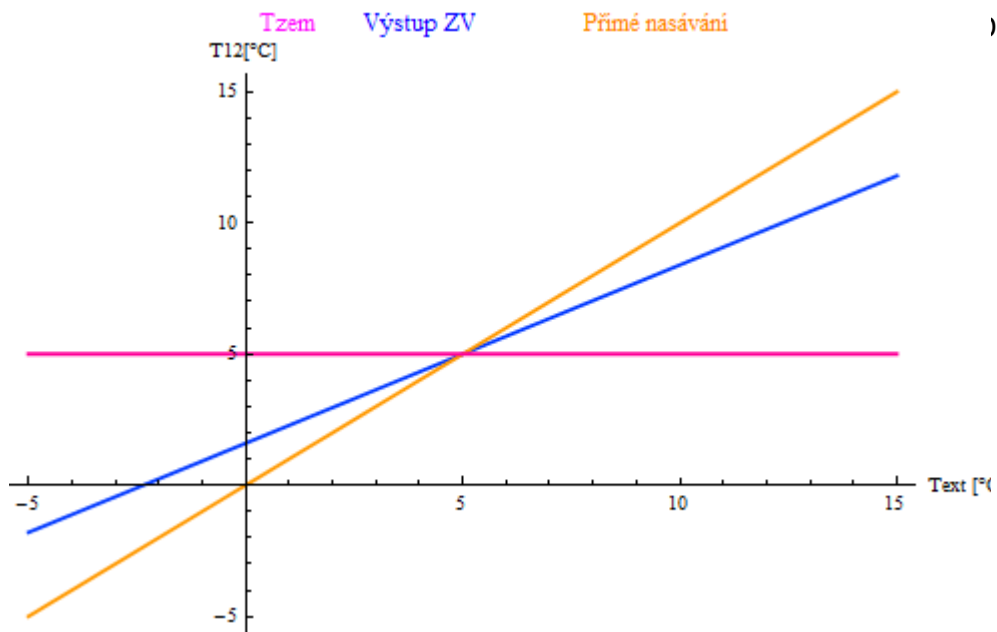
V chování zemního výměníku je ale třeba ošetřit jednu nepravidelnost a to takovou, že pro $T_{ext} > T_{zem}$ by zemní výměník působil jako chladič. To by byla žádaná funkce, kdyby šlo o nasávání do klimatizace, zde uvažuji zemní výměník jako nasávání pro vytápění a tedy v případě $T_{ext} > T_{zem}$ sepne nasávání přímo a $T_{12} = T_{ext}$. Tento princip je zachycen na následujícím grafu, kdy přesně pro $T_{ext} = T_{zem}$ nastává situace, že T_{12} je stejná z přímého nasávání i z výměníku.

Varianta $kS_{zem} = 400$:



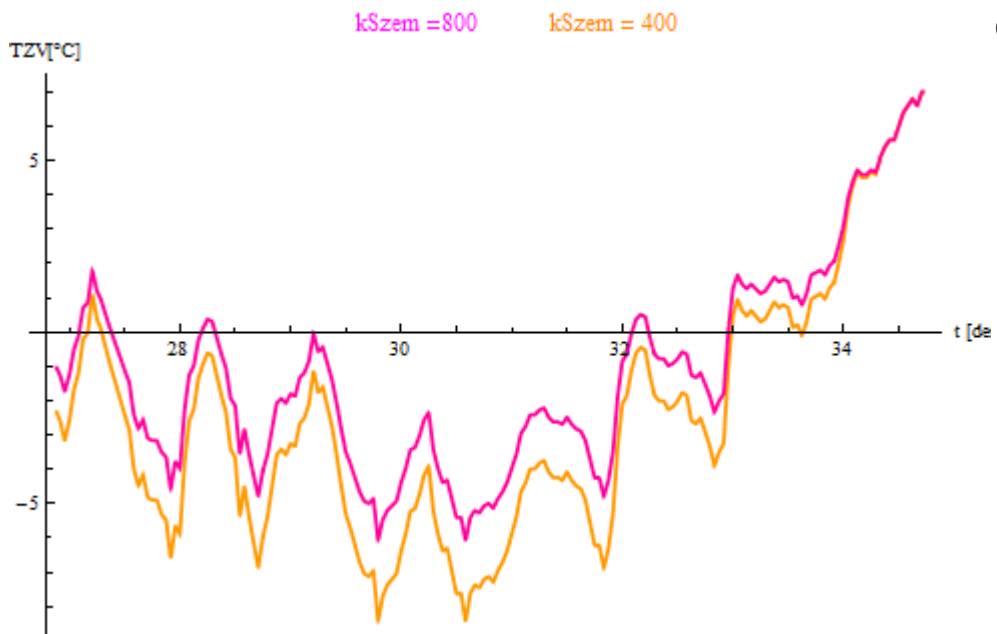
Obr.32

Varianta $kS_{zem} = 800$:



Obr.33

Pro názornost uvádím pro dvě různé hodnoty kS_{zem} , což se projeví v teplotě nasávání takto:



Obr.34

Pro názornost jsem v tomto vyhodnocení volil teplotu země 5°C, v běžném vyhodnocení volím zpravidla více. Jelikož konstanta kS_{zem} je úměrná investiční náročnosti výměníku je to jedna z optimalizovatelných položek v návrhu energetického managementu.

7.2.5. Tepelné čerpadlo

V případě tepelného čerpadla postupuji směrem, že si z katalogových listů daného čerpadla převedu body charakteristiky elektrického příkonu a topného výkonu v závislostech na teplotách vstupu a výstupu tepelného čerpadla. Takto lze obecně vložit libovolné tepelné čerpadlo. Hodnoty mezi udanými body doplním interpolací.

V modelu poté definuji rovnici popisující chování tepelného čerpadla vůči soustavě:

$$m_5 * c_{p_w} * (T_{10} - T_9) = Q_{TC}(T_{10}, T_{12}) \quad (1.86)$$

Přičemž si definuji na základě jejího řešení nové zobrazení $PTcPel(t, T_9)$, které pro libovolný čas a teplotu vodní zpátečky do tepelného čerpadla přiřadí elektrický a topný výkon tepelného čerpadla.

7.2.6. Solární kolektor

Solární tok oslunění kolektoru ($P_{Sin}(t)$) vyhodnocuji stejně jako oslunění stěn a oken, přičemž využívám v modelu výpočet zohledňující typ kolektoru. Obecně mám definovány koeficienty pro ploché kolektory, selektivně pokovené a trubicové. Jeden koeficient upravuje chování kolektoru jako výměníku:

$$kS_{Solar} = koef1 * S_{Solar} \quad (1.87)$$

Druhý koeficient upravuje míru ztrát kolektoru:

$$P_{Sout}(T_5, T_6, t) = koef2 * S_{Solar} * \left(\frac{T_5 + T_6}{2} - T_{ext}(t) \right) \quad (1.88)$$

Následně lze vyhodnotit rovnici s ohledem na výstupní výkon sol. kolektoru

$$\begin{aligned} P_{kol} &== P_{Sin}(t) - P_{Sout}(T_5, T_6, t) \\ &= kS_{Solar} * \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} \end{aligned} \quad (1.89)$$

Kde $\Delta_1 = T_5 - T_8$ a $\Delta_2 = T_6 - T_7$

Pochopitelně, pro $P_{kol} < 0$ upravuji na $P_{kol} = 0$, protože regulace solárního panelu nebude spouštět oběhové čerpadlo.

7.2.7. Vyhodnocení modelu

V podkapitolách výše jsou uvedeny popisy dílčích částí systému. Celkové vyhodnocení počítá s centrální akumulací nádrží. Objem (potažmo hmotnost vody m_w) této nádrže je jednou z optimalizovatelných položek, jelikož lze prokázat, nutnost dostatečného dimenzování pro využití potenciálu solárního systému, zároveň ovšem není účelné vybavovat automaticky jakýkoli systém objemnou (a drahou) nádrží, pokud plocha a orientace solárních kolektorů neumožní její plné využití.

Pro vyhodnocení definuji vektor:

$$derT7(t, T_7) = \left(\frac{P_{TC} + P_{kol} - P_{top}}{c_{pw} * m_w}, P_{top}, P_{el}, P_{kol}, P_{TC} \right) \quad (1.90)$$

Zároveň definuji regulaci, která zajistí automatický ohřev nádrže na stanovenou teplotu (výchozí hodnotu uvažuji $T_{maxTC} = 50$ (°C), což je teplota použitelná pro většinu uvažovaných otopných soustav). Pokud to topná soustava dovolí a pokud je zajištěn dohřev TUV, lze tuto hodnotu snížit.

Druhá úroveň regulace je nastavena ($T_{maxN} = 85$ (°C)) aby nedocházelo k přehřátí nádrže.

$$derT7sReg(t, T_7) = \left(\frac{P_{TC} + P_{kol} - P_{top}}{c_{pw} * m_w}, P_{top}, P_{el}, P_{kol}, P_{TC} \right) \quad (1.91)$$

První podmínka je ošetřena

$$P_{TC} = 0 \text{ pro } T_7 > T_{maxTC} \quad (1.92)$$

Druhá pak

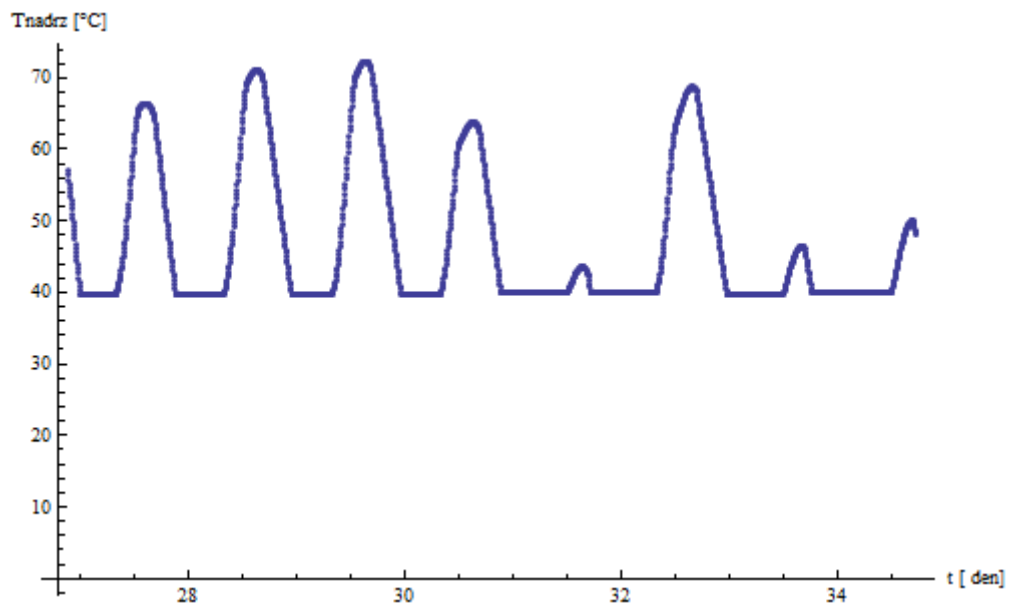
$$P_{kol} = 0 \text{ pro } T_7 > T_{maxN} \quad (1.93)$$

Nyní ve výsledku stačí aplikovat Eulerovu metodu

$$F(t + \Delta t) = F(t) + \Delta t * F'(t) \quad (1.94)$$

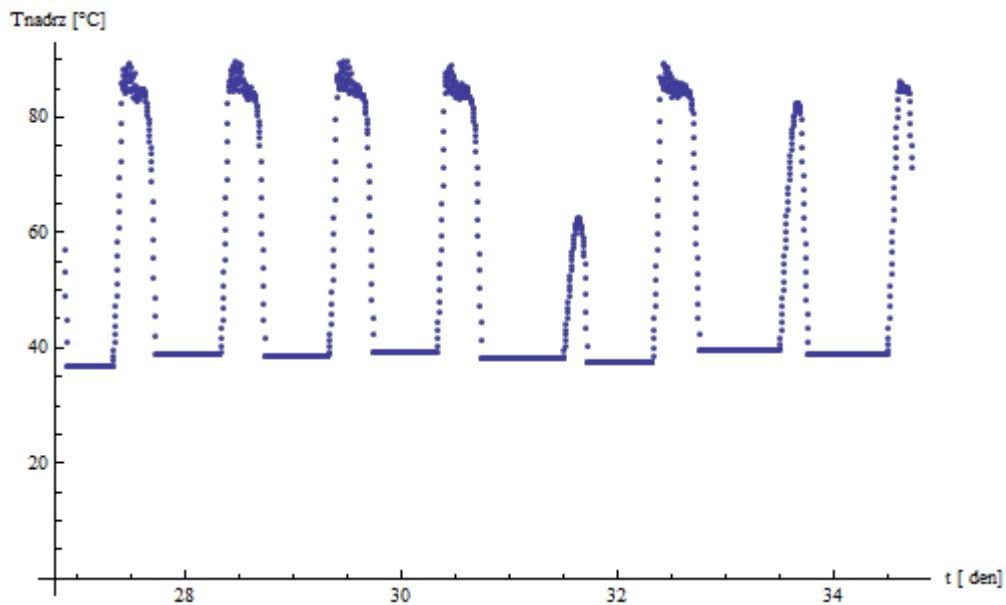
Kde $F'(t)$ odpovídá $derT7sReg(t, T_7)$ a výsledkem jsou všechny veličiny, které jsou na soustavě zajímavé. Celkově lze vyjádřit účinnost celé soustavy jako faktor COP_{celk} , kde se srovnává (obdobně jako u tepelného čerpadla) topný výkon a dodaná elektrická energie.

O chování systému nejvíce vypoví průběh teploty nádrže, jak je vidět, tak ve zvoleném demonstrativním případě nepokrývá zisk ze solárních kolektorů vytápění objektu, ale velikost nádrže a kolektorů se zdá být rozumně vyvážená. (1 000 l)



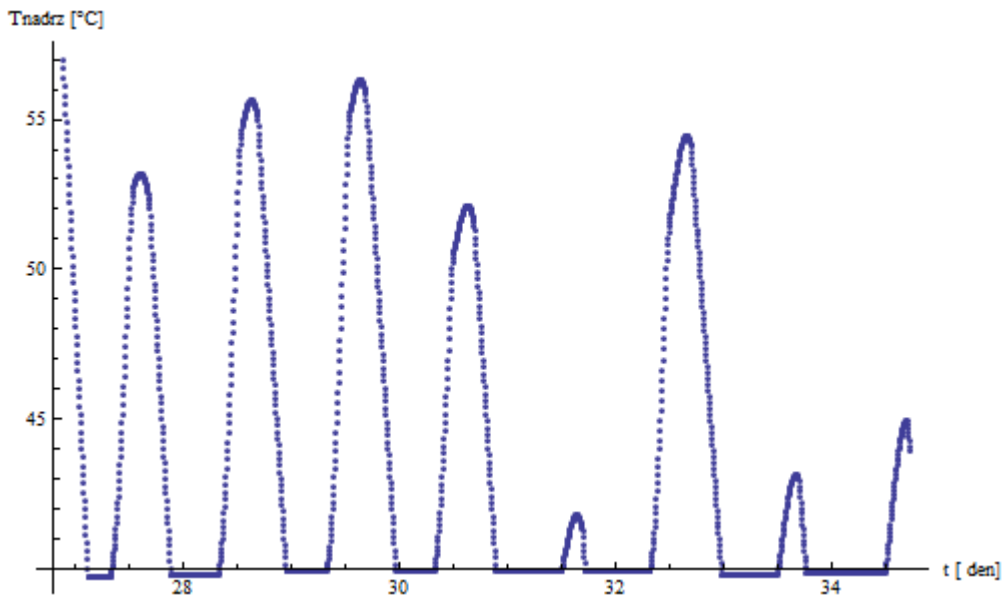
(1.95)

Pro srovnání uvedu graf s výrazně poddimenzovanou nádrží (150 l)



Obr.35

A s nádrží výrazně předimenzovanou (2 000 l)



Obr.36

Vyhodnocení vhodnosti osazení je nutno provést na podstatně širším vzorku, ideálně pro celoroční provoz, tam lze ale srovnat maximálně COP_{celk} , na grafech by nevyniklo chování nádrže.

Malá nádrž působí jako omezující faktor pro uskladnění energie a zároveň dochází k velmi rychlému vyčerpání akumulované energie. Výsledkem je, že topení je zajišťováno převážně tepelným čerpadlem, proto jsou systémy s malou akumulací vhodné pouze pro sestavy, kde je energie solárních kolektorů využívána pouze pro potřeby TUV.

Předimenzovaná nádrž sice fungování systému nijak neomezuje a lze obecně říci, že nemá nikdy negativní vliv na COP_{celk} , ale samozřejmě jde o optimalizaci investičních nákladů a využití prostoru.

7.3. Ekonomické vyhodnocení komplexního modelu

V případě komplexního modelu je řada proměnných podstatně delší, než u modelu základního, proto nelze předepsat jednoduše jeden konkrétní grafický výstup. Z hlediska ekonomiky využívám stále stejnou úvahu

$$\begin{aligned} \text{Celkový náklad} = & \text{investice počáteční} + \text{investice na obnovu (dle délky vyhodnocení)} + \\ & \text{celková cena za energii} \end{aligned} \quad (1.96)$$

Přičemž postupuji tak, že investice počítám v současných cenách a ceny energií dopočítávám dle vztahu

$$\sum_{i=0}^{T-1} \left(\frac{\text{cena}E * E_{TOP}}{COP_{celk}} + Pa \right) * \frac{E_{inf}^i}{inf^i} * red \quad (1.97)$$

Rozdíl v tomto případě je v tom, že model umožňuje měnit řadu parametrů a tedy když chci provést komplexnější vyhodnocení provedu to pro několik hodnot jednoho parametru, zatímco ostatní zůstávají konstantní, případně se mění dvojice vzájemně souvisejících parametrů. Výsledkem je pak tabulka, kde lze odečíst různé vlivy jednotlivých parametrů na

dlouhodobou ekonomiku provozu. Jelikož vyhodnocení v tomto případě zabere více času neuvádím zde příklad nějaké fiktivní tabulky. Místo toho zařazuji jako následující kapitolu příkladovou studii, kde jsou uvedeny vstupy, výstupy i srovnání.

8. Příkladová studie 1

8.1. Definice objektu

Pro příkladovou studii 1 využívám existující objekt rodinného domu, který v roce 2010 postavil kolega v obci Petřvald. Jako modelový rok pro vyhodnocení беру rok 2012, kdy kolega monitoroval spotřebu energií a mám tedy soubor referenčních hodnot pro srovnání s výsledky modelu. Výhodou je rovněž fakt, že díky nedávné realizaci jsou k dispozici všechny údaje o stavbě a skladby stěn.

Objekt je přízemní dřevostavba půdorysu 15x10m vytápěná elektrokotlem, topení zajišťuje systém nízkoteplotního podlahového topení. Objekt je větrán rekuperačně (75% účinnost) a využívá teplovodní kolektory pro přitápění a přípravu TUV plochého typu se selektivním pokovením o ploše 3* 2,1m². Jako centrální akumulční prvek slouží nádrž o objemu 300l.

8.2. Vyhodnocení zjednodušeného modelu

8.2.1. Model ztrát a chování tepelného čerpadla

Pro vyhodnocení zadávám základní údaje do modelu tepelného čerpadla.

Plocha pláště $S = 411\text{m}^2$

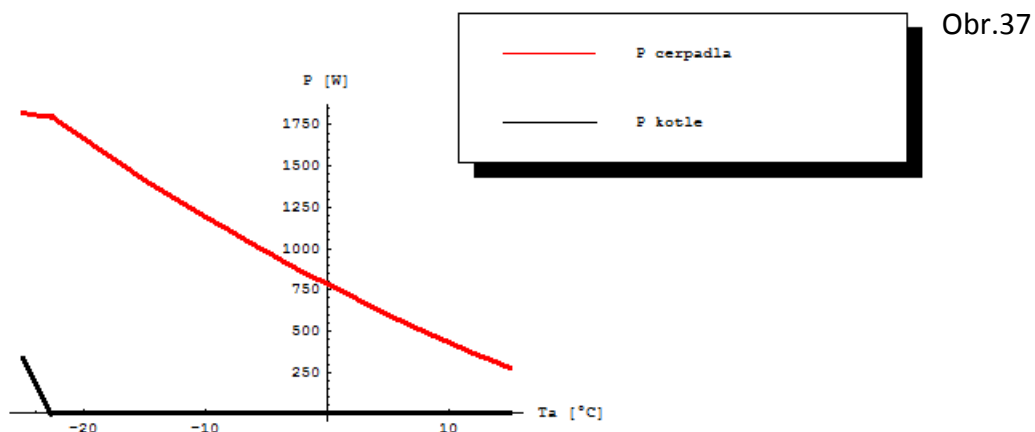
Počet osob $os=3$, vzhledem k využití objektu zanedbávám rekuperaci.

„Zdivo“ tloušťky 15cm, izolace rovněž.

Tepelné čerpadlo (voda/voda 7kW topného výkonu), charakteristiky opsány z katalogového listu.

Projektovaný spád podlahového topení 35/30 stupňů při externí teplotě 0°C.

Prvním výsledkem je průběh bivalence:



Zde je vidět, že zvolené tepelné čerpadlo (voda/voda 7kW topného výkonu) je pro objekt více než dostatečné, vzhledem k tomu, že se jedná v dané modelové řadě o nejnižší typ je nejvhodnější volbou. Tento objekt má však tak nízké ztráty, že by místo plnohodnotného tepelného čerpadla šly použít i splitové klimatizační jednotky vzduch/vzduch.

Výsledek tohoto velmi jednoduchého modelu ztrát udává roční spotřebu 13 333 kWh, což je o 59% více, než je evidovaná spotřeba objektu (8376 kWh), ovšem v tomto případě není nijak zohledněna funkce slunečních kolektorů, tedy jde o výsledek poměrně dobře odpovídající a výsledky tohoto modelu lze vzít za bernou minci ve směru základních úvah o dimenzování a typech plánovaných zařízení.

Vyhodnocení ekonomiky – základní model

V tomto konkrétním případě eliminuji z vyhodnocení variantu izolování objektu. Objekt je nějak postaven a vyhodnotím pouze volbu vhodného zdroje tepla. Vyhodnotím vzorový úsek 15 let, zdražování energií tempem 4% při 0% inflaci a výsledek je následující:

Elektřina:	552 000 Kč
Plyn:	492 000 Kč
Dřevo:	369 000 Kč
Tepelné čerpadlo:	432 000 Kč

V případě volby 15-letého vyhodnocení, zdražování energií 4%, inflace 2% jsou výsledky následující:

Elektřina	477 000 Kč
Plyn	426 000 Kč
Dřevo:	321 000 Kč
Tepelné čerpadlo:	408 000 Kč

Výsledkem tedy je, že pokud bychom uvažovali vyhodnocovaný model bez solárních panelů, pak z jednoduchého vyhodnocení vychází jako nejlevnější zdroj topení dřevem, výhodnost ostatních variant je poměrně závislá na volbě inflačních parametrů a rozdíly nejsou natolik výrazné, aby šlo učinit jednoznačné závěry, obecně ale jsou parametry objektu takové, aby stálo za zvážení užití tepelného čerpadla.

8.3. Vyhodnocení komplexního modelu

8.3.1. Zdrojová data - počasí

Prvním krokem je import dat o počasí. Importuji data pro Ostravu (Petřvald sousedí s Ostravou), konkrétně průběh teplot a zamračenost. Využívám databáze přístupné ze softwaru Mathematica. Data ukládám v nejvyšším dostupném rozlišení, v tomto případě po půlhodinách (je třeba vždy pro danou lokaci zkontrolovat, někde jsou data k dispozici třeba jen v tříhodinových intervalech). Pro půlhodinové snímkování upravuji koeficient kT (počet údajů za hodinu).

8.3.2. Sluneční toky a úprava zdrojových dat

Nad získanými daty o počasí provádím úpravu ve smyslu odfiltrování dat s nezjištěnou hodnotou (N/A). Pro zamračenost nahrazuji 50% zamračeností, pro teplotu nahrazuji průměrem sousedních buněk. V případě zamračenosti vykazují data hodnotu N/A více hodin po sobě, typicky v noci, proto není použitelný průměr. Naopak teplota vykazuje občasný jednohovorový výpadek, takže průměr sousedních hodnot lze využít a je vypovídající.

V případě, že teplota vykazuje vícevzorkový výpadek měním podmínku úpravy na zachování konstantní teploty do nalezení další numerické hodnoty.

Výpočet slunečních toků

Zeměpisná šířka = 49,95°

Orientace (odklon) domu = +15° (tedy JJZ)

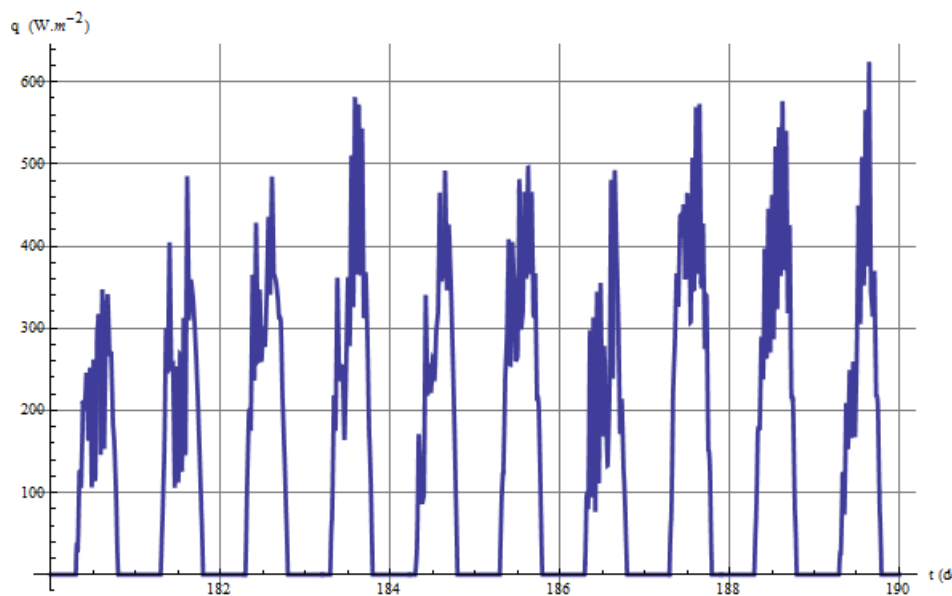
Sluneční konstanta $P_0=1050 \text{ (W.m}^{-2}\text{)}$

Sluneční konstanta 1350 W.m^{-2} je redukována, uvažuji zde jednoduchou aproximaci (viz kapitola o slunečním toku), kdy přímá složka spočítaná na základě nadmořské výšky a činitele znečištění (940) je navýšena o cca 12%, které kompenzují nezapočítanou difúzní složku. Matematicky lze jednoduše definovat výpočet s přesnou hodnotou přímé i difúzní složky, v praxi je to využitelné pouze pro několik dní, protože výpočet je již příliš pomalý.

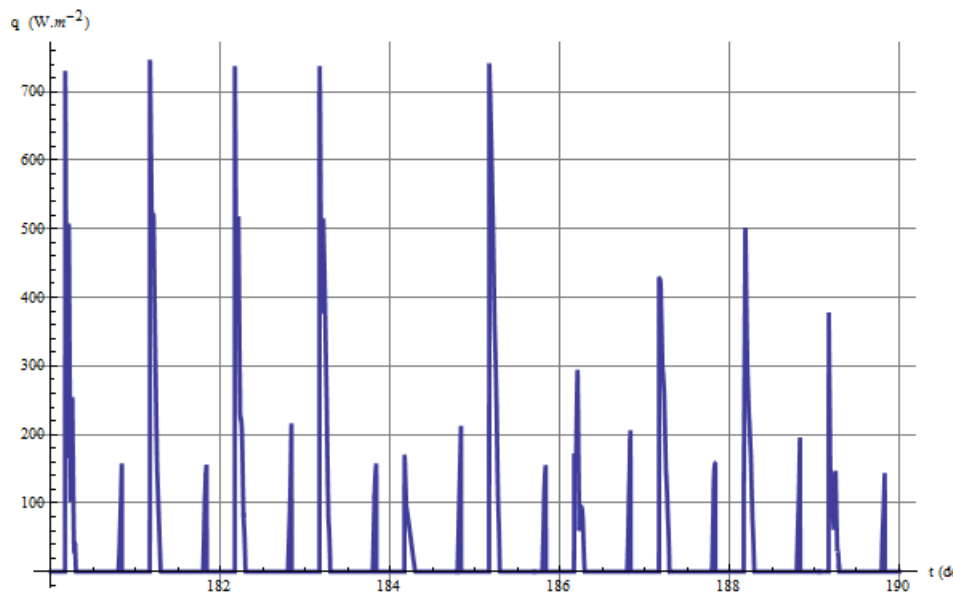
Sklon střechy 25°, jednostranný směrem na JJZ, na střeše umístěn kolektor se stejnou orientací, sklon kolektoru 30°.

Výstupem této části modelu jsou jednotkové sluneční toky na všechny stěny a kolektor, zároveň ukládám zpracovaný průběh teplot.

Pro názornou představu dále vkládám průběhy oslunění jižní a severní stěny v náhodně vybraném desetidenním intervalu.

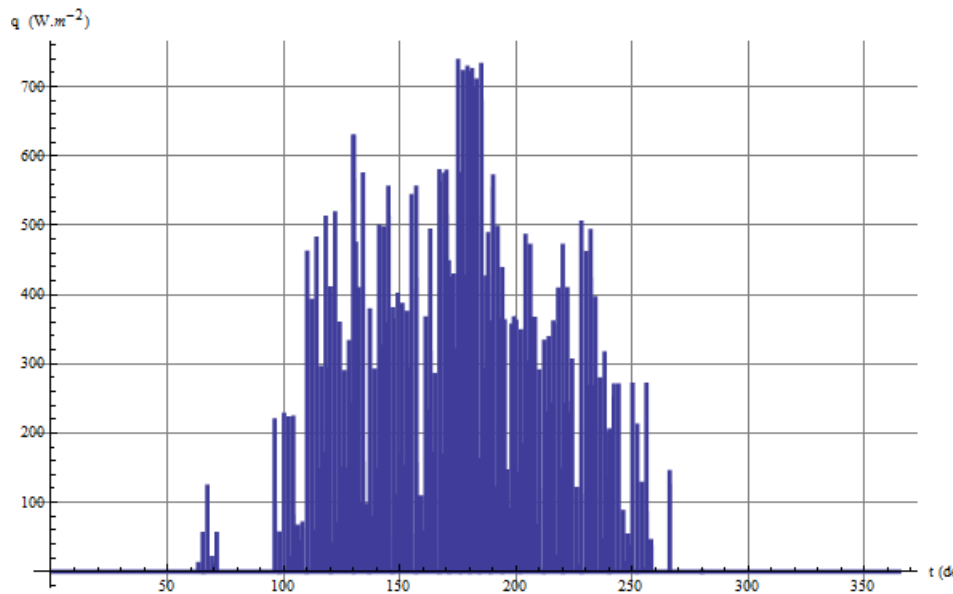


Obr.38



Obr.39

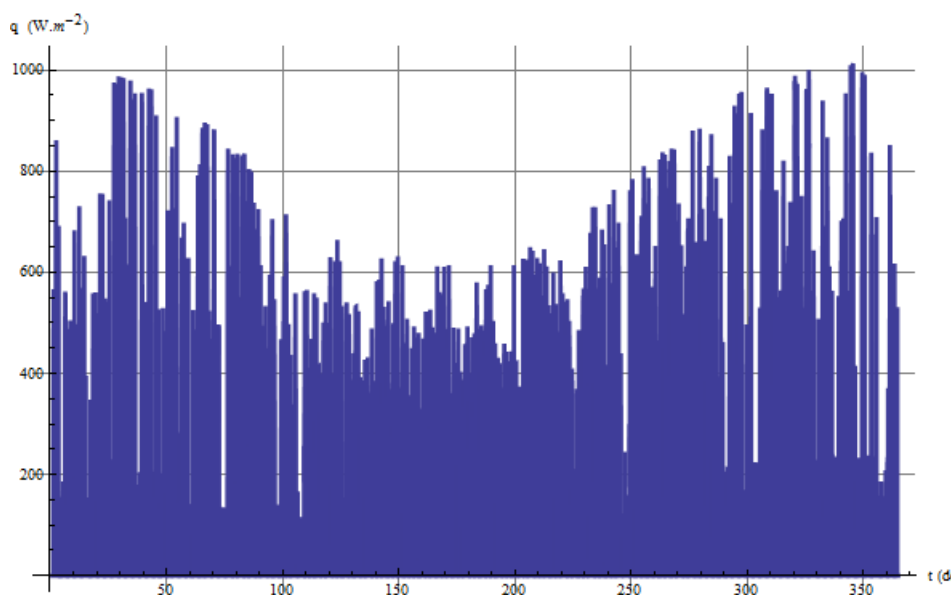
Z hlediska vyhodnocení je zajímavý pohled na severní stěnu (přesněji SSV), kdy lze jasně odečíst, že i severní stěna je během léta ráno a večer osluněná, což odpovídá skutečnosti, že se nacházíme nad obratníkem Raka. V tomto případě je oslunění významnější ráno díky orientaci stavby. Když analyzuji celoroční průběh:



Obr.40

Pak z hlediska energetické bilance je toto oslunění vůči ostatním stěnám zanedbatelné a k oslunění dochází hlavně v měsících mimo topnou sezónu, přesto zde při již 15° odklonu dochází k oslunění i v březnu a dovolí-li to oblačnost, tak i v říjnu. Proto jsem se rozhodl oslunění této stěny vždy vyhodnotit. Důvod, proč to tu tak dlouze rozebírám je ten, že jsem se setkal s modely, které v rámci jednoduchosti vyražovaly z výpočtů stěny s odklonem pod určitý úhel od severu (typicky 30° či 45°) a i zde by to samozřejmě výpočet urychlilo, ale vyhodnocení této části probíhá pro daný objekt jen jedenkrát a model dál pracuje jen s exportovanými daty, tak jsem korektní výpočet ponechal beze změn.

Ještě bych se zastavil u oslunění jižní stěny:



Obr.41

Zde je krásně vidět další aspekt oslunění a to, že z geometrického hlediska je nejlepší konfigurace pro záchyt v zimě, proto lze okna v Jižní fasádě (obzvláště mají-li zastínění proti vysoko postavenému slunci) efektivně využít pro zlepšení energetické bilance. Zároveň ale zimní měsíce vykazují vyšší míru oblačnosti, tak se to nevyplatí zase moc přehánět.

Toky stěnami

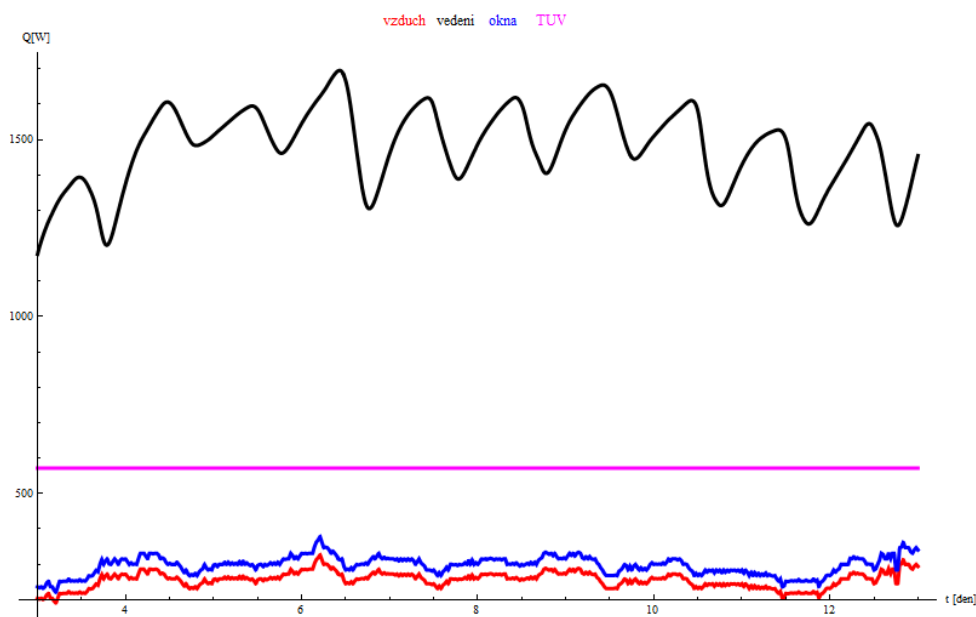
S předzpracovanými daty lze spustit hlavní model budovy. V modelu je třeba vyplnit rozměry, počty a plochy oken, činitele prostupu tepla osazených oken a materiál stěn.

Zde je třeba vzít v úvahu reálnou konstrukci, kdy mezitrámovou izolaci počítám jako kompaktní vrstvu včetně trámů a tedy odpovídajícím způsobem upravuji parametry, zejména tedy tepelnou vodivost volím 0,06 místo 0,04, kterou vykazuje čistá izolace.

Stěna je vybavena vrstvou vnější izolace 150mm, u které již neuvažuji znehodnocení tepelnými mosty.

8.3.3. Výsledek modelu, vyhodnocení funkce

Z hlediska relevantních dat je nejpodstatnější celková spotřebovaná energie a spotřeby energií v dílčích časových úsecích, nejprve se však podívejme na složení ztrát:

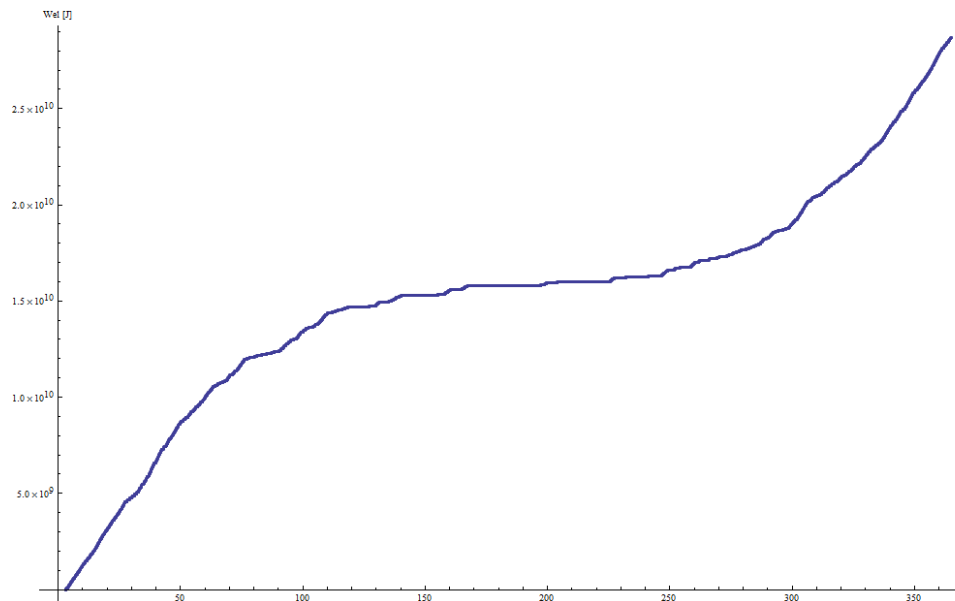


Obr.42

Z grafu vyplývá, že dominantní typ ztrát je vedení stěnami, ale při dostatečném oslunění může docházet i během zimních měsíců naopak k ziskům. Ztráty ventilací a prostupem okny byly ve výsledku srovnatelné, ale pouze proto, že se v daném objektu vyskytuje atypické využívání, jinak by byly ztráty ventilací díky rekupeaci zanedbatelné. Ze srovnání dále vyplývá, že pro objekty s vyšší mírou izolace je příprava TUV jedním z důležitých faktorů celkové energetické spotřeby v objektu. Z tohoto úhlu pohledu se jeví zajímavé tendence využívat rekuperaci energie i pro odpadní vodu, ne jen pro ventilaci.

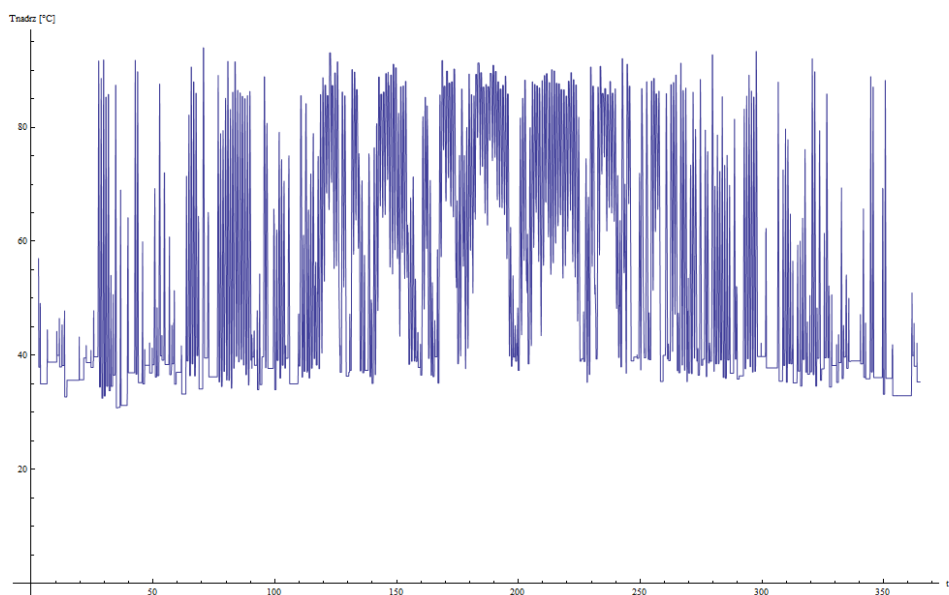
Celková vypočítaná spotřeba elektrické energie činila $2,87 * 10^{10}$ J, tedy přibližně 8 000 kWh.

Roční graf spotřeby přitom vykazuje obvyklý průběh s minimální leč nenulovou spotřebou i v letních měsících.



Obr.43

Zajímavý je rovněž průběh teplot v centrální nádrži, který moc dobře koresponduje se zkušenostmi z provozu. Jasně vyniká nutnost regulace solárního systému, kterou má kolega vyřešeno automatickými roletami na panelech.



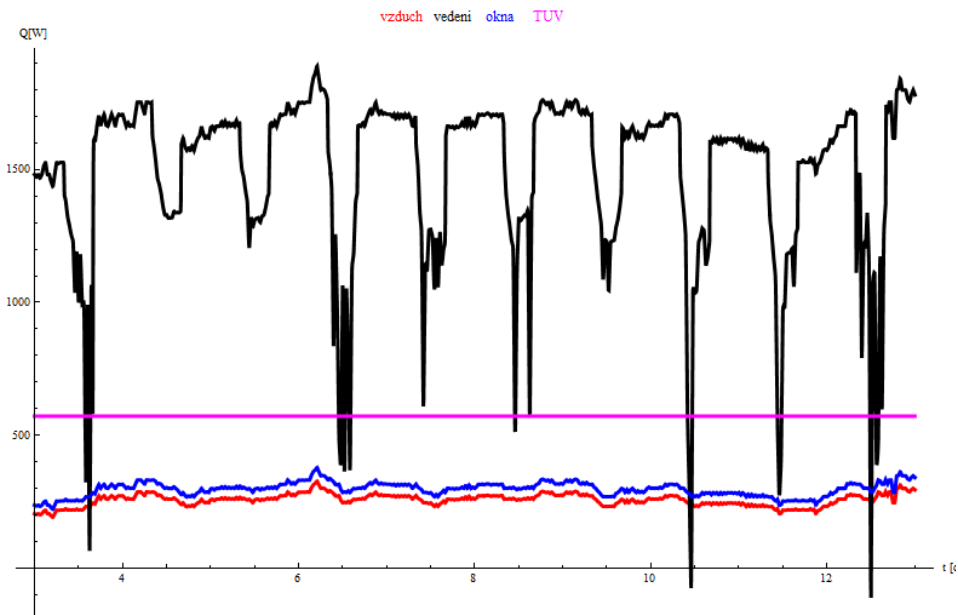
Obr.44

Zároveň ovšem již na první pohled vyniká špatný poměr objemu nádrže s ohledem na to, že není schopná akumulovat dostatečné množství energie pro plné využití solárního systému ani ve slunečné dny zimních měsíců.

Tento komplexní model včetně vyhodnocení kapacit vyhodnocuji pro daný objekt jen jedenkrát, abych měl referenční bod. Z důvodů velké výpočetní náročnosti se na běžnou práci nehodí a dále využívám o stupeň zjednodušený model bez tepelných kapacit objektu.

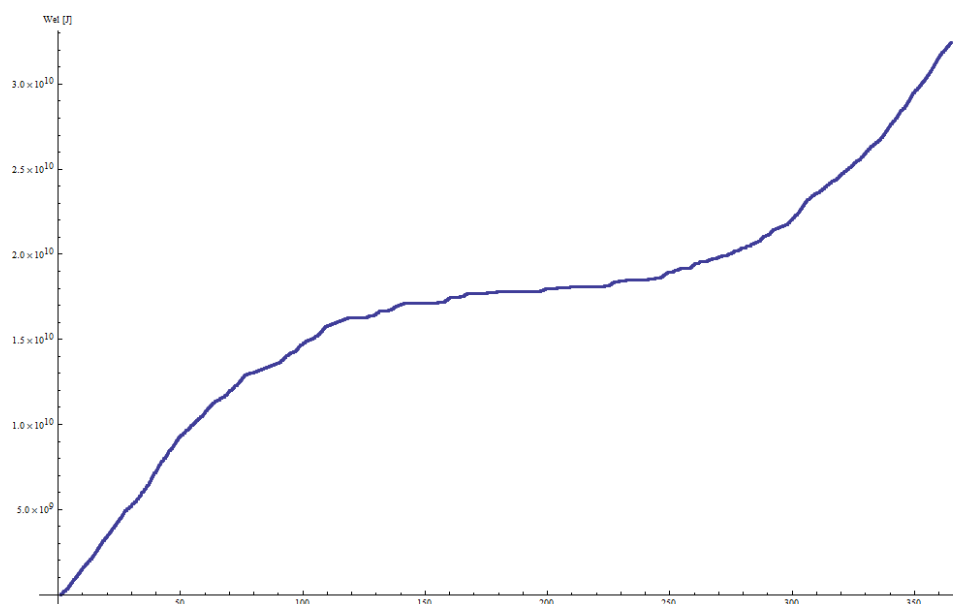
Srovnání výsledků zjednodušeného modelu:

Hned první graf odpovídá na otázku v čem je hlavní odchylka chování modelu. Jelikož i v bezkapacitním modelu počítám pořád stejným systémem oslunění, je právě průběh tepelného toku stěnami nejvíce ovlivněn neexistencí kapacit. Proto na průběhu vidíme ostré minima odpovídající oslunění objektu.



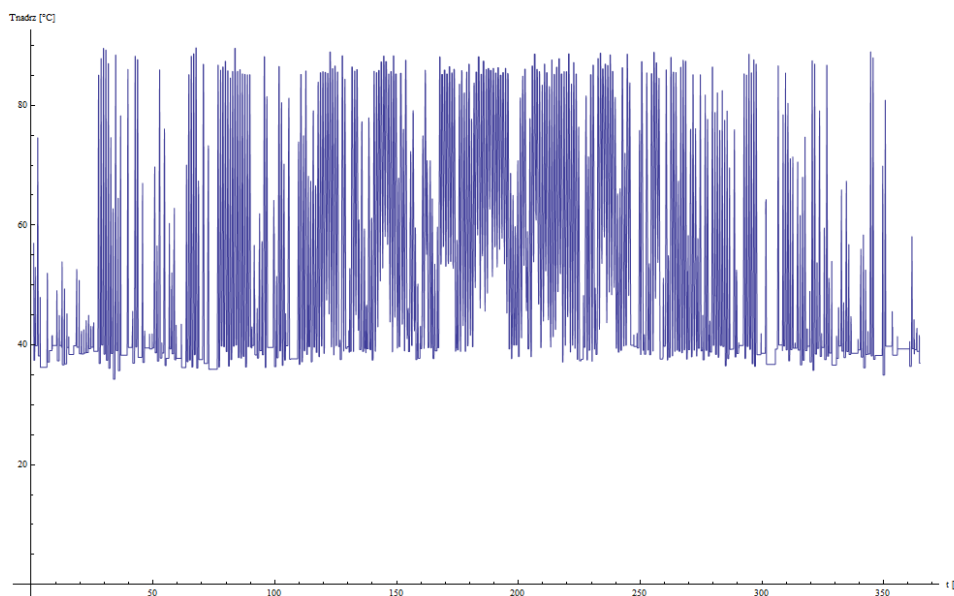
Obr.45

Přitom graf spotřeby vychází velmi podobně, opět s odpovídajícím tvarem vzhledem k topné a netopné sezóně.



Obr.46

Jak je vidět na následujícím grafu teplot v nádrži dochází k vyšší oscilaci, ale charakter průběhu je opět velmi podobný.



Obr.47

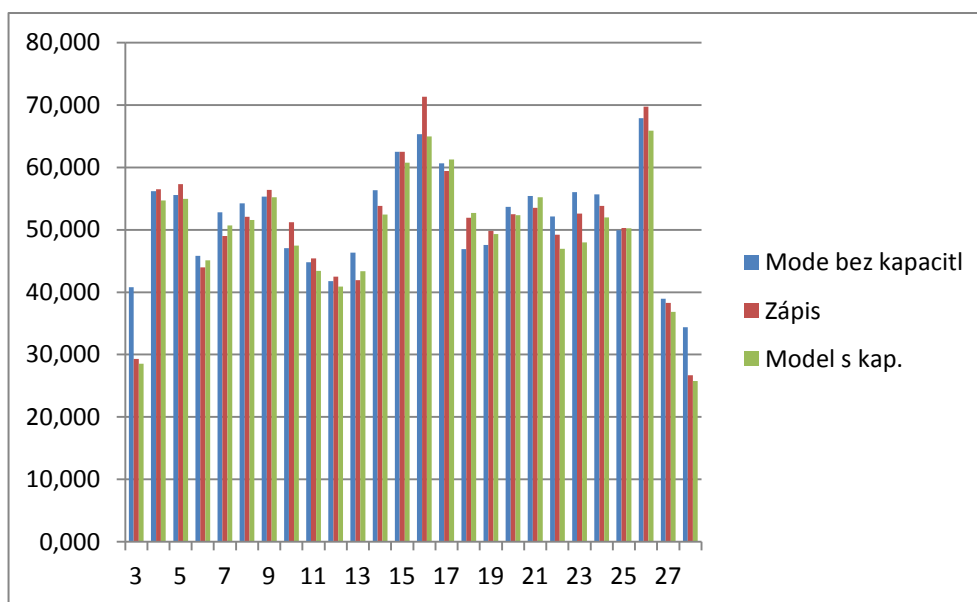
Hlavním srovnávacím kritériem bude pochopitelně spotřebovaná energie, proto uvedu část srovnávací tabulky (plná verze v příloze):

Den	Model bez kapacit		Model s Kapacitami		Data z objektu	
	Spotřeba [kWh]	Denní [kWh]	Spotřeba [kWh]	Denní sp. [kWh]	Spotřeba [kWh]	Denní sp. [kWh]
1	24,863	24,863			23,6	23,6
2	56,793	31,930			56,8	33,2
3	97,566	40,773	28,532	28,53	86,1	29,3
4	153,736	56,170	83,244	54,71	142,6	56,5
5	209,285	55,549	138,167	54,92	199,9	57,3
6	255,097	45,812	183,254	45,09	243,9	44
7	307,901	52,804	233,956	50,70	292,9	49
8	362,117	54,216	285,539	51,58	345	52,1
9	417,428	55,311	340,720	55,18	401,4	56,4
10	464,497	47,069	388,165	47,44	452,6	51,2
11	509,280	44,783	431,583	43,42	498	45,4
12	551,025	41,745	472,503	40,92	540,5	42,5
13	597,350	46,324	515,872	43,37	582,4	41,9
14	653,696	56,347	568,294	52,42	636,2	53,8
15	716,190	62,494	629,028	60,73	698,7	62,5
16	781,494	65,303	693,982	64,95	770	71,3
17	842,135	60,641	755,255	61,27	829,4	59,4
18	889,047	46,913	807,961	52,71	881,3	51,9
19	936,636	47,589	857,291	49,33	931,1	49,8
20	990,312	53,676	909,602	52,31	983,6	52,5

Den	Model bez kapacit		Model s Kapacitami		Data z objektu	
	Spotřeba [kWh]	Denní sp. [kWh]	Spotřeba [kWh]	Denní sp. [kWh]	Spotřeba [kWh]	Denní sp. [kWh]
345	7908,411	40,182	6906,502	33,01	7275,34	36,1
346	7948,875	40,464	6939,670	33,17	7311,44	36,1
347	8015,641	66,766	7006,105	66,44	7377,14	65,7
348	8080,017	64,376	7068,736	62,63	7443,14	66
349	8150,867	70,850	7137,879	69,14	7515,54	72,4
350	8202,011	51,144	7182,327	44,45	7561,54	46
351	8240,446	38,436	7215,687	33,36	7594,14	32,6
352	8290,963	50,516	7267,960	52,27	7645,64	51,5
353	8344,238	53,276	7319,481	51,52	7700,94	55,3
354	8388,979	44,740	7361,608	42,13	7742,54	41,6
355	8443,939	54,961	7414,885	53,28	7800,34	57,8
356	8499,732	55,792	7468,709	53,82	7857,74	57,4
357	8561,150	61,418	7527,289	58,58	7920,64	62,9
358	8631,456	70,306	7594,218	66,93	7990,34	69,7
359	8702,689	71,233	7664,576	70,36	8058,24	67,9
360	8769,577	66,888	7732,031	67,45	8130,44	72,2
361	8827,912	58,335	7791,095	59,06	8189,84	59,4
362	8867,815	39,903	7830,978	39,88	8231,44	41,6
363	8914,907	47,093	7874,991	44,01	8278,94	47,5
364	8960,202	45,294	7919,873	44,88	8323,84	44,9
365	9010,953	50,751	7969,071	49,20	8376,84	53

Model bez kapacit tedy dává výslednou sumu zhruba 9 000 kWh, model s kapacitami 8 000kWh (v tomto modelu jsem vyloučil z vyhodnocení první 2 dny, kdy se projevuje přechod od počátečních podmínek) a reálná spotřeba objektu byla naměřena 8376 kWh.

Celkově byla koncepce modelu ověřena. Objekt po prvním výpočtu (ten zde neuvádím) vykazoval vyšší ztráty, které odpovídají provozu objektu oproti výsledkům obou modelů. Dle konzultace s uživatelem dochází k vyšším ventilačním ztrátám z důvodů vysoké frekvence pohybu osob a psů dveřmi. Model byl proto náležitě upraven (vyšší ventilace, menší podíl rekuperace), poté již výsledky jak je vidět z tabulky velmi dobře odpovídají. Celková odchylka je +7% pro model bez kapacit a -3,5% pro model s kapacitami. Pro názornost vkládám i graf se srovnáním vypočtených hodnot se zápisem, opět pro časový úsek dovolující přehledné srovnání.



8.3.4. Celkové zhodnocení objektu, ekonomické vyhodnocení alternativ

Poté, co jsem v předchozí kapitole provedl vyhodnocení a srovnání alternativ výpočtů budu dále využívat zjednodušený model bez kapacit, který umožňuje rychlé vyhodnocení.

Nejprve se podívám na dimenzování solárního systému a akumulční nádrže, následně zapojím do vyhodnocení alternativní zdroj v podobě tepelného čerpadla:

Varianta	Plocha kolektorů	Objem nádrže	Investice	Spotřeba	Roční úspora	Orientační návratnost	Cena kWh
Srovnávací	6,3	300	0	9010	0,00		2,7
Stávající vytápění - elektrokotel							
1	6,3	800	15000	8333,333	1827,00	8,21	
2	10,5	800	39000	6444,444	6927,00	5,63	
3	14,7	1000	67000	5138,889	10452,00	6,41	
Tepelné čerpadlo							2,5
4	6,3	300	115000	3250	16202,00	7,10	
5	6,3	800	130000	3138,889	16479,78	7,89	
6	6,3	500	120000	3194,444	16340,89	7,34	
7	8,4	500	132000	2861,111	17174,22	7,69	
Tepelné čerpadlo + zemní výměník							
8	6,3	300	155000	3222,222	16271,44	9,53	
9	6,3	500	160000	3166,667	16410,33	9,75	

V této tabulce uvažuji nejjednodušší možný indikátor návratnosti a to čistě investiční náklady dělené roční úsporou. Jak jsem psal dříve v obecném popisu vyhodnocení, řeším toto jinak. Započítám platby s přepočtem na dobu investice, ale tento jednoduchý přehled v tabulce má tu výhodu, že rychle identifikuje směry, kterými má smysl se ve vyhodnocení vydat.

Nyní provedu vyhodnocení podle základního předpisu:

$$\text{Celkový náklad} = \text{investice zdroj tepla} + \text{celková cena za energii} \quad (1.98)$$

Přičemž postupuji tak, že investice počítám v současných cenách a ceny energií dopočítávám dle vztahu

$$\sum_{i=0}^{T-1} \left(\frac{\text{cena}E * E_T}{\eta} + Pa \right) * \frac{E_{inf}^i}{inf^i} \quad (1.99)$$

Kde $\text{cena}E$ je cena energie Kč/kWh, E_T je roční spotřeba, η je účinnost zdroje. Nikoli tepelného čerpadla, tam mám spotřebu počítanou přímo pro něj, ale využívám údajů o spotřebě elektrokotle k posouzení dalších paliv. Koeficient Pa zahrnuje paušální náklady či úspory (typicky platba za jistič jako plus, úspora na provozu elektrospotřebičů jako minus), E_{inf}^i je koeficient zdražení energií, inf^i je koeficient všeobecné inflace. Paušální platby v tomto případě 3000 ročně za sazbu pro elektrokotel (srovnáno se sazbou D02d, kterou by musel mít vždy), úspora 5 000 ročně na provozu elektropotřebičů. V případě tepelného čerpadla 3600/5300, v případě plynu je uvažován paušál 1500 Kč ročně (eON fix).

Provedl jsem patnáctileté vyhodnocení ($T=15$), $E_{inf}^i = 1,04$, $inf^i = 1,02$. Kromě investičních nákladů uvedených zde v tabulce uvažuji náklad 50 000Kč pro náhradu elektrokotle kotlem plynovým (při existující plynové přípojce) a náklad 0Kč pro přechod na vytápění dřevem, jelikož kolega má krbová kamna s výměníkem, které zprovoznil v sezóně 2013/2014.

Varianta	Plocha kolektorů	Objem nádrže	Investice	Spotřeba	Rozdíl ceny	Celková cena 15 let	Cena energie za kWh
Srovnávací	6,3	300	0	9010	0,00	385000	2,7
Stávající vytápění - elektrokotel:							
2	10,5	800	39000	6444,444	-81000,00	304000	
Tepelné čerpadlo							2,5
4	6,3	300	115000	3250	-159000,00	226000	
6	6,3	500	120000	3194,444	-157000,00	228000	
Další paliva							
Plyn	6,3	300	50000	10600	19000,00	404000	1,8
Dřevo	6,3	300	0	11262,5	-133000,00	252000	1,3

Ze srovnání vychází jasný závěr, v objektu se rozhodně nevyplatí přejít na vytápění plynem, byť cena plynu je stále výhodnější než cena elektřiny. Naopak, instalace tepelného čerpadla vzduch/voda a případně také zvětšení akumulární nádrže se vyplatí zhruba stejně jako přechod na vytápění dřevem. Špatně rozhodně nevychází ani varianta navýšení solárních kolektorů a akumulární nádoby, což má ve srovnání s pořízením tepelného čerpadla tu výhodu, že to vyžaduje relativně malou vstupní investici.

Samozřejmě, toto srovnání vychází ze specifických podmínek, kdyby bylo například potřeba pro vytápění dřevem řešit nový komín a nový kotel nevycházelo by tak výhodně. Samozřejmě zrovna dřevo je velmi specifický zdroj, jelikož cenové podmínky nejsou zdaleka místně a časově ustálené. Ve výpočtu uvažuji cenu běžně dostupného tvrdého dřeva, ale

existují i výrazně výhodnější nabídky. Na druhé straně je vytápění dřevem specifické nutností vložit práci na jeho zpracování, údržbu i topení, finanční hledisko pro tento zdroj tedy není jediným faktorem v rozhodovacím procesu.

Mezi specifické podmínky tohoto objektu je třeba zařadit také to, že s variantou tepelného čerpadla bylo počítáno a úpravy proto nevyhází tak draze.

Do finálního zhodnocení jsem nezahrnul zemní výměník, jelikož již z předběžné kalkulace nevyházal jako dostatečně zajímavá alternativa. Tím, že objekt funguje celoročně s nízkoteplotní otopnou soustavou je funkce tepelného čerpadla dostatečně stabilní i bez výměníku.

9. Příkladová studie 2

Pro druhý vzorový příklad vybírám k vyhodnocení můj vlastní dům. Hlavní motivací pro toto rozhodnutí je opět dostupnost technických údajů a znalost provedení a funkce. Na rozdíl od kolegy nemám pro žádný rok zpracovanou tabulku spotřeby, ale mám odečty spotřeb v náhodných intervalech (4-6x ročně), tedy dostatečně pro ověření modelu.

Výhodou je, že jde o objekt principiálně odlišný a lze tedy předvést další specifika vyhodnocování.

Nebudu opakovat všechny popisy principů a vyplnění využití ve studii 1, zde se zaměřím na to, co je na objektech odlišné.

9.1. Definice objektu

Objekt je postaven jako dvoupodlažní (1NP+podkroví+nezateplená půda). Zdící systém Ytong, střecha zateplena EPS a minerální vatou v tloušťkách 16cm mezitrámové izolace a 10cm plošné izolace. Stěny mají tloušťku 40cm z vysoce izolačních tvárnic Ytong Lambda $\lambda = 0,085$.

Orientace objektu je jižní stěna +15° na východ, střecha sedlová hřeben S-J se sklonem 45°. Na střeše jsou osazeny na západní straně 3 ploché kolektory á 2,55m². Systém vytápění má 300l akumulární nádrž.

Jako primární zdroj tepla slouží kondenzační plynový kotel.

Otopná soustava je tvořena podlahovým topením v 1NP a nízkoteplotní radiátorovou soustavou v podkroví.

Pro správné vyhodnocení objektu je tentokrát nezbytně nutné uplatnit redukující koeficienty zastínění, jelikož je objekt situován v mírném severním svahu a v okolí se vyskytují vzrostlé stromy a jiné objekty.

Zastínění stěn volím tedy 40% jih, 30% sever, 40% západ, 30% východ, 20% západní střecha, 10% východní střecha, 35% redukce zastíněním a znečištěním kolektorů. Činitel využití slunečního toku okny volím 40% (prostup trojsklem a průměrné zastínění).

9.2. Vyhodnocení zjednodušeného modelu

Zdrojové parametry objektu:

Plocha pláště: 369 m²

Plocha oken: 23.92 m²

Počet osob: 2

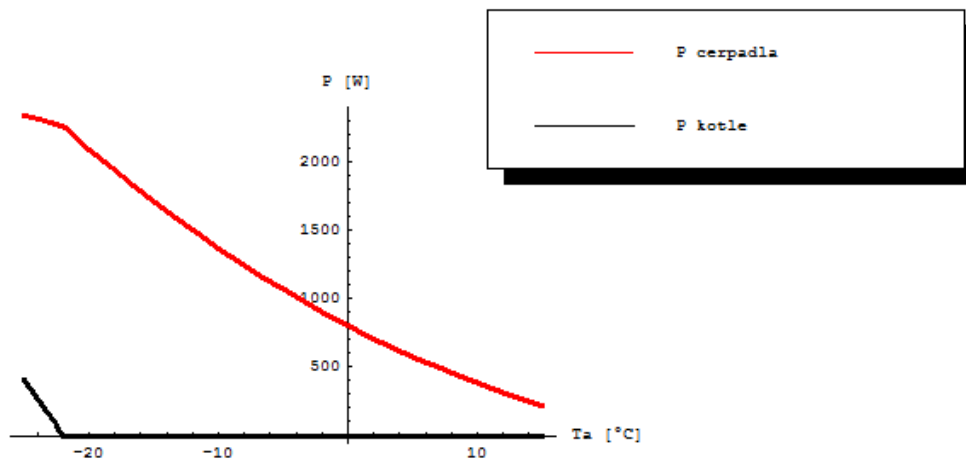
Tloušťka zdi: 40 cm

Měrná tepelná vodivost zdi: 0,085 (Wm⁻¹K⁻¹)

Součinitel prostupu tepla okny: 0,8 (Wm⁻²K⁻¹)

V tomto případě je úvaha jednoduchá z hlediska dimenzování tepelného čerpadla. Pokud uvážím tepelné čerpadlo voda/voda či země/voda, tak výsledek křivky bivalence hovoří

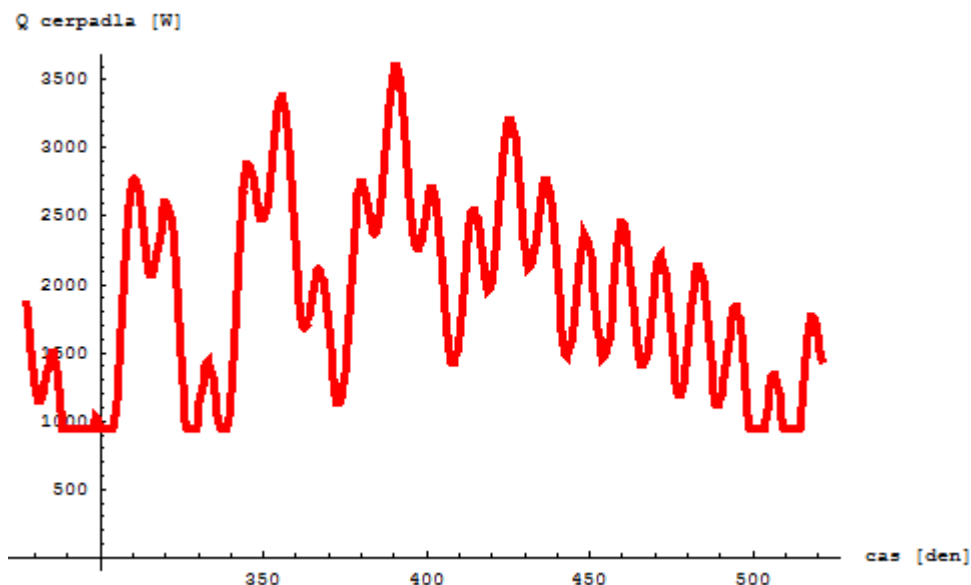
jednoznačně. I při instalaci nejmenšího uvážitelného čerpadla z katalogu Stiebel Eltron vychází bod bivalence do vysoce záporných hodnot venkovní teploty. Uvážil jsem druhé nejmenší (WPF 5) a to jen z toho důvodu, že to absolutně nejmenší (WPF 4) s výkonem kolem 4kW není dostatečně pružné v případě většího odběru TUV.



Obr.49

Tedy ztráty objektu jsou natolik nízké, že v případě TČ se stálým zdrojem tepla k sepnutí bivalentního zdroje fakticky nedochází.

V případě úvahy o osazení TČ typu vzduch/voda je třeba vyjít z jiné úvahy a to z předpokládaného maxima výkonu TČ.



Obr.50

Z grafu lze odečíst maximum na hodnotě přibližně 3,5kW. Jelikož reálný provoz bude občas vyžadovat jistou rezervu vůči této hodnotě budu hledat TČ s topným výkonem A-7/W35 minimálně 6kW. Tomuto kritériu odpovídá TČ WPL 13 (Stiebel Eltron 2014) s výkonem A-7/W35 = 6,77 kW a A2/W35 = 8,09 kW.

Zde je opět jasně ilustrována odlišnost tepelných čerpadel voda/voda a vzduch/voda, kdy pro stejný objekt je při systému vzduch/voda potřeba volit násobně větší nominální výkon tepelného čerpadla.

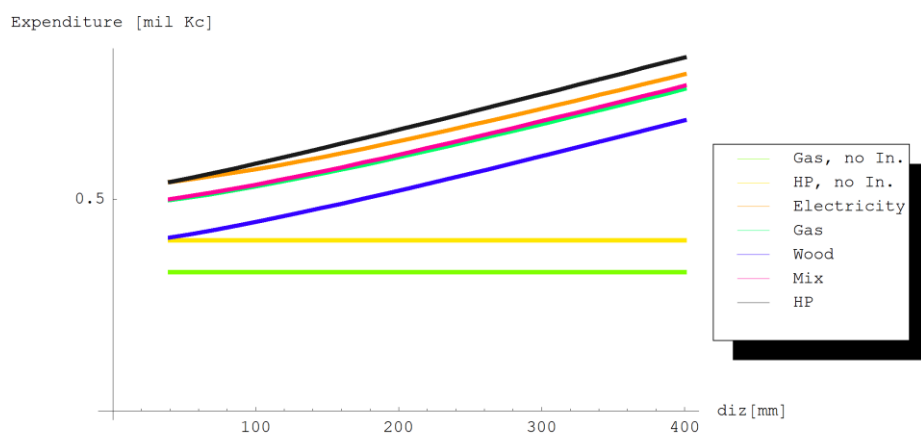
V tomto případě provádím sérii výpočtů chování TČ jen kvůli zjištění vlivu zateplení na topný faktor. Výsledky jsou (izolace v mm, topný faktor): {10,3.6}, {25,3.7}, {50,3.8}, {75,3.9}. Tyto výsledky odpovídají postupnému snižování teploty otopné vody v soustavě.

9.2.1. Ekonomické vyhodnocení základního modelu

V tomto případě je nasnadě, že s ohledem na nízké ztráty objektu nebude zateplení ekonomicky zajímavé, jak ostatně odpovídá následujícímu grafu nákladů:

(15 letý provoz + investice)

Obr.51



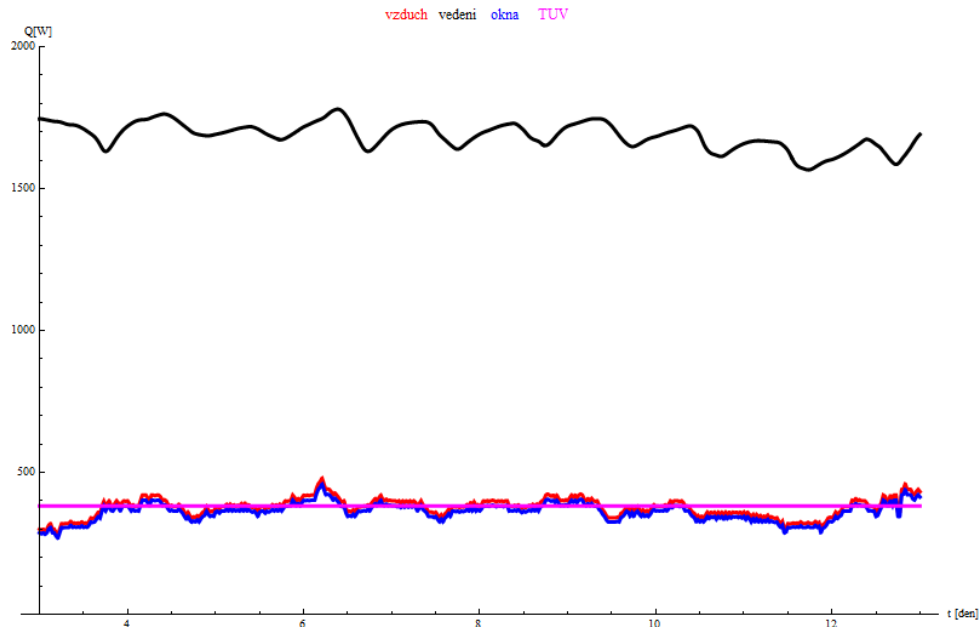
Vyhodnotím-li tedy pouze částky za varianty bez izolace dostávám nejnižší pro dřevo cca 330 000 Kč. Další zdroje jsou cca plyn 370 000 Kč, TČ 400 000 Kč a elektrokotel 420 000 Kč.

Z výsledků vyplývá, že v objektu má smysl vyhodnotit přesný model pro TČ. Všechny zdroje jsou v tomto případě poměrně vyrovnané, nevyplatí se uvažovat jen elektrokotel, jelikož stávající topení plynem je výhodnější a na rozdíl od TČ nelze očekávat úsporu na základě dlouhodobějšího provozu.

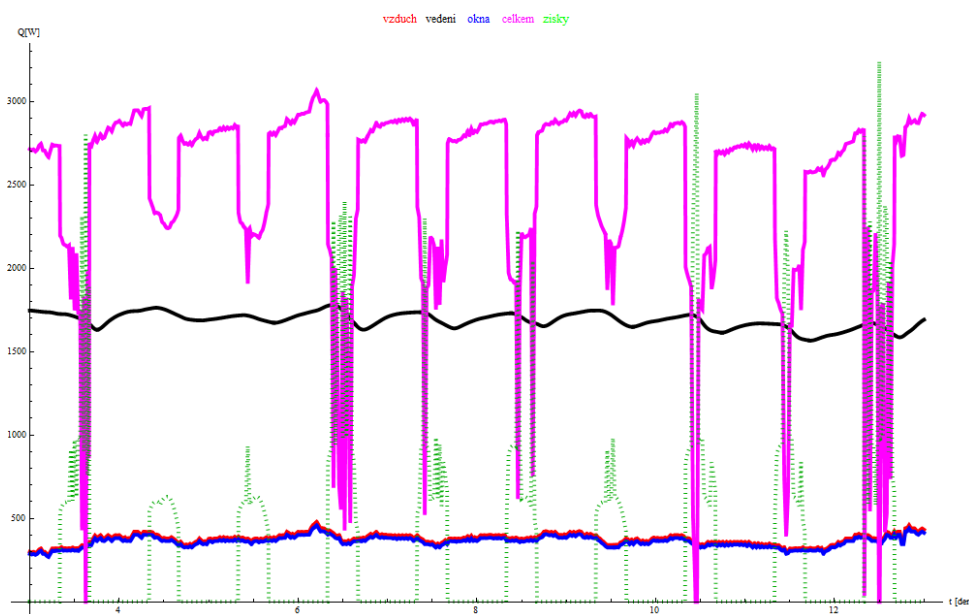
9.3. Vyhodnocení komplexního modelu

9.3.1. Varianta s uvážením kapacit

Z hlediska vyhodnocení komplexního modelu mají opět kapacity svůj efekt, nejlépe zřetelný na tepelném toku vstupujícím do stěny:

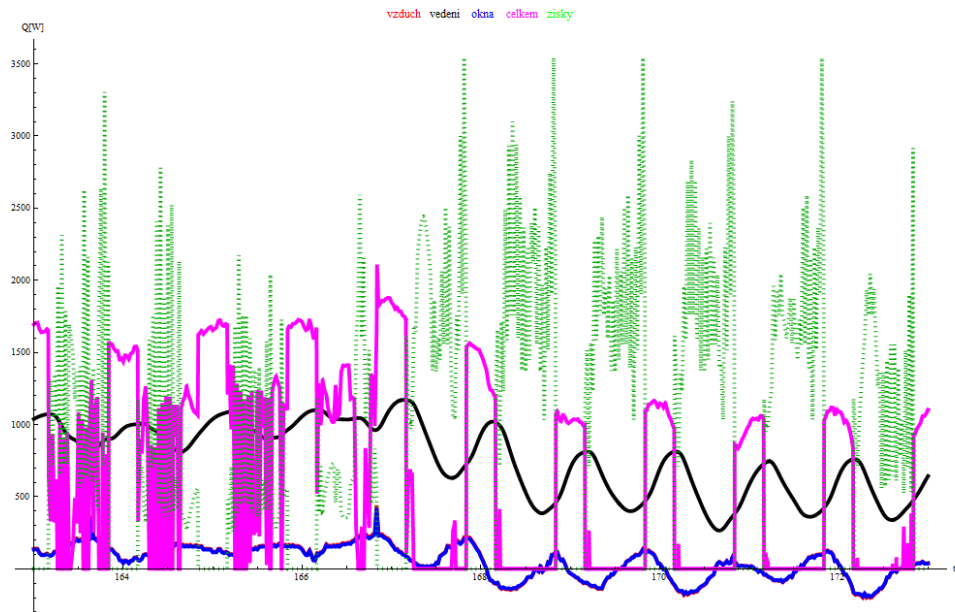


Na tomto grafu je zřetelný vliv vyhlazení toků kapacitami. Zároveň je vidět, že v tomto objektu hrají hlavní úlohu tepelné ztráty vedením. Tepelné ztráty okny a ventilací pak druhotnou (byť nezanedbatelnou) roli. Většina ztrát je realizována pláštěm budovy, což odpovídá faktu, že objekt je postaven z izolačního zdiva, ale bez nějakého dalšího zateplení (3cm vrstva izolační omítky).



Z hlediska funkce ekvitermní regulace je zde zřetelný další problém, topení podlahovým topením má značnou setrvačnost, zatímco sluneční zisky se promítají okamžitě. Systém ekvitermní regulace založený pouze na odečtu teplot funguje velmi špatně během slunečných dní. Systém má sice vstup ze slunečního kolektoru a na základě něho je schopen upravit křivku regulace, přesto pravidelně dochází k nepříjemným výkyvům teploty. Proto bylo řízení topení upraveno na méně komfortní model ekvitermní regulace v noci a ruční regulace přes den.

Zajímavý je i následující graf, který je z letního období, kdy dochází k pokrytí spotřeby solárním systémem.

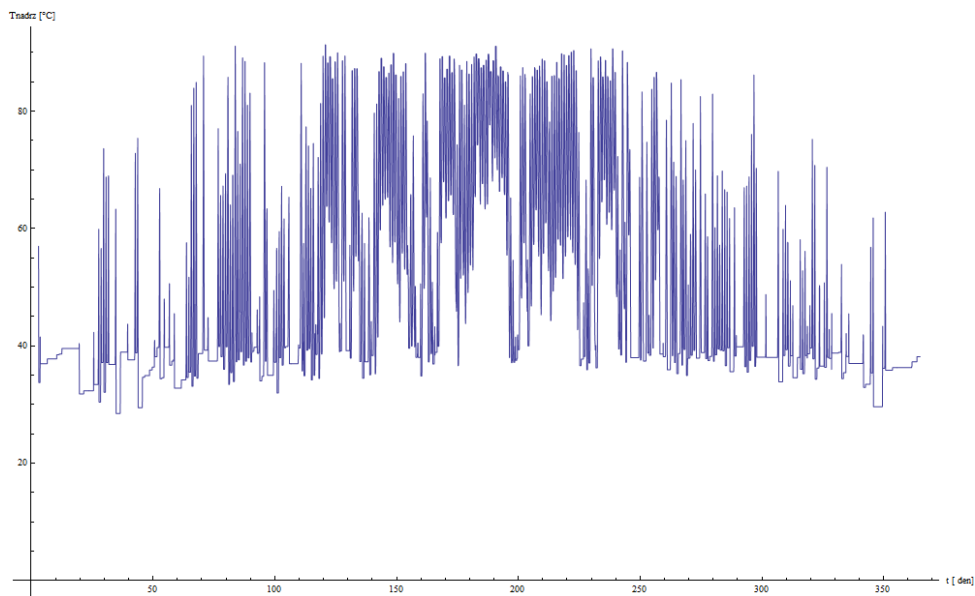


Obr.54

Na tomto grafu je vidět poměrně velká oscilace tepelného toku vedení stěnami. Tento jev odpovídá tomu, že zde dochází k nabíjení a vybíjení kapacit. Zároveň lze krásně pozorovat vliv posunu odběru, kdy v některé dny je zcela zřejmý posun až do protifáze se ztrátami okny (které nemají žádnou kapacitu).

Další zajímavý fakt je, že v tomto úseku zcela jasně vidíme vliv kapacit v tom smyslu, že i když venkovní teplota opakovaně překračuje teplotu interiéru, nedochází ještě k tepelnému toku zdí do objektu.

Vyhodnocení teploty v nádrži:



Obr.55

V tomto případě je osazena obdobně velká nádrž jako v objektu 1 pro větší plochu kolektorů, přesto se dimenzování jeví lépe spárováno. Důvod je zřejmý - tento objekt nemá osazen kolektorový systém zdaleka optimálně, čili čisté zisky z kolektorů jsou nižší.

9.3.2. Varianta s uvážením kapacit - TČ

Jelikož vliv kapacit je vyšší na provoz TČ než na klasický zdroj, provedu ještě jedno vyhodnocení modelu s tepelnými kapacitami, tentokrát ale s tepelným čerpadlem jako primárním zdrojem energie.

9.3.3. Varianta bez uvážení kapacit

Po provedení výpočtů je k dispozici srovnání obou modelových variant:

Den	Model bez kapacit		Model s kapacitami	
	Spotřeba [kWh]	Denní spotř. [kWh]	Spotřeba [kWh]	Denní spotř. [kWh]
1	31,3	31,3		
2	73,1	41,8		
3	117,9	44,8	41,7	41,7
4	179,8	61,9	104,4	62,7
5	241,2	61,4	166,0	61,7
6	295,9	54,7	221,1	55,0
7	355,5	59,6	280,2	59,1
8	416,7	61,2	339,9	59,7
9	477,7	61,1	401,3	61,4
10	532,8	55,0	457,5	56,2
11	585,1	52,3	510,8	53,3
12	633,6	48,5	562,9	52,1

13	690,5	56,9	618,6	55,7
14	754,6	64,1	679,1	60,5
15	823,4	68,8	747,2	68,1
16	895,3	71,9	818,0	70,8
17	962,7	67,3	886,2	68,2
18	1019,3	56,6	948,6	62,4
19	1076,8	57,5	1004,6	56,0
20	1137,7	60,9	1066,2	61,6

Den	Model bez kapacit		Model s kapacitami	
	Spotřeba [kWh]	Denní spotř. [kWh]	Spotřeba [kWh]	Denní spotř. [kWh]
345	9000,0	54,3	8683,3	50,2
346	9054,5	54,5	8730,9	47,7
347	9129,1	74,6	8806,4	75,5
348	9200,6	71,5	8878,0	71,6
349	9278,5	77,9	8954,5	76,5
350	9340,5	62,1	9018,4	64,0
351	9390,7	50,2	9067,6	49,1
352	9448,3	57,6	9130,2	62,6
353	9508,2	59,9	9191,6	61,5
354	9562,0	53,8	9246,1	54,5
355	9622,5	60,5	9306,6	60,5
356	9684,4	61,9	9367,4	60,7
357	9752,0	67,6	9432,3	65,0
358	9830,1	78,1	9505,5	73,1
359	9908,6	78,5	9581,0	75,5
360	9982,7	74,1	9654,6	73,6
361	10047,5	64,8	9721,2	66,6
362	10097,6	50,1	9772,9	51,7
363	10152,2	54,6	9828,5	55,6
364	10206,6	54,4	9883,8	55,3
365	10263,0	56,4	9940,7	56,8

Reálná naměřená roční spotřeba činila 10 620 kWh. Výsledky modelů s kapacitami i bez jsou téměř totožné (zvláště po započtení 70 kWh za první 2 dny vyloučené z vyhodnocení kvůli silnému vlivu přechodového děje). Odchylna činí -4 a -6,5%, což opět dokládá využitelnost tohoto typu modelu. Velmi důležitý poznatek je pak zejména to, že tepelné kapacity hrají svou roli, ale tento objekt je pořád relativně „lehké konstrukce“, tedy tyto kapacity mají vliv na vyhlazení průběhů tepelných toků, ale nejsou dostatečně velké, aby výrazně promluvíly do celkového způsobu provozu.

9.3.4. Varianta bez uvážení kapacit – TČ

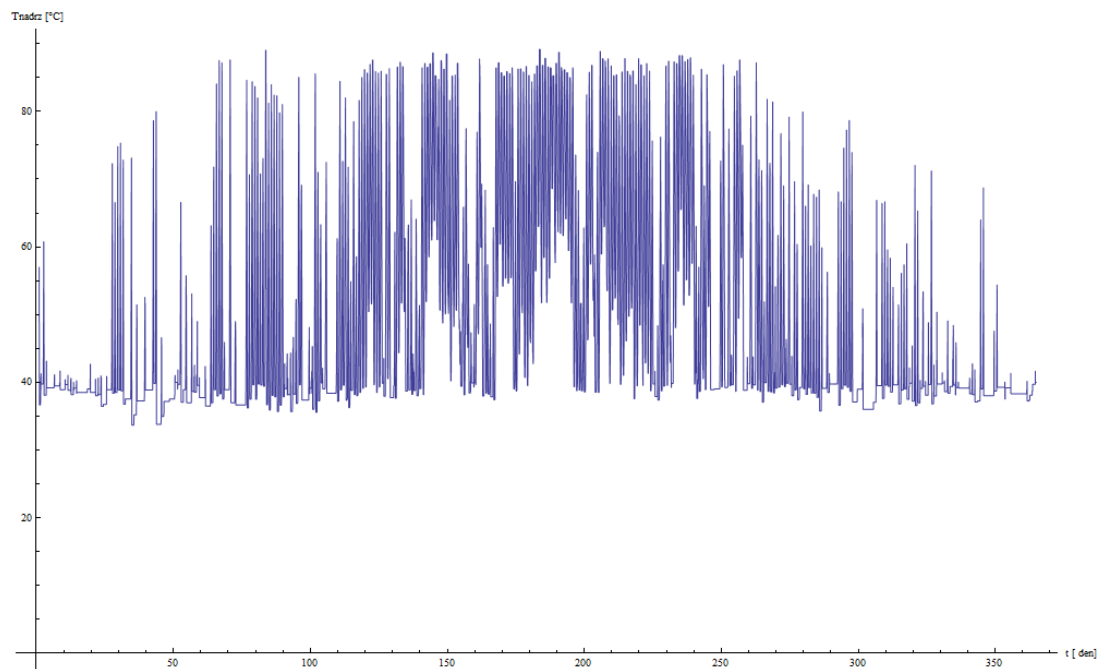
Po vyhodnocení obou verzí modelu vychází srovnání:

Den	Model bez kapacit		Model s kapacitami	
	Spotřeba [kWh]	Denní spotř. [kWh]	Spotřeba [kWh]	Denní spotř. [kWh]
1	10,9	10,9		
2	25,6	14,8		
3	41,7	16,1	14,6	14,6
4	63,4	21,7	37,6	23,0
5	84,8	21,4	60,3	22,7
6	104,7	19,9	81,0	20,7
7	126,3	21,6	103,0	21,9
8	148,6	22,3	125,3	22,4
9	170,7	22,1	148,2	22,8
10	190,5	19,8	168,9	20,7
11	209,2	18,7	188,3	19,4
12	227,1	17,8	208,0	19,7
13	247,7	20,6	230,0	22,0
14	271,3	23,6	254,1	24,1
15	297,1	25,8	281,8	27,7
16	324,2	27,1	310,6	28,9
17	348,9	24,8	337,8	27,2
18	369,5	20,6	362,4	24,6
19	390,1	20,6	383,6	21,2
20	413,2	23,0	405,6	22,0

Den	Model bez kapacit		Model s kapacitami	
	Spotřeba [kWh]	Denní spotř. [kWh]	Spotřeba [kWh]	Denní spotř. [kWh]
345	3306,7	23,2	3218,3	21,3
346	3330,6	23,9	3238,4	20,1
347	3361,9	31,2	3267,3	28,8
348	3390,9	29,0	3293,7	26,4
349	3423,3	32,4	3322,6	28,9
350	3449,3	26,0	3348,9	26,3
351	3468,9	19,6	3368,9	20,1
352	3488,6	19,7	3391,5	22,6
353	3509,0	20,4	3413,7	22,2
354	3527,3	18,3	3433,3	19,6
355	3548,2	20,8	3455,1	21,8
356	3569,9	21,7	3477,4	22,3
357	3594,5	24,6	3502,0	24,6
358	3624,9	30,4	3531,6	29,6
359	3655,2	30,4	3562,0	30,4
360	3683,4	28,1	3591,1	29,1

361	3706,7	23,3	3616,1	25,0
362	3724,7	18,0	3635,2	19,2
363	3744,6	19,9	3655,9	20,6
364	3764,2	19,6	3676,0	20,1
365	3784,5	20,3	3696,6	20,6

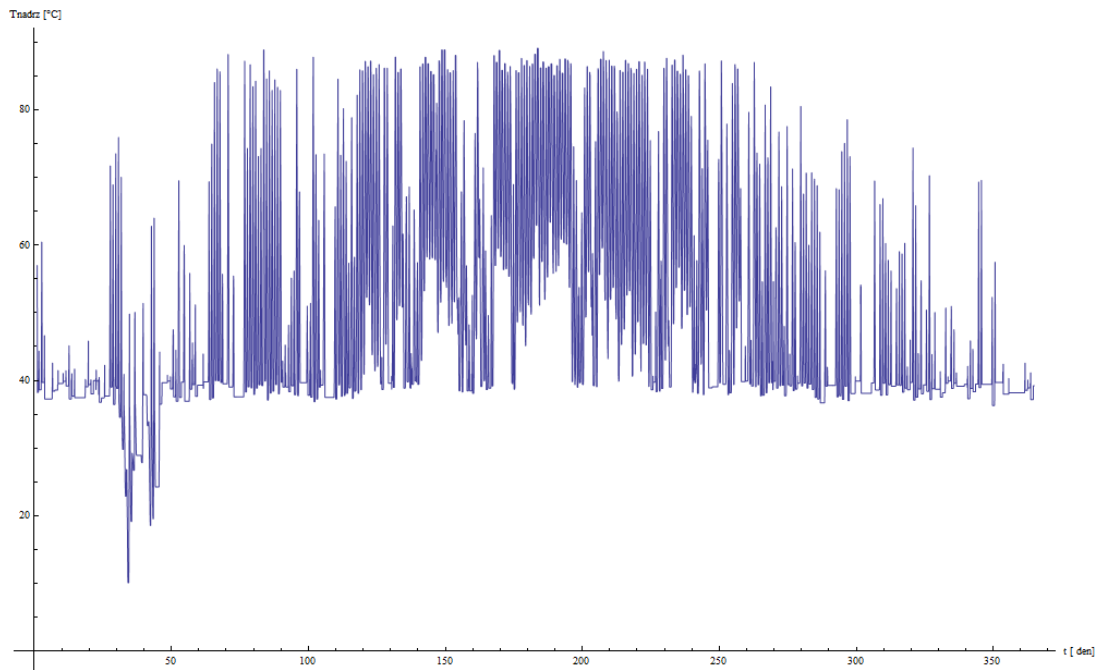
Opět uvádím výňatky z celkové tabulky. Jak je vidět, varianty jsou téměř totožné, což je logické, protože největší nelinearitu v chování tepelného čerpadla lze pozorovat u otopných soustav s malou konstantou přenosu, což rozhodně není tento případ. Zároveň jsou ztráty objektu na takové úrovni, že není třeba uvažovat vliv nutnosti spínat častěji bivalentní zdroj, podmínkou je ale osazení správně dimenzovaného TČ. Například v modelu běžně užívané tepelné čerpadlo vzduch/Voda WPL33 je z hlediska dimenzování v pořádku, výkon i při extrémních mrazech neklesá pod 10kW zatímco ztráty objektu nepřesahují 5kW. Ověření bylo provedeno i pro TČ vzduch/voda WPL 13, kde není tento závěr tak zřejmý (viz dimenzování čerpadla ve zjednodušeném modelu), přesto i toto čerpadlo ještě pokrývá spotřebu bez nutnosti sepnutí bivalentního zdroje.



Obr.56

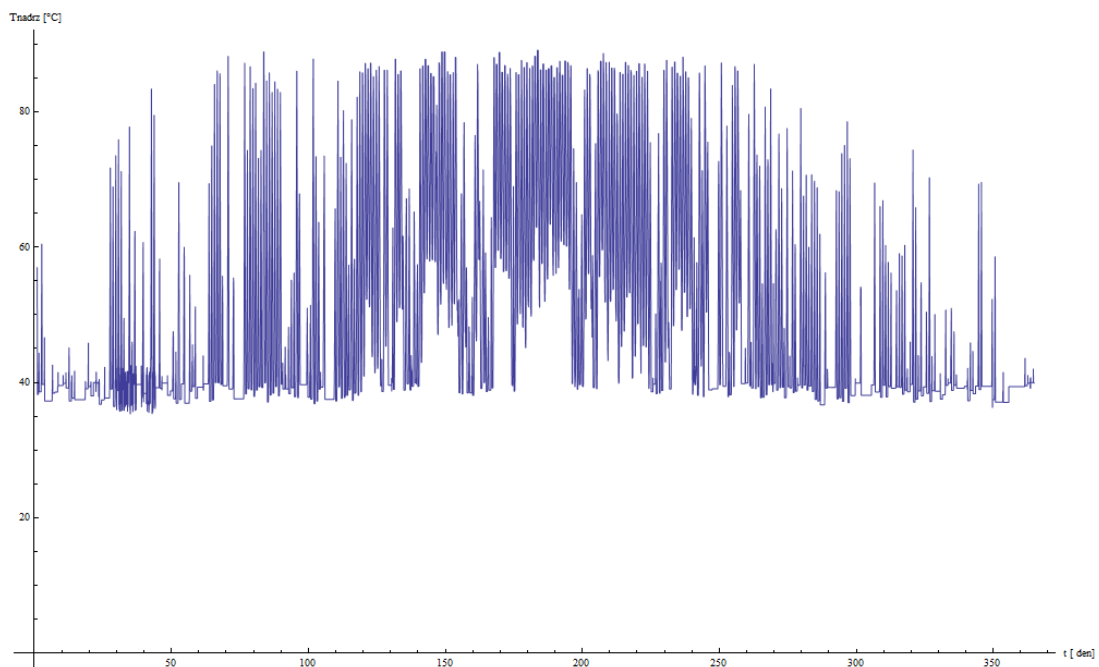
Přestože čerpadlo je dimenzováno dostatečně, lze na grafu nádrže vidět úseky s hodnotou pod 40°C. Tyto úseky jsou důsledkem zvolené numerické metody a kritéria, že výkon TČ má být roven odběru z nádrže, nikoli nedostatečného výkonu. Dochází prostě k tomu, že během jednoho kroku výpočtu dojde k poklesu teploty pod dolní mez a dokud nedojde k dodávce energie ze solárního systému, tak se teplota nádrže nemůže zvýšit. Lze zvolit výpočet s menším časovým krokem, který by toto eliminoval, nebo přidáním další podmínky pro regulaci TČ, ale jelikož tato nepřesnost nemá vliv na bilanci, ponechávám beze změn, abych udržel rychlost vyhodnocení finální části modelu.

Pro zajímavost ještě uvedu graf teploty v nádrži při TČ dimenzovaném tak, že musí spínat bivalentní zdroj (WPL 10).



Obr.57

Toto by pochopitelně bylo fyzikálně špatně, proto pro takové případy využívám model, kde je vyhodnocovací část upravena, aby vyhodnotila korektně i funkci bivalentního zdroje. Úprava je jednoduchá, spočívá v tom, že se sepne bivalentní zdroj, pokud je splněna podmínka, že tepelné čerpadlo pracuje na 100% (potažmo se střídou 1). Graf průběhu v teplot v nádrži se v tomto případě vrací ihned na kýžený tvar:



Obr.58

Dojde pouze ke korekci spotřebované energie (potažmo topného faktoru). Přesto tuto úpravu nepoužívám plošně, protože nevýhodou této úpravy je, že tento stav není na první pohled zřejmý. Proto běžně používám základní model, kde mě pokles teploty v nádrži upozorní na využívání bivalentního zdroje.

Abych tuto myšlenku dotáhl do konce, rozdíl v ceně WPL 10 a WPL 13 činí zhruba 40 000 Kč, rozdíl ve spotřebě činí zhruba 200 kWh ročně. Investice do WPL 13 vrátila řádově za 80 let, což je již trochu pozdě. Toto zcela jasně dokládá mnou dříve uvedenou myšlenku, že optimální dimenzování tepelného čerpadla je takové, kdy se pohybuje na hraně bivalence.

9.3.5. Celkové energetické a ekonomické vyhodnocení

Pro celkové vyhodnocení budu opět postupovat formou tabulky, kterou využiji jako prvotní vyhodnocovací nástroj, abych identifikoval slibné varianty:

Varianta	Plocha kolektorů	Objem nádrže	Izolace (mm)	Investice	Spotřeba	Roční úspora	Orientační návratnost	Cena kWh
Srovnávací	7,65	300	-	0	10200	0,00		1,8
Stávající vytápění - pl. Kotel:								
1	7,65	500	-	5000	10028	310,00	16,13	
2	12,75	800	-	39000	8528	3010,00	12,96	
3	7,65	300	100 (stěny)	100000	9750	810,00	123,46	
4	7,65	300	100 (střecha)	56000	7944	4060,00	13,79	
5	7,65	300	200 (vše)	241000	7278	5260,00	45,82	
Tepelné čerpadlo								2,5
6	7,65	300	-	150000	3780	12310,00	12,19	
Tepelné čerpadlo + zemní výměník								
7	7,65	300	-	190000	2944	14398,89	13,20	

V tomto případě je vyhodnocení takové, že zásadně slibně nevyhlíží žádná z variant. Důvody jsou nasnadě, objekt nevykazuje takové ztráty aby bylo rychle návratné zateplení, v rozumné relaci vychází pouze zateplení střechy. Investice do solárního systému také nemůže generovat velké úspory, jelikož je solární systém osazen v pozici, kde je jeho využitelnost omezena.

Instalace tepelného čerpadla nějakou úsporu generuje, ale ani v tomto případě se odhad návratnosti nepohybuje pod deset let, což je pro většinu investorů příliš dlouhá doba.

Přesto provedu přesnou kalkulaci pro varianty 2, 4, 6 a 7 kde je potenciál k úspoře nejbližší oné desetileté hranici.

Dosazením do výpočtového modelu dostávám pro zvolené parametry 2% obecná inflace, 4% zdražení energií, doba vyhodnocení 15 let:

Varianta	Plocha kolektorů	Objem nádrže	Izolace (mm)	Investice	Spotřeba	Rozdíl ceny	Celková cena 15 let	Cena kWh
Srov.	7,65	300	-	0	10200	0,00	342000	1,8
Stávající vytápění - plynový kotel:								
2	12,75	800	-	39000	8528	-52000,00	290000	
4	7,65	300	100(stř.)	56000	7944	-14000,00	328000	

Tepelné čerpadlo								2,5
6	7,65	300	-	150000	3780	-36000,00	306000	
7	7,65	300	-	190000	2944	-32000,00	310000	
Další paliva								
Dřevo	7,65	300	-	60000	12750	2000,00	344000	1,3

V tomto případě je z hlediska ekonomiky provozu nejrozumnější varianta posílení solární sestavy, poměrně přijatelně vychází i varianta osazení tepelného čerpadla, ale dosažená úspora není dostatečnou motivací k takové úpravě.

Naopak jako nejhorší v tomto vyhodnocení dopadlo topení dřevem, což vyvrací zažitou představu, že tento způsob vytápění je vždy nejlevnější. Důvod je nasnadě, objekt na vytápění dřevem není připraven, proto by počáteční investice byla příliš výrazná, aby se přechod mohl vyplatit. Důvodem, proč stejný závěr nevyplýnul i ze zjednodušeného modelu jsou solární panely, které v něm nejsou zahrnuty a které snižují spotřebu tepla, čímž prodlužují návratnost investice do zdroje s levnější energií.

10. Příkladová studie 3

Jelikož první dvě příkladové studie byly realizovány na objektech novostaveb uvedu ještě jednu příkladovou studii realizovanou pro objekt diametrálně odlišný. Opět využiji objekt, se kterým jsem obeznámen a o kterém mám k dispozici alespoň některé základní údaje. Opět budu řešit pouze to, co je pro objekt specifické, nebo si zaslouží zvýraznění, nebudu opakovat plné popisy předchozích příkladových studií.

10.1. Definice objektu

Objekt se nachází v Ostravě-Polance a jde o stavbu z počátku šedesátých let minulého století. Objekt je dvoupodlažní RD s plochou střechou. Rozměry jsou 8x12m, výška 7m. V objektu byla osazena plastová okna, objekt je však z původních materiálů bez zateplení. Stávající vytápění je řešeno částečně moderním plynovým kotlem a částečně kotlem na tuhá paliva.

Objekt je vybaven centrální akumulací o objemu 800l.

Zdivo je tloušťky 50cm, přičemž materiály jsou různé. Jsou využity cihly, tvárnice a některé části jsou železobetonové. Průměrný součinitel tepelné vodivosti odhaduji na 0,6.

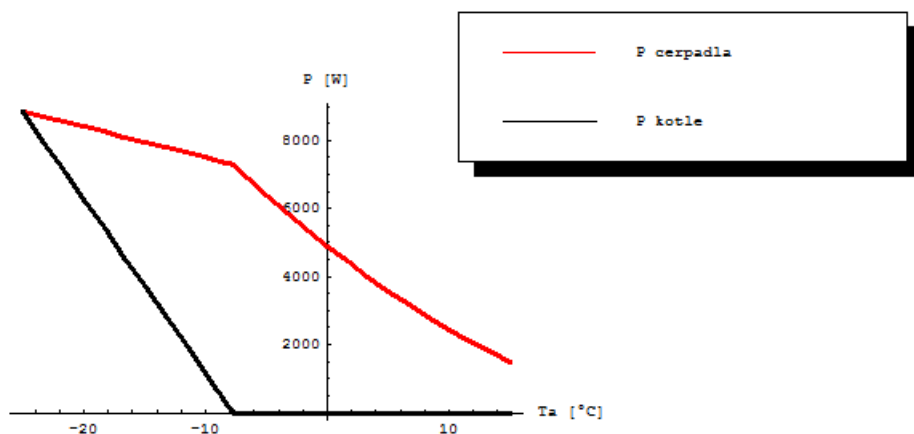
Plocha oken činí 18 m², plocha pláště 450 m².

Orientace objektu je čistě Sever/Jih, objekt stojí v mírném jižním svahu.

Objekt je vytápěn radiátorovou soustavou s teplotním spádem 60/40°C

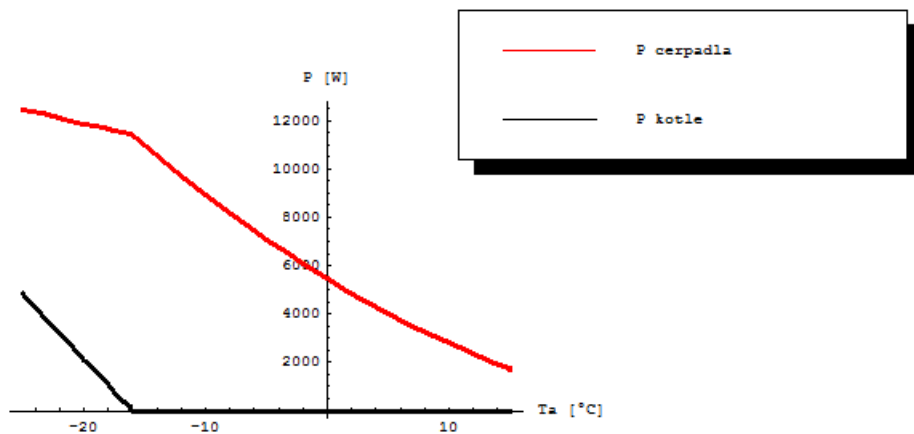
10.2. Vyhodnocení zjednodušeného modelu

Ze zjednodušeného modelu získám základní přehled o chování TČ. Pro čerpadlo WPF 16 vychází křivka bivalence



Obr.59

A pro model WPF 20

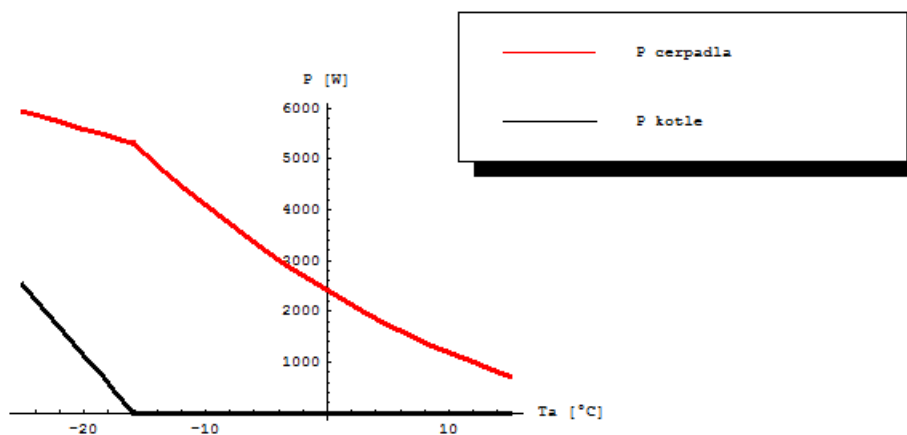


Obr.60

Model WPF 20 se tedy jeví jako vhodný pro případ využití TČ bez dalších zásahů do objektu. Model WPF 16 či nižší je vhodným kandidátem na osazení v případě zateplení objektu, jelikož nepočítám se „symbolickým“ zateplováním, tak pro vyhodnocení izolování objektu uvažuji čerpadlo maximálně WPF 10.

Například s 5 cm zateplením vychází křivka bivalence pro WPF 10 natolik do nízkých hodnot, že zvláště se zohledněním tepelných kapacit objektu není třeba zvláště výkonné sestavy i když je objekt vytápěn relativně nevhodnou otopnou soustavou. Naštěstí se zateplením klesá zároveň teplota vody v otopné soustavě na hodnoty přijatelné pro provoz tepelného čerpadla.

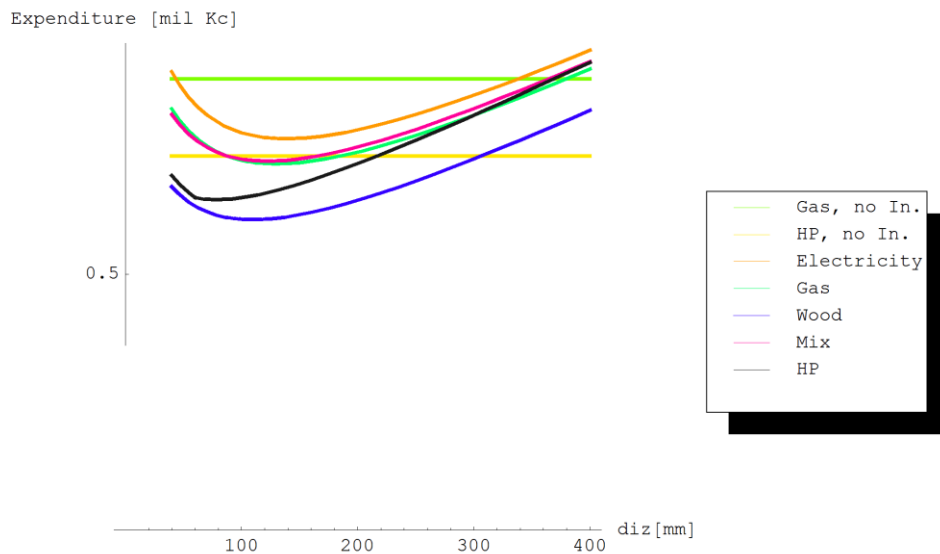
Obr.61



Opět v případě TČ vzduch/voda nastává situace jiná a vhodný typ je třeba volit dle výkonové křivky. Bohužel dnes běžně udávané katalogové údaje A-7/W35 nejsou pro tento typ objektu zrovna reprezentativní, ale s ohledem na plánované zateplení lze odhadnout, že potřebná úroveň tohoto parametru bude kolem 14kW, tedy odpovídající TČ systému vzduch/voda pro tento objekt by bylo WPL 33.

10.3. Ekonomické vyhodnocení zjednodušeného modelu

Z grafu spotřeby za 15 let v tomto případě vyplývá, že objekt se vyplatí zateplit, proto v dalších podrobnějších modelech budu analyzovat možnosti zateplení.

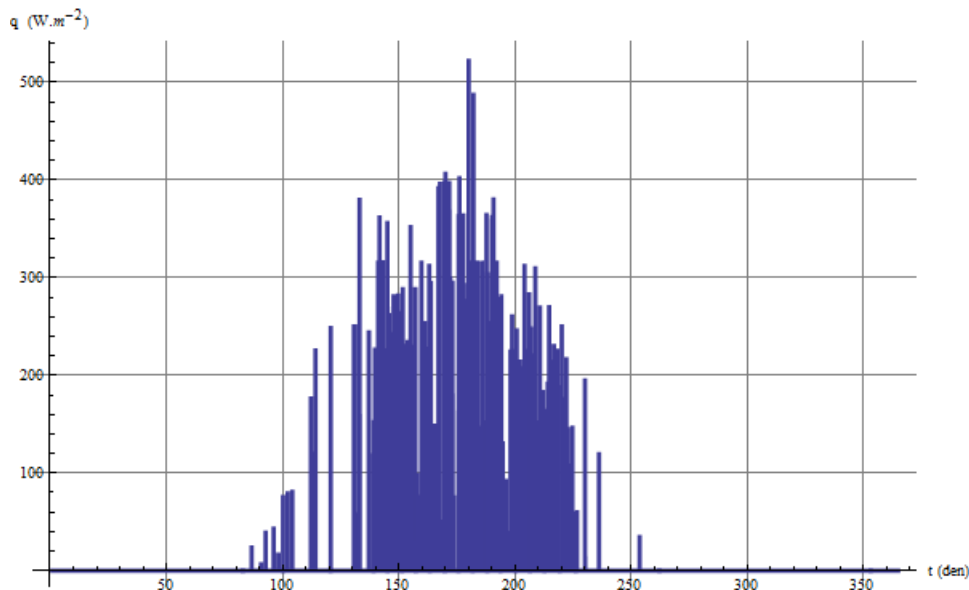


Obr.62

Velmi zajímavě vychází v kombinaci se zateplením tepelné čerpadlo, kdy v tomto případě uvažují rozdílné ceny čerpadel pro varianty bez a se zateplením, protože jsou skutečně výkonově velmi odlišné.

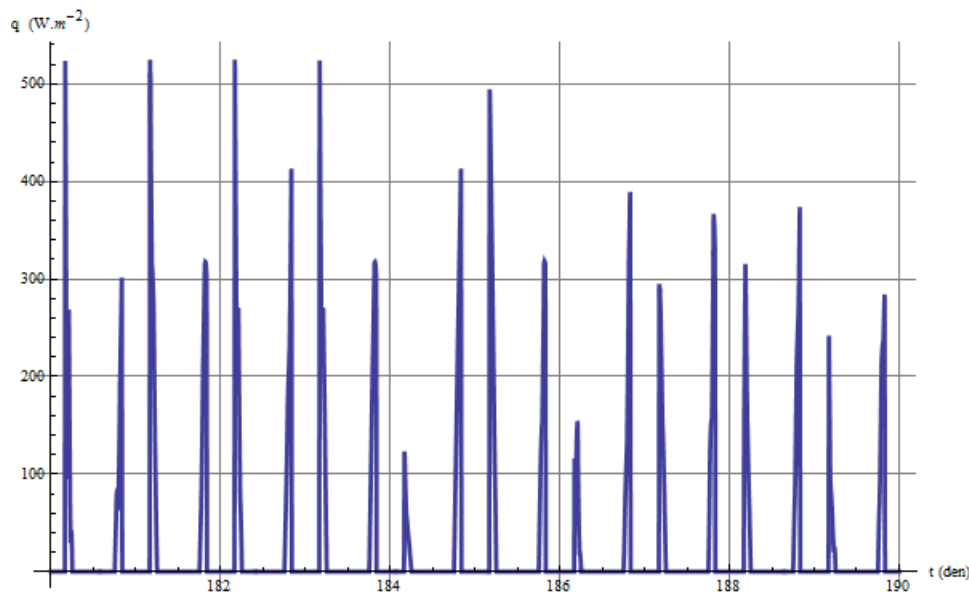
10.4. Komplexní model, sluneční toky

Vyhodnocení není ničím speciální, přesto uvedu dva grafy – oslunění severní stěny. Tím, že je tento objekt ideálně přivrácen k severu je tato informace zajímavá.



Obr.63

Na následujícím grafu je pak zachyceno období v létě. Oslunění má charakter krátkých impulsů ráno a večer.

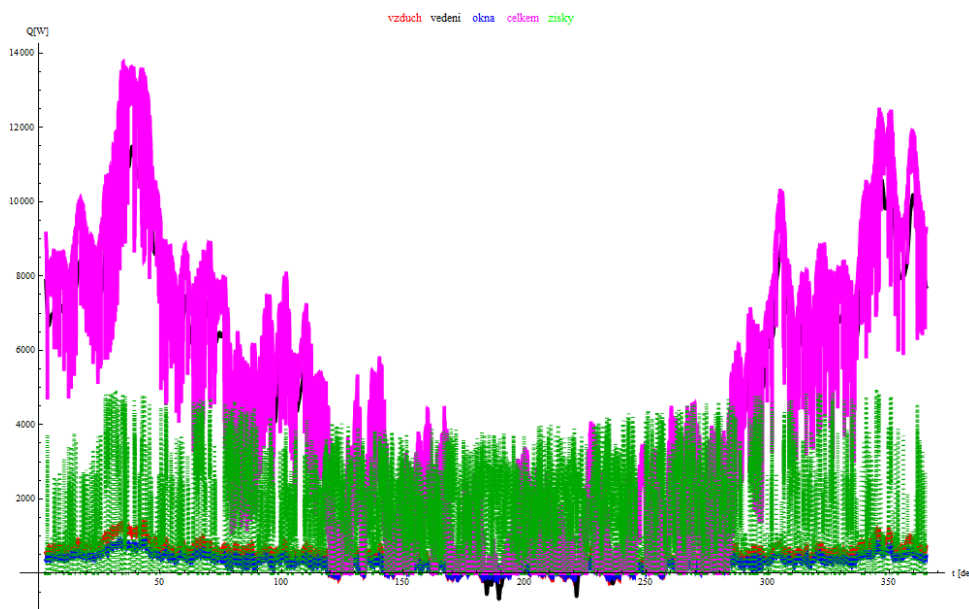


Obr.64

V projekční praxi jsem se setkal se stavebním úřadem akceptovaným argumentem, že objekt postavený na sever od jiného objektu mu nemůže stínit. Jak je vidět, slunce si myslí něco jiného.

10.5. Vyhodnocení komplexního modelu s kapacitami

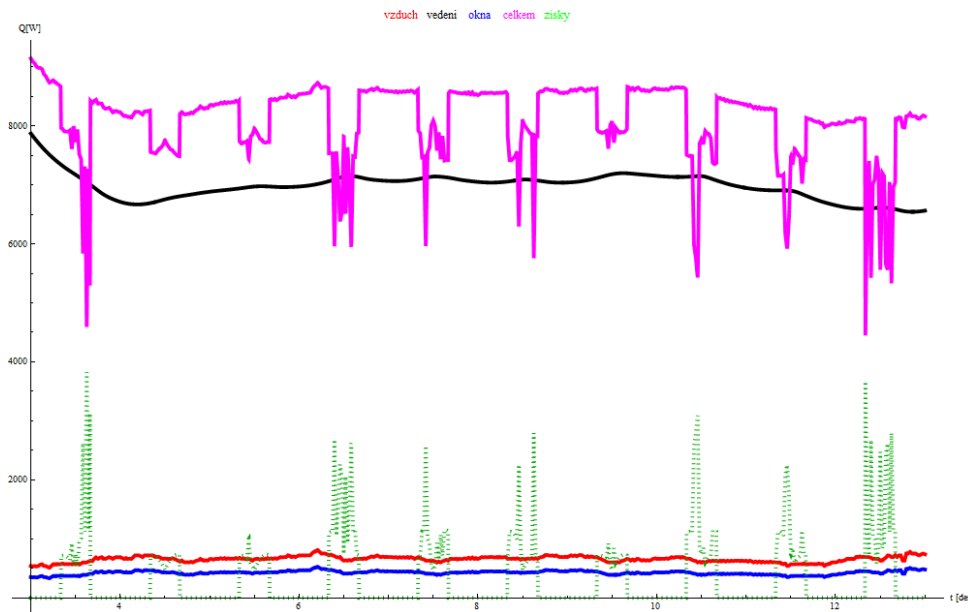
Zde je již vliv kapacit zcela jednoznačný. Graf celkových tepelných toků opět není příliš přehledný, proto uvedu částečné grafy, kde budou dané vlivy zřejmé.



Obr.65

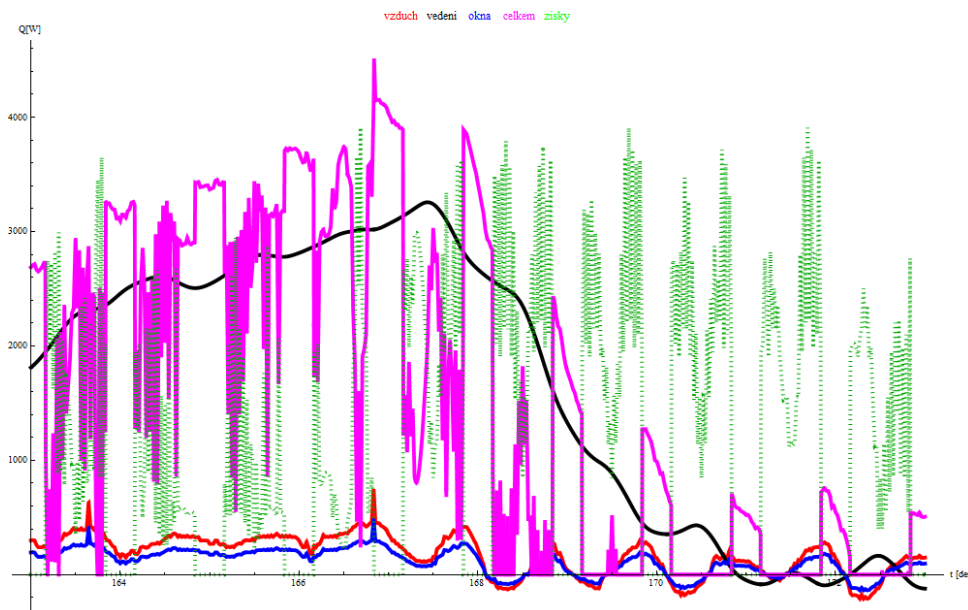
Jak je zřejmé z následujícího grafu, tak tepelné kapacity již zcela vyhlazují tepelné toky stěnami, oscilace celkového toku je tvořena zejména slunečními zisky. Také, je fakt, že u

tohoto objektu hrají tepelné ztráty tokem skrze stěny jednoznačně prim. Ostatní mechanismy způsobují jen zlomek celkových ztrát.



Obr.66

Rovněž v letních měsících lze pozorovat vliv kapacit, které posouvají průběh tepelných toků a vyrovnávají tak odběr.



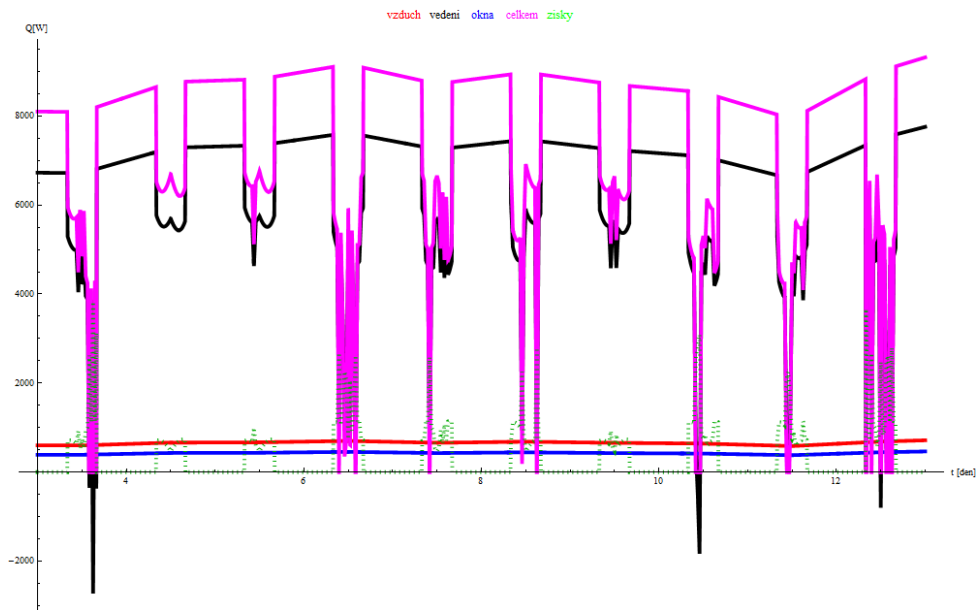
Obr.67

Z těchto důvodů budu u tohoto objektu v modelu bez kapacit využívat upravenou křivku teploty – úprava na průměrné denní hodnoty.

10.6. Vyhodnocení komplexního modelu bez kapacit

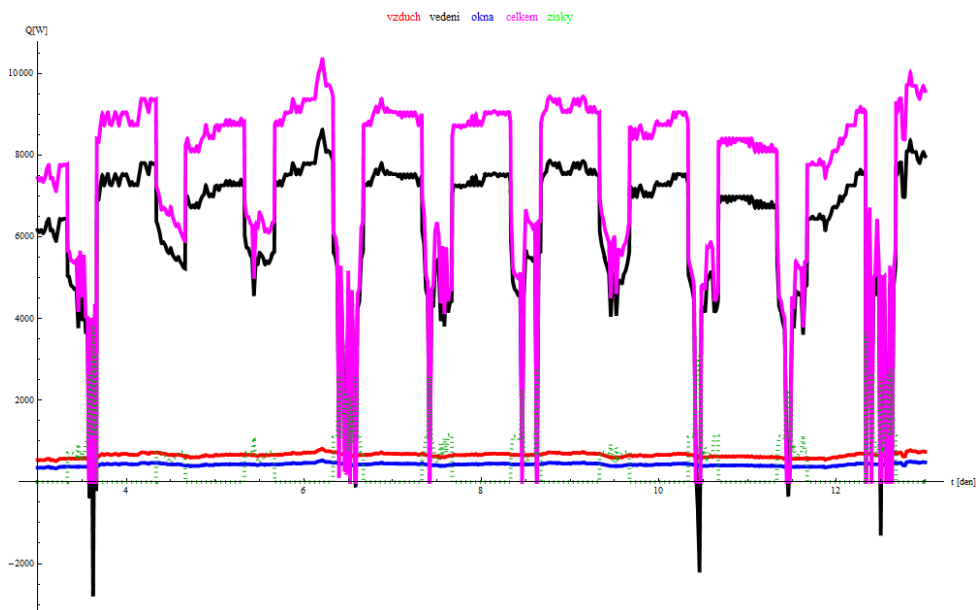
Když srovnám průběhy tepelných toků, je zde vidět jistá odchylka způsobená absencí tepelných kapacit.

Varianta 1: Vliv kapacit nahrazen úpravou teploty



Obr.68

Varianta 2: Prostý model bez zohlednění kapacit



Obr.69

Ze srovnání těchto dvou variant vyplývá, že z hlediska energetické bilance nejsou výrazně odlišné, ale model s průměrnou denní teplotou poskytuje výsledné průběhy bližší modelu, který počítá s kapacitami. Proto veškeré vyhodnocení pro tento objekt budu provádět na tomto modelu.

10.7. Celkové energetické a ekonomické vyhodnocení

Celkové energetické vyhodnocení ukazuje na zřejmý fakt, objekt značného stáří bez zateplení je nákladný podnik.

Den	Model bez kapacit		Model s kapacitami	
	Spotřeba [kWh]	Denní spotř. [kWh]	Spotřeba [kWh]	Denní spotř. [kWh]
1	152,8628277	152,8628277		
2	291,3216016	138,4587738		
3	449,7549079	158,4333064	168,1325789	168,13
4	641,170238	191,4153301	360,0632206	191,93
5	832,2352482	191,0650102	556,3384727	196,28
6	1007,921539	175,686291	750,7285506	194,39
7	1188,362965	180,4414263	948,2546644	197,53
8	1372,760629	184,397664	1145,823921	197,57
9	1560,821806	188,0611767	1346,247152	200,42
10	1731,116059	170,2942532	1541,733787	195,49
11	1890,168384	159,0523241	1729,754614	188,02
12	2058,670429	168,5020454	1911,3118	181,56
13	2245,963143	187,2927136	2100,590432	189,28
14	2447,383121	201,4199782	2303,9135	203,32
15	2674,626841	227,2437205	2521,247706	217,33
16	2904,708235	230,0813934	2752,803323	231,56
17	3116,172968	211,4647334	2986,906403	234,10
18	3293,637951	177,4649827	3210,569158	223,66
19	3474,863954	181,2260036	3424,153681	213,58
20	3671,704219	196,8402642	3632,898712	208,75

Den	Model bez kapacit		Model s kapacitami	
	Spotřeba [kWh]	Denní spotř. [kWh]	Spotřeba [kWh]	Denní spotř. [kWh]
345	35529,29224	210,7444505	37911,06574	246,21
346	35735,53535	206,2431153	38169,57138	258,51
347	35975,21892	239,6835685	38456,32964	286,76
348	36203,42419	228,2052738	38735,724	279,39
349	36454,84376	251,4195617	39011,91829	276,19
350	36689,41963	234,5758773	39282,4563	270,54
351	36888,05427	198,6346322	39546,69587	264,24
352	37065,01773	176,9634651	39812,64416	265,95
353	37249,82131	184,8035833	40053,73105	241,09
354	37416,49405	166,6727304	40275,88309	222,15
355	37603,20154	186,7074928	40496,51976	220,64
356	37794,33071	191,1291702	40717,91782	221,40
357	38009,38726	215,0565541	40946,36416	228,45
358	38265,77171	256,3844513	41193,38592	247,02
359	38520,12969	254,357978	41463,65628	270,27
360	38756,91878	236,7890888	41742,53356	278,88
361	38958,47702	201,5582413	42011,70648	269,17
362	39123,70916	165,2321425	42251,14181	239,44
363	39299,18338	175,4742177	42478,067	226,93
364	39464,10813	164,9247503	42699,67635	221,61

Celková spotřeba dle modelů vychází kolem 40 000 kWh, což je dle referencí uživatele reálné číslo. Jelikož uživatel využívá ve větší míře kotel na tuhá paliva nelze s jistotou říci, jaká je přesná roční spotřeba, jako referenční hodnotu tedy budu brát výsledky modelu bez kapacit.

V tomto případě je tabulka variant poněkud obsáhlejší, jelikož uvažuji různé varianty práce s objektem.

Varianta	Plocha kolektorů	Objem nádrže	Izolace (mm)	Investice	Spotřeba	Roční úspora	Orientační návratnost	Cena kWh
Srovn.	0	800	0	0	40000	0,00		1,8
Stávající vytápění - pl. Kotel:								
1	7,65*	800	0	71000	33917	10950,00	6,48	
2	12,75*	800	0	95000	32139	14150,00	6,71	
3	0	800	100	275000	22528	31450,00	8,74	
4	0	800	150	330000	20528	35050,00	9,42	
5	7,65*	800	150	401000	14917	45150,00	8,88	
6	12,75*	800	150	425000	12750	49050,00	8,66	
7	10,5	800	150	425000	12444	49600,00	8,57	
Tepelné čerpadlo								2,5
8	0	800	0	350000	19333	27066,67	12,93	
9	0	800	100	475000	8806	49986,11	9,50	
10	0	800	150	543750	8167	51583,33	10,54	
11	6,3	800	150	614750	6111	56722,22	10,84	
12	10,5	800	150	638750	5167	59083,33	10,81	
13	14,7	800	150	662750	4611	60472,22	10,96	
14	14,7	800	100	594000	5417	58458,33	10,16	
Tepelné čerpadlo + zemní výměník								
15	-	800	100	515000	8583	53941,67	9,55	
16	-	800	150	583750	7944	52138,89	11,20	
17	14,7	800	100	634000	5250	58875,00	10,77	

* Ploché selektivně pokovené sol. Panely, ostatní varianty trubcové vakuované.

Veškeré srovnání vztahují k variantě vytápění plynovým kotlem. Reálný stávající stav nahodilého proměnlivého mixu topení plynem a uhlím a dřevem by šel obtížně vyčíslit a v tomto případě je to stav spíše nežádoucí. Uživatel by preferoval v rámci komfortu topení tuhými palivy eliminovat. Rozhodně ale v přesných kalkulacích zahrnu i topení dřevem jako srovnávací alternativu.

Údaje potvrzují dojmy a výsledky z předchozích kroků, objekt má natolik nákladné vytápění, že jsou pro něj zajímavé nejrůznější možné úsporné strategie. Do finálního vyhodnocení proto přenesu varianty číslo 2, 3, 5, 7,9,12,14,15 a 17.

Varianta	Plocha kolektorů	Objem nádrže	Izolace (mm)	Investice	Spotřeba	Rozdíl ceny	Celková cena 15 let	Cena kWh
Srovnávací	0	800	0	0	44444,4	0,00	1405000	1,8
Stávající vytápění - plynový kotel:								
2	12,75	800	-	95000	35710	-185000,00	1220000	
3	0	800	100	275000	25031	-328000,00	1077000	
5	7,65	800	150	401000	16574	-464000,00	941000	
7	10,5	800	150	425000	13827	-525000,00	880000	
Tepelné čerpadlo								2,5
9	0	800	100	475000	8806	-558000,00	847000	
12	10,5	800	150	638750	5167	-551000,00	854000	
14	0	800	100	515000	5417	-594364,00	810636	
15	0	800	150	583750	7944	-526874,00	878126	
17	14,7	800	100	634000	5250	-551564,00	853436	
Další paliva								
Dřevo	0	800	0	0	50000	-288000,00	1117000	1,3

V tomto kole vyhodnocení jsem zahrnul i konstantu účinnosti kotle, počítám 90% pro plynový a 80% pro kotel na tuhá paliva. Oba kotle jsou nové a měly by dosahovat daných účinností.

Ze srovnání vychází velmi dobře varianty 7 a 14, obecně je potvrzen závěr, že při instalaci tepelného čerpadla se nevyplatí izolovat tak moc jako při využívání plynového kotle.

Jelikož objekt má slušný výchozí objem akumulční nádrže vychází poměrně dobře i instalace solárního systému, přestože na rozdíl od předchozích studií by bylo třeba doplnit více částí solárního systému.

11. Shrnutí poznatků modelování objektů

Celkově byly ověřeny použité modely a jejich výsledky se pohybují v hodnotách ověřených reálným provozem s přiměřeně malými odchylkami. Po seznámení se s užitými programy lze provést vyhodnocení objektu poměrně rychle a operativně.

Algoritmus vyhodnocení jsem volil:

1. Vyhodnotit základní model, dle něj určit jaké typy tepelných čerpadel má smysl uvažovat. V ekonomické části základního modelu lze získat náhled na to které zdroje má smysl vyhodnocovat a zda má pro objekt smysl uvažovat zateplení.
2. Stáhnout údaje o počasí pro vyhodnocovanou oblast.
3. Vyhodnotit sluneční toky
4. Vyhodnotit model s kapacitami
5. Vyhodnotit model bez kapacit
6. Srovnat výsledky

7. Pomocí modelu bez kapacit vyhodnotit varianty do základní přehledové tabulky
8. Zajímavé varianty vyhodnotit ekonomicky

Jelikož jsem ověřil, že výsledky modelů s kapacitami a bez kapacit jsou podobné a pro případ objektu s velkou kapacitou jsem upravil model teploty tak, aby byla uvážena průměrná denní teplota není třeba v běžné praxi provádět body 4 a 6. Vyhodnocení objektu lze provést rychle a pokud vyhodnocujeme objekty geograficky blízké, lze převzít zdrojová data oblačnosti a teploty z těchto objektů a postup ještě urychlit.

Nejdéle běžícím programem je vyhodnocení slunečních toků. Zde je možno dosáhnout zrychlení zvýšením konstanty časového kroku v interpolačním pracování. Pokud mám data o zamračenosti načtena ve vzorkovacím intervalu 30 minut, bohatě dostačuje nadstavit interval interpolace 15 minut, což s ohledem na potřebu zpracovat roční průběh kalkulaci výrazně urychlí. Když jsem ověřoval data využíval jsem interpolační krok 2,7 minuty, což vedlo kolem východu a západu slunce ke trošku plynulejšímu přechodu, ale vliv na energetickou bilanci byl blížící se nule, protože zásadnější změny slunečních toků generuje zamračenost.

Jedním ze zásadních přínosů těchto modelů je možnost dimenzovat správně tepelné čerpadlo. Jak jsem ukázal v rámci příkladu číslo 2, je vzhledem k cenovému rozpětí tepelných čerpadel výhodné dimenzovat ho tak, aby výjimečně docházelo k sepnutí bivalentního zdroje. Rovněž, v rámci příkladu číslo 3 jsem ukázal, že je dobře uvažovat instalaci tepelného čerpadla a veškeré další úpravy v objektu, zejména pak zateplení, brát jako spojitý problém. Objekt, kde ve stávajícím stavu může být použitelné jedině TČ velmi vysokého příkonu se může v rámci zateplení dostat do kategorie, že jsou pro něj vhodná ta nejmenší (a tedy nejlevnější) TČ. Kombinovaná investice do zateplení a tepelného čerpadla pak není tak velká, aby se nevyplatilo provést obě úpravy najednou.

Zároveň lze z provedených studií vyzorovat jasnou tendenci z hlediska využívání zemních výměníků. Jsou instalace, kde dispozice TČ znamená velmi nízké náklady na vybavení zemním výměníkem, ale pro obecnou instalaci se zemní výměníky vyplatí v objektech, kde je vyšší teplota v otopné soustavě. Tam je vliv na optimalizaci provozu tepelného čerpadla vyšší. Dalším aspektem, který hovoří pro užití zemních výměníků je využitelnost TČ i pro nižší teploty exteriéru. Ověřované objekty se nacházely v okolí Ostravy a zde nebyl tento jev tak zřejmý, pokud bych do vyhodnocení zahrnul objekt na Kvildě, nelze o výhodnosti zemního výměníku ani v nejmenším pochybovat.

Dalším závěrem vyplývajícím z vyhodnocení je, že pro objekty využívající solární panely je často důležitým faktorem velikost akumulční nádrže. Prosté tabulkové přiřazení ale většinou nezohledňuje dostatečně místní podmínky. Využitím modelů zde představených lze dimenzovat nádrž adekvátně pro konkrétní instalaci.

Zde představené vyhodnocení pochopitelně nenahrazuje plnohodnotný projekt, energetický audit a podobně. Umožňuje však zhodnotit reálně potenciál úspor v daném objektu a na základě něho vybrat směr, kterým se daný objekt může vydat k lepší energetické bilanci. Hlavní výhodou je pak, že pro poučeného uživatele je jednoduché zahrnout specifika dané stavby, v případě ekonomického vyhodnocení pak například specifika lokální ceny energie (např. Stálý zdroj levného dřeva).

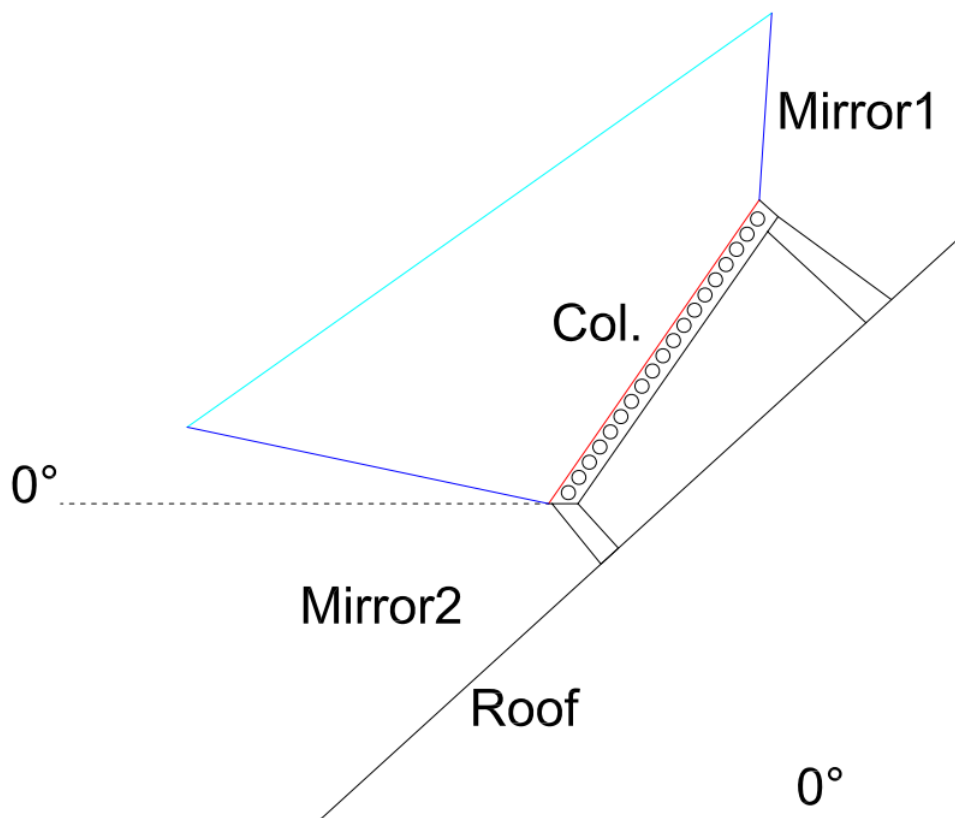
Ve své praxi jsem poznal různý simulační software, výhodou modelů v Mathematice je jednoznačně široká modifikovatelnost a s ohledem na vývoj Mathematicy do laicky využitelnějšího nástroje očekávám další velký posun v této oblasti. Já jsem zpracovával modely v mathematice 5.2 a 8.0, jiné verze nemám k dispozici. Dnes Matematika velice pokročila ve směru „slovních zadání“, kdy není třeba vše zadávat v syntaxi Mathematicy, ale Matematika dokáže rozumět řadě slovních vstupů jako například „Plot Yellow circle, diameter 2“ a numerické metody pokročily v sofistikovanosti, takže mnou prezentované modely by jistě šly velmi zjednodušit směrem k laické přívětivosti. Výhodou Mathematického modelu je také velice se rozšiřující databáze online informací, které může matematika využívat. Zde je to využito jen na získání dat o zamračenosti a průběhu teplot, ale věřím, že v blízké budoucnosti bude v Mathematice možnost vyjádřit oslunění nějaké plochy jednoduchým příkazem namísto stávajícího vyhodnocení speciálním modelem. Využitelnost, rychlost a komfortnost se tedy bude časem pouze zlepšovat.

12. Problematika kombinovaných fotovoltaicko-termických solárních panelů

Jako jeden z cílů mé disertace jsem si vytyčil výzkum v tomto poli, který by vedl k návrhu jednoduchého stacionárního fotovoltaicko-termického solárního kolektoru s koncentrátorem, který by byl vhodný právě i pro malé aplikace typu rodinných domků.

Můj původní návrh (viz následující obrázek), který jsem prezentoval v odborné rozpravě k tématu disertační práce, počítal s možností vybavit každý solární článek dvěma zrcadly (levná část panelu) a díky efektu koncentrace tak zvýšit výnos z fotovoltaicko-tepelné části.

Obr.70



V principu takto může vypadat velmi malá buňka, která se v rámci kolektoru mnohokrát zopakuje.

Variace tvarů vykazovaly různou míru koncentrace a byly vhodnější pro různé způsoby osazení, ale obecně všechny vykazovaly jeden společný neduh a to nerovnoměrné osvětlení fotovoltaické části, což jak známo [11] vede ke zhoršení funkčnosti, případně i snížení životnosti fotovoltaických článků. Proto dané tvarové variace lze případně doporučit pro čistě termické panely, kde díky efektu koncentrace zvýšíme procento roční využitelnosti, ale pro fotovoltaicko termické články nebude pravděpodobně přínos ekonomicky návratný, zvláště s přihlédnutím k vývoji cen fotovoltaických článků.

Pro fotovoltaicko-termické kolektory však zbývá ještě šance jak zajistit koncentraci s účinkem přiměřeným vynaloženým nákladům. V následujícím oddíle proto popíšu variantu s difúzními koncentrátory. Na tuto myšlenku mě přivedlo řešení světlovodů, kde se difúzní

část optiky využívá k usměrnění světelného toku, aby bylo možno navrhnout světlovod nezávislý na pozici slunce vůči vstupnímu otvoru.

V principu jsou možné dva způsoby využití difúzního povrchu. První spočívá v „usměrnění“ světelného toku průchodem přes difúzní materiál a následně využití zrcadlových koncentrátorů. Druhý pak ve využití difúzně odrazné plochy jako samotného koncentrátoru.

Využití se stejným geometrickým uspořádáním jako světlovod nemá pro fotovoltaicko-termickou aplikaci příliš smysl, protože činitel prostupu u difúzních krytů bývá běžně maximálně 0,75 a to je pro tuto aplikaci poměrně málo. I tak by sice bylo možné dosáhnout činitele koncentrace, který by zvýšil využitelnost fotovoltaicko-termické části, ale s ohledem na to je šance najít finančně návratné řešení malá. Proto jsem se zaměřil na druhý princip – využití difúzních ploch ke koncentraci odrazem.

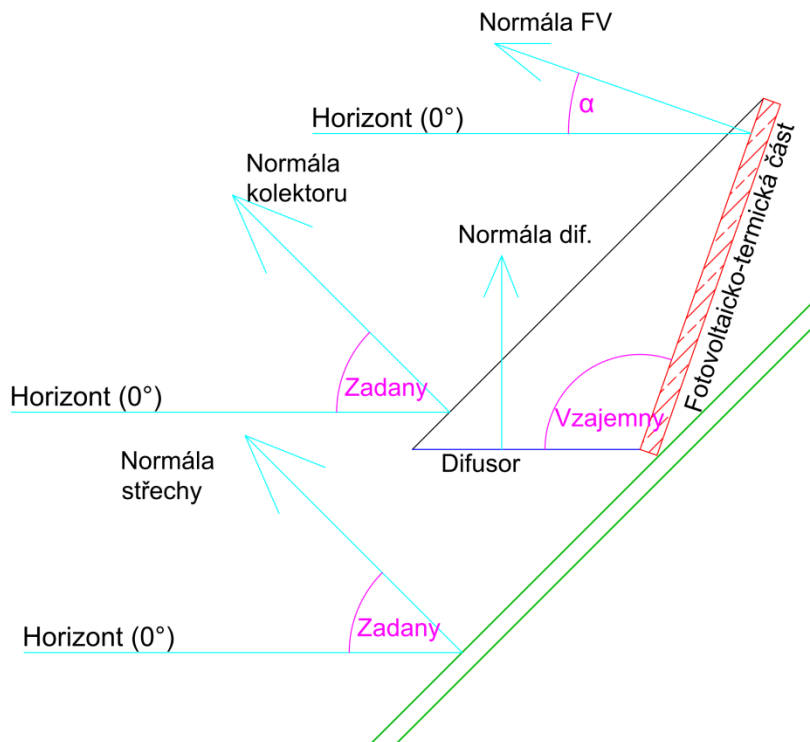
Jako hlavní parametr pro vyhodnocení jsem zvolil využití FV části, protože ve výsledku je FV část dominantní složkou ceny panelu. Jako srovnání pro každou modelovanou instalaci využívám klasický FV kolektor, který je montován přímo na střechu. Cílem je pak prozkoumat jaké spektrum panelů by bylo vhodné dále analyzovat a případně v návazném výzkumu dospět ke zkušební prototypové instalaci.

12.1. Model pro analýzu solárních kolektorů

Základem pro vyhodnocení je obdobně jako pro vyhodnocení oslunění objektu v části zabývající se budovou znalost polohy slunce a zamračení, což umožní spočítat zachycení slunečního záření jednotlivými plochami.

Základní mechanika je totožná, spočívá ve vyjádření jednotkového normálového vektoru plochy a jednotkového vektoru paprsku.

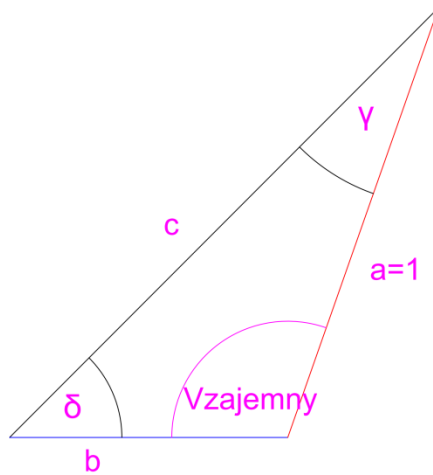
Obr.71



Rovinu difusoru volím v rozsahu vodorovného difusoru (0°) až po 20° odchýlení od vodorovné roviny (příklon směrem ke kolektoru). Větší příklon se již neosvědčuje z důvodu toho, že příliš cloní kolektoru samotnému.

Jako další krok musím vyjádřit účinnost přenosu záření z difuzoru na kolektor.

Obr.72



a určuji jako měrnou jednotku, volím tedy 1.

$$b = a * \frac{\sin \gamma}{\sin \delta} \quad (1.100)$$

$$c = a * \frac{\sin(\text{vzajemny})}{\sin \delta} \quad (1.101)$$

Kde $\gamma = \text{zadany} - \alpha$ a $\delta = 180 - \text{vzajemny} - \gamma$.

α je úhel normály FV části od vodorovné roviny, zadany je úhel normály zasklení od vodorovné roviny, vzajemny je vzájemný úhel FV a difúzní části.

Poté můžu definovat funkci

$$FceA(u) = \int_{pomU}^{\pi/2} \cos(x) dx \quad (1.102)$$

Kde $\cos(x)$ je dán plně difúzním odrazem [14] a

$$pomU = -\frac{\pi}{2} + \frac{(180 - (180 - \text{vzajemny} - u)) * \pi}{180} \quad (1.103)$$

pozn.: stupňové veličiny zadávám ve stupních, kde je to pro pochopení modelu nutné nechávám vzorce včetně konstant spojených s převodem na radiány. Samozřejmě zadání musí být homogenní, tedy pokud v modelu někde zadávám proměnnou ve stupních využívám ve vzorcích buď označení „Degree“ nebo převodní konstantu $\frac{\pi}{180}$.

Takto pak vyjádřím účinnost daného geometrického uspořádání:

$$\eta_g = \frac{\int_0^\gamma FceA(u)}{\gamma} \quad (1.104)$$

$$PrispevekDifuzoru = b * \rho_{dif} * \eta_d * \eta_g \quad (1.105)$$

Kde η_d (-) je účinnost zachycení slunečního záření difusorem daná vzájemnou pozicí difuzoru a slunečních paprsků a ρ_{dif} je činitel odrazu difuzoru.

Celkovou účinnost zachycení slunečních paprsků fotovoltaickou částí pak dostávám ze vztahu

$$\eta_{celkova} = \eta_{prima} + PrispevekDifuzoru \quad (1.106)$$

Přičemž η_{prima} je účinnost přímého zachycení FV částí panelu difusorem daná vzájemnou pozicí panelu a slunečních paprsků.

Jak je z těchto definic vidět, vše je vztaženo k ploše FV části, potažmo k rozměru a . Toto je odvozeno z úvahy, že FV část je ten nejdražší komponent. Samořejmě v rámci výsledků sleduji i celkový nárůst plochy kolektoru, protože tato úvaha je relevantní dokud nepřidáme do kolektoru příliš dalších komponent.

Zároveň je třeba vzít v potaz jednu souvislost. Návrh nemá být cílen na zásadní průlom ve využití FV článků, ale celkový design má podporovat jednoduchou integrovatelnost termální složky a poskytnout takový faktor koncentrace, aby byla využitelnost termické části vzhledem k mechanismu tepelných ztrát kolektoru minimálně srovnatelná s klasickými plochými kolektory.

V modelu dále integruji okamžitou účinnost přes celý vyhodnocovací čas.

$$CelkovyZisk = \int \eta_{celkova} \quad (1.107)$$

Protože nechci získat jedno číslo za rok (i když je to hodně důležitý údaj) nadstavil jsem mechaniku výpočtu tak, že se takto počítá vždy jeden den a v následujícím kroku provedu příkaz 365-krát pro jednotlivé dny v roce (vždy s individuálními informacemi o poloze slunce a zamračenosti).

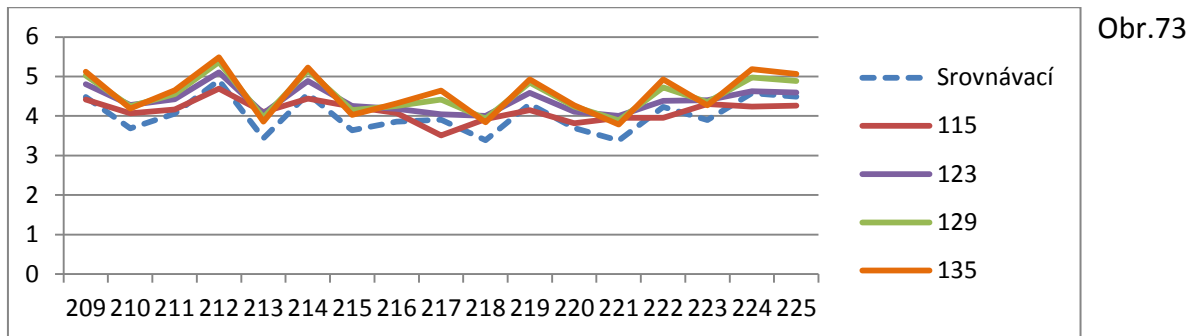
Toto vyhodnocení provedu pro různé úhly mezi kolektorem a difusorem (od minimálního po maximální vzájemný úhel s krokem 2°) a tím získám sadu dat pro zvolenou orientaci kolektoru a střechy.

Vždy vyhodnocuji i oslunění klasického kolektoru, který je namontován ve stejném úhlu jako má výsledné zasklení navrhovaného kombinovaného kolektoru, přičemž sleduji hlavně poměr účinnosti využití FV části (neuvažuji tedy stejné plochy kolektorů, ale stejné plochy FV článků).

Hlavní výsledek je soubor numerických hodnot, které srovnávají celkový roční zisk s referenčním plochým kolektorem. Poměrné účinnosti jsou pak vypsány v takovémto listu:

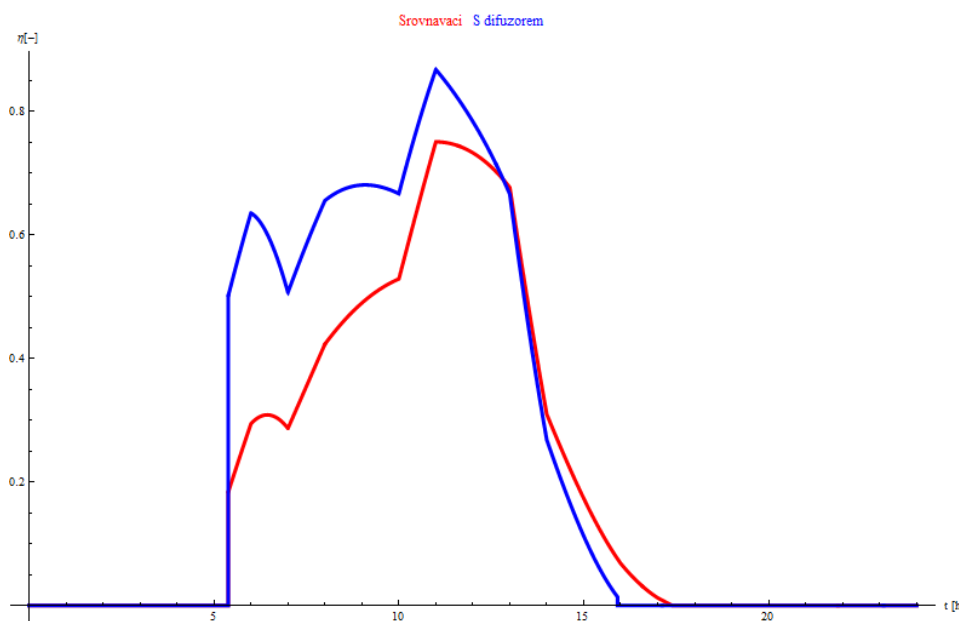
{0.979292543439252, 1.0011485373794389, 1.0223439616766081,
1.0428259105830315, 1.0625196169496687, 1.080927668617769,
1.0978075085186758, 1.113187976928716, 1.126982349743128,
1.139021809994671, 1.1493963838734256}

List je seřazen od minimálního vzájemného úhlu panelů kolektoru a difuzoru po úhel maximální. Ukládám i dílčí informace o výkonech po dnech, lze tedy vyprodukovat i grafický výstup, například:

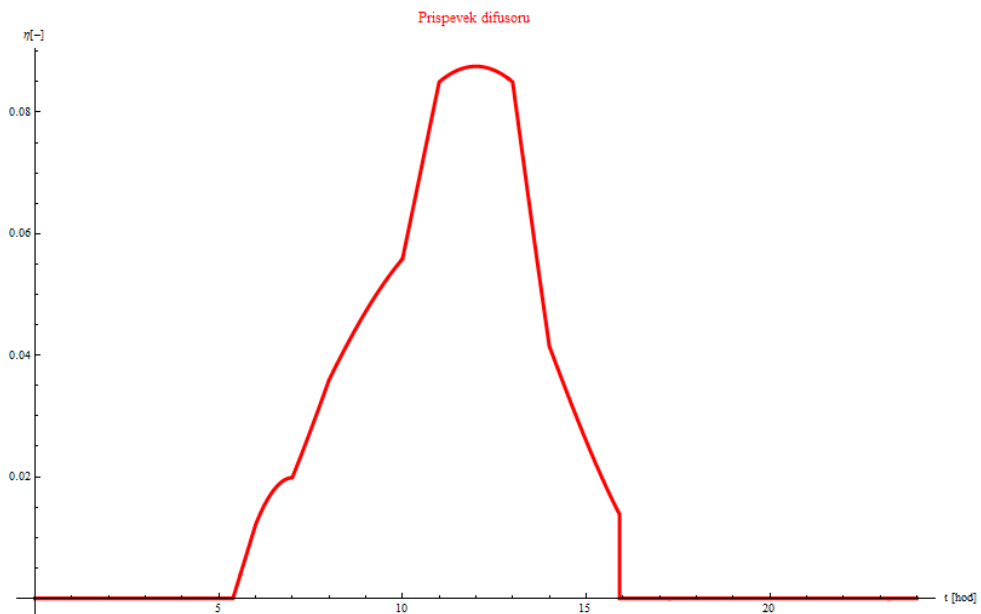


Toto je konkrétní případ instalace na střechu s odklonem 60° na východ, normála střechy 70°, normála FV části 45°.

Pro libovolný konkrétní den lze provést přesné srovnání, zde konkrétně den č. 100, vzájemný úhel difuzoru a FV části 135°.



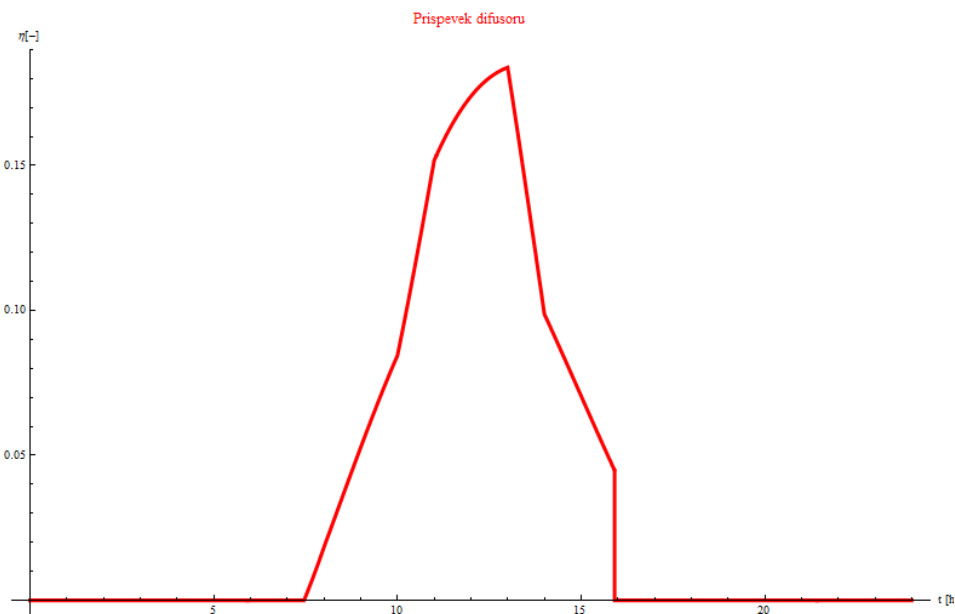
Tvar je pochopitelně deformován oblačností konkrétního dne, ale princip přínosu analyzovat lze. V tomto případě je již značným přínosem orientace FV části, samotný difusor ve skutečnosti má příspěvek minoritního rázu jak lze vidět z následujícího grafu.



Obr.75

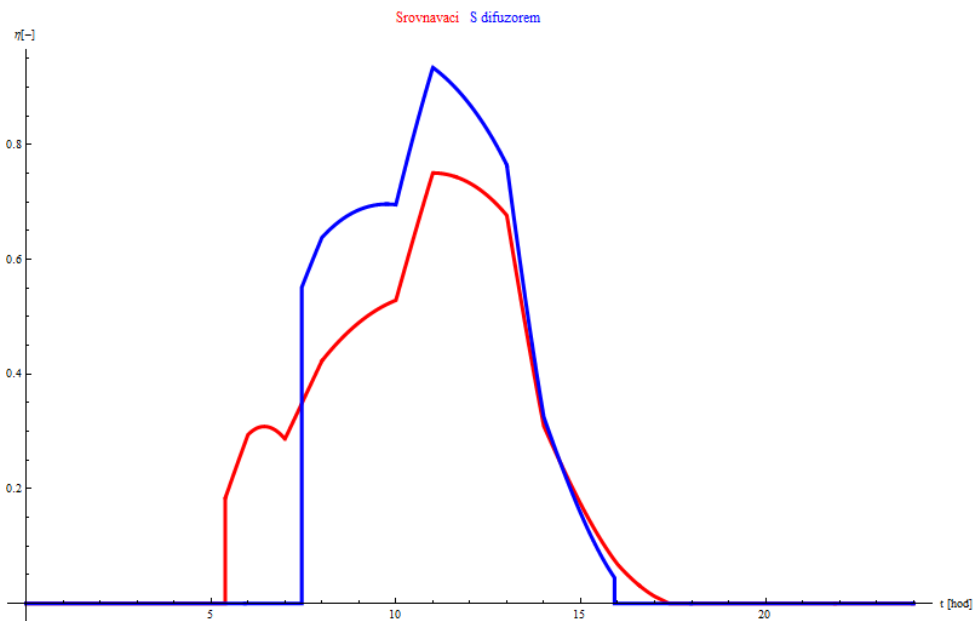
Uspořádání tedy nevykazuje příliš vysoký faktor koncentrace, což je pochopitelné s ohledem na vysokou hodnotu vzájemného úhlu.

Pokud bych zvolil úhel 115° , vyhodnocení by pochopitelně dopadlo z hlediska příspěvku difuzoru lépe:



Obr.76

V tomto případě ale dojde již k tomu, že difuzor FV panelu stíní:

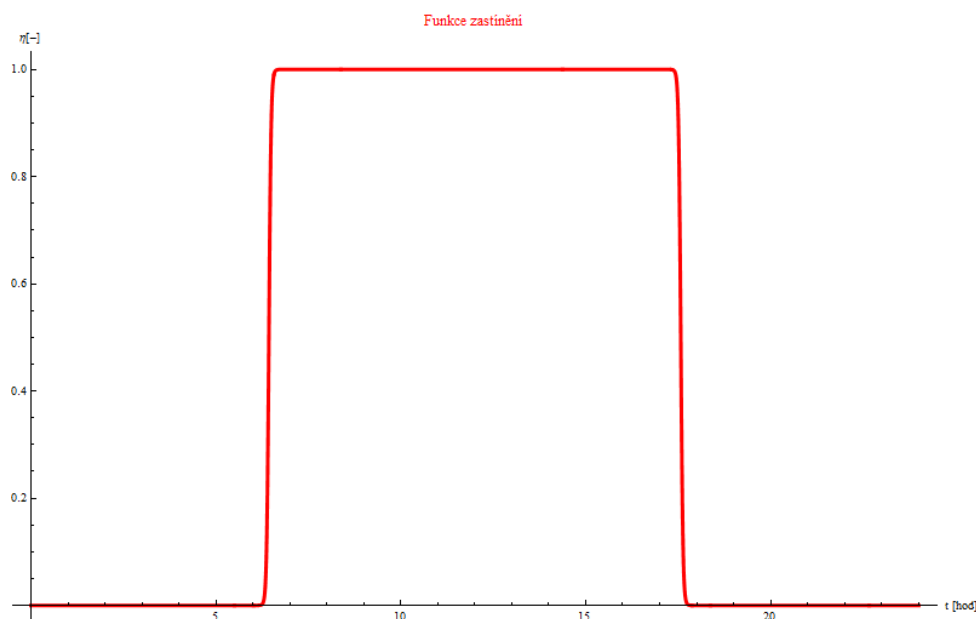


Obr.77

V tomto uspořádání dochází k přenosu větší části záření zachyceného difuzorem na FV část, ale celkově je účinnost menší, protože k zaclonění dochází v části dne, kdy je vysoká účinnost zachycení samotnou FV částí.

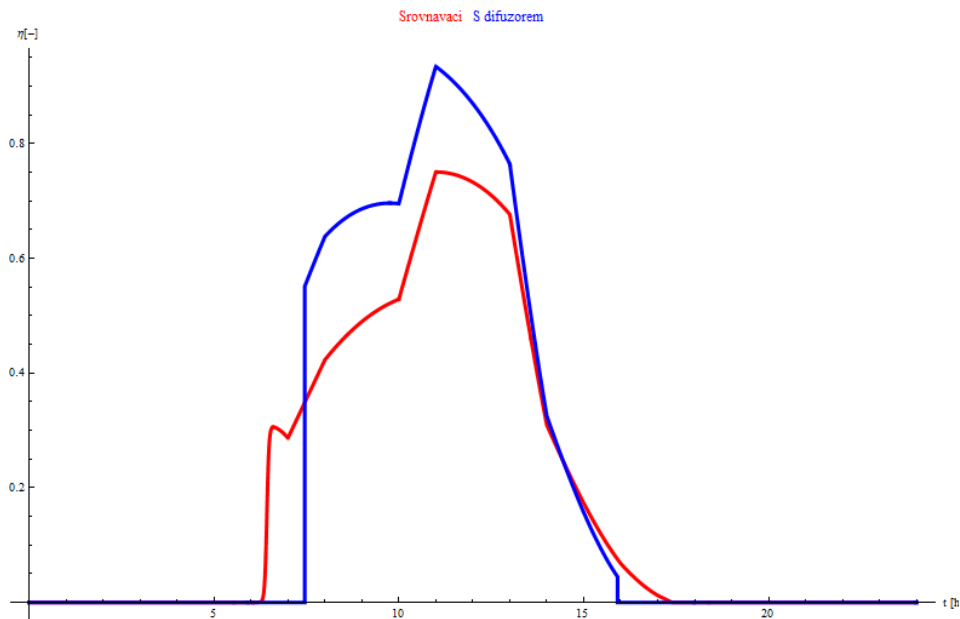
Samozřejmě jsou ve hře ještě lokální podmínky. Například, pokud má dům takové okolí, že do výšky slunce do 10° nad obzor je panel stejně zastíněn vyplatí se osadit difuzor minimálně se stejným sklonem (což by v tomto případě odpovídalo 125°). K vyhodnocení takového objektu stačí do modelu zahrnout nulovací funkci do 10° nad obzorem.

Což vypadá následovně:



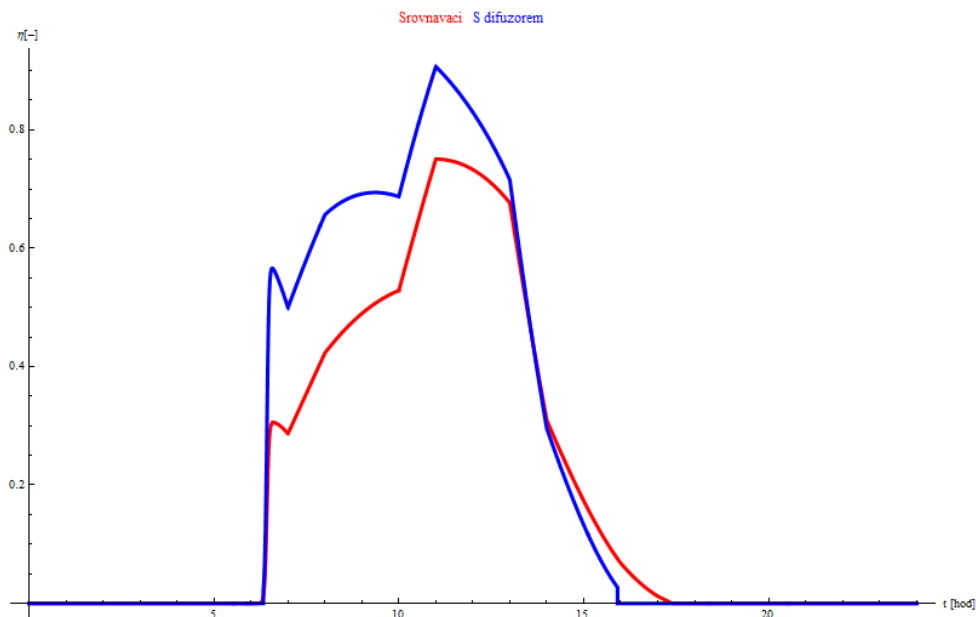
Obr.78

Když je takto definováno zastínění, tak můžu vygenerovat upravený průběh pro účinnost kolektoru:



Obr.79

Jak je vidět, tak v tomto případě už menší úhel mezi difuzorem a FV částí přináší menší negativa, ale pořád to není ono. Proto úhel upravím na 125°.



Obr.80

Optimální stav bude v tomto případě ležet někde v rozmezí 125° a 115°, podle jednoho vzorového dne toto ale nelze v žádném případě odvodit.

V tomto případě upravím model tak, že vynechám výpočty pro rozsah 125°-135°, protože vím, že by byly zbytečné z hlediska hledání optima. Na základě zkušeností bych mohl omezení rozšířit a počítat třeba jen tři úhly, ale to závisí na zkušenostech s modelem.

V tomto případě získávám roční účinnosti ve tvaru:

{1.0658331777798622, 1.0958166670224314, 1.1247681015530515,
1.1522564347820017, 1.1748490103712228, 1.184810429046857, A12, A14, A16,
A18, A20}

Kde Axy odpovídá úhlům, které nebyly vyhodnocovány s ohledem na zastínění, první prvek je úhel minimální, další vždy +2°. Numericky by samozřejmě vyhodnocení nic nebránilo, ale jelikož bylo zřejmé, že se v těch úhlech optimum nenachází, tak by zahrnutí dalších prvků bylo zbytečným plýtváním časem.

Zajímavé jsou samozřejmě poměrné délky výsledného panelu, které vychází z geometrického uspořádání (řazení totožné, v modelu se jedná o hodnotu „c“).

{1.580099407155496, 1.6359578856917303, 1.6981651449596977,
1.7680492814201507, 1.8473306565370142, 1.938278864039218,
2.043951586696315, 2.1685699361313393, 2.31813084262235, 2.501451713026509,
2.7320508075688776}

Z hlediska poměru výkon/cena záleží na konkrétní technologii výroby a ceně jednotlivých komponent, ale pro tuto konkrétní konfiguraci se bude pravděpodobně optimum nákladů pohybovat někde v rozmezí úhlů 117° až 123°.

12.2. Vyhodnocení typů kolektorů

Výše uvedený vzorový příklad ukazuje způsob vyhodnocení, nyní je potřeba analyzovat obecně dostatek vzorů k pokrytí základních zákonitostí a vytipování optimálních typových řad kolektorů.

Typově lze řešit dva druhy této úlohy. Jeden je kontaktní kolektor na šikmé střeše, tam je jednoznačný sklon kolektoru. Druhý způsob je vyhodnocení kolektorů montovaných na plochou střechu. Tam je třeba nejdříve určit optimální sklon „srovnávacího“ kolektoru a následně pro tento sklon (a blízké úhly) najít optima kombinovaného kolektoru.

12.2.1. Osazení na plochou střechu

První otázkou, pokud chci vyhodnotit co nejobecněji je vliv zastínění. Má v této konfiguraci smysl navrhovat různé kolektory podle míry zastínění nad obzor?

Samozřejmě, v případě extrémnějšího zastínění (cca 25°) jako má můj dům je třeba pro optimální zisk osadit kolektor, jehož difuzor bude svírat s vodorovnou rovinou také minimálně 25°, otázka pro tuto chvíli ale zní, nakolik se projeví osazení kolektoru tvarově optimalizovaného například pro 10° zastínění v rozmezí zastínění 0-20°?

Pro samotný plochý kolektor vychází optima pro zastínění 0, 10 a 20% při instalaci 41, 44 a 47° sklonu normály vůči vodorovné rovině.

Zastínění 0°	Zastínění 10°	Zastínění 20°
35 1376	35 1279	46 1035
39 1383	40 1290	47 1036
40 1384	43 1292	48 1035
41 1384	44 1292	50 1034
42 1384	45 1292	52 1032
44 1382	48 1288	55 1026
	50 1284	

Číslo, podle kterého srovnávám, je integrál měrné účinnosti při ročním provozu.

Jelikož na ploché střeše mě nezajímá srovnání s identicky skloněným plochým kolektorem (jelikož plochý kolektor mohu postavit do optimálního sklonu), tak budu sledovat integrály měrných účinností jednotlivých konfigurací při různých sklonech kombinovaného kolektoru namísto srovnávání s účinností stejně sklopeného normálního kolektoru, jak to budu provádět pro šikmé střechy.

Poznámka k následujícím tabulkám, v příloze jsou data výsledků pro více konfigurací, zde pro zachování alespoň základní přehlednosti vypisuji jen vybrané, které dodatečně ilustrují trend výsledků.

Pro případ zastínění 0° vychází z hlediska maximálního FV zisku optimálně difusor v horizontální rovině a FV část ve sklonu 41°, k malému poklesu FV zisku dochází pro úhly difusoru do řádově 8°, kdy zároveň dojde ke snížení nárůstu velikosti kombinovaného kolektoru. V závislosti na sklonu kombinovaného kolektoru pak vychází přesné poměry:

Sklon kolektoru	Difusor 0°		Difusor 8°	
	Suma	c	Suma	c
55	1474	1,31	1445	1,23
60	1508	1,51	1477	1,36
65	1548	1,78	1511	1,53

Plošší kolektor než s úhlem normály 65° neuvažuji pro zachování jisté samočisticí schopnosti.

Pro zastínění 10° volím logicky FV část 44° a vyhodnocuji opět soubor hodnot, které dávají potenciál k zajímavým výsledkům.

Sklon kolektoru	Difusor 8°		Difusor 10°		Difusor 16°	
	Suma	c	Suma	c	Suma	c
53	1344	1,14	1344	1,13	1295	1,1
58	1373	1,26	1372	1,24	1321	1,19
63	1403	1,41	1401	1,38	1347	1,29
68	1436	1,62	1433	1,56	1375	1,43

V tomto případě lze ze srovnání variant pro zastínění 0° a 10° jasně vyčíst, že samozřejmě kolektory pro různé zastínění mají optimum v různých hodnotách, ale pro zastínění 0° lze využít kolektory s úhlem difusoru kolem 5° (kompromis mezi maximálním měrným ziskem FV části a kompaktním rozměrem), které po naklonění o 3° budou mít sklon difusoru kolem 8° a opět získáme použitelný kolektor, byť lepší poměr zisk/rozměr by byl dosažen pro kolektory s difusorem cca 10°.

Závěrem tohoto srovnání je tak zejména fakt, že lze navrhnout takové kolektory, které budou málo ovlivněné zastíněním do 10° a to je z hlediska toho, že typizace výrobků je důležitý předpoklad realizovatelnosti dobrá zpráva.

Nyní provedu stejné srovnání pro zastínění 20°, úhel FV části 47°:

Sklon kolektoru	Difusor 10°		Difusor 18°		Difusor 20°		Difusor 26°	
	Suma	c	Suma	c	Suma	c	Suma	c
56			1076	1,11	1074	1,1	1001	1,08
61			1098	1,2	1096	1,18	1020	1,14
66	1127	1,42	1120	1,31	1116	1,28	1038	1,22

V případě 20° zastínění v souladu s logickými předpoklady vychází optimum kolem sklonu difuzoru kolem 20°, na což nejsou kolektory pro rozpětí 0-10° využitelné. Logicky tedy vychází, že pro vyšší zastínění je už potřeba samostatná řada kolektorů.

Obecně tyto výsledky podtrhují fakt, že zatímco klasický plochý kolektor má relativně malou odchylku ideální polohy (zastínění z 10° na 20° posune optimální sklon pouze o 3°), s rostoucím úhlem zastínění roste i požadavek na přesnější dodržení tvaru kolektoru. Není nutně z hlediska absolutního zisku (viz 66°/10°), ale zisk zůstává fakticky konstantní při zvyšování plochy kolektoru.

Předchozí postup byl zajímavý z hlediska určení vlivu orientace difuzoru, nelze ale předpokládat, že optimum pro kombinovaný kolektor bude shodné, proto provedu ještě vyhodnocení z hlediska sklonů FV části. Proto dále uvedu další zajímavé výsledky:

Zastínění 20°, sklon kolektoru
61°, difusor 20° (referenční
hodnota 1036)

Sklon FV	Suma	c
40	1127	1,25
30	1156	1,30

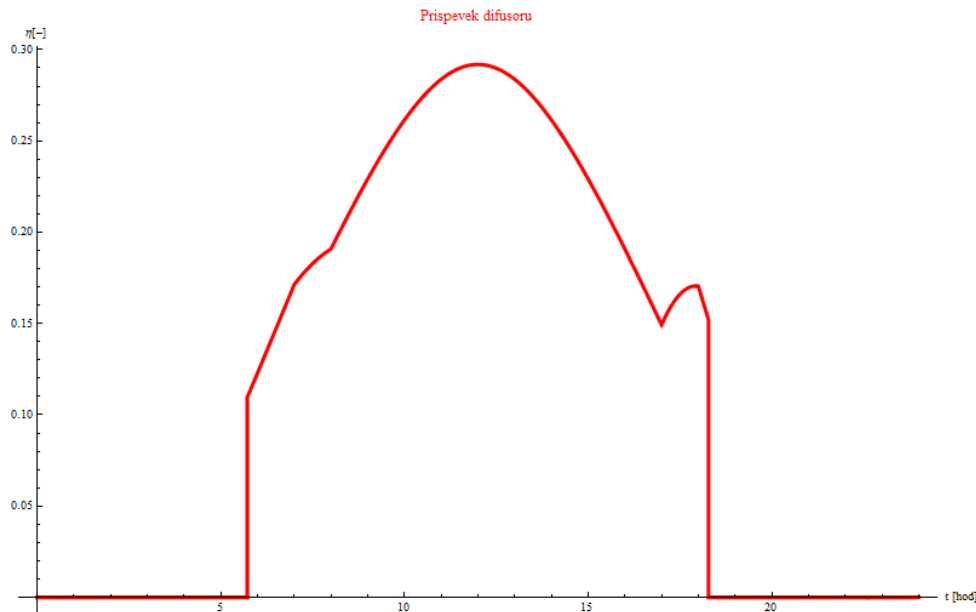
Zastínění 10°, sklon kolektoru
63°, difusor 10° (referenční
hodnota 1292)

Sklon FV	Suma	c
40	1432	1,44
30	1494	1,56
20	1540	1,64

Zastínění 0°, sklon kolektoru
65°, difusor 8° (referenční
hodnota 1384)

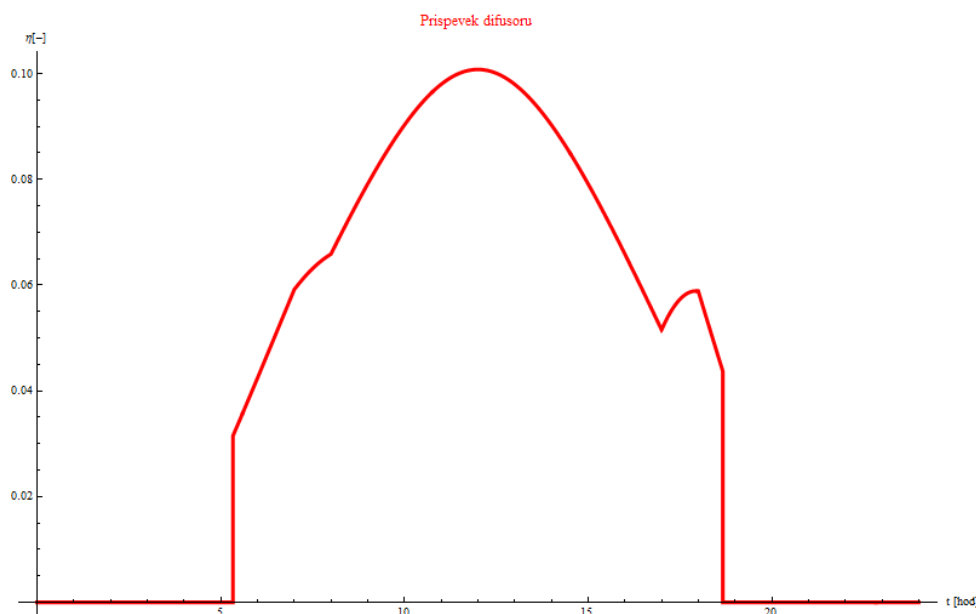
Sklon FV	Suma	c
35	1561	1,64
30	1597	1,70
20	1655	1,72
15	1675	1,74

Z výsledků vyplývá, že jsou zajímavé další sklony FV částí, nikoli jen ty, které jsou optimální pro klasický plochý kolektor. Při strmější orientaci FV části dochází ke zlepšení účinnosti využití difusoru. Pro názorný příklad graf příspěvku difusoru pro FV 15°/kolektor 65°/difusor 8° (vzorový den 173)



Obr.81

A pro srovnání při změně úhlu FV části na 40°:

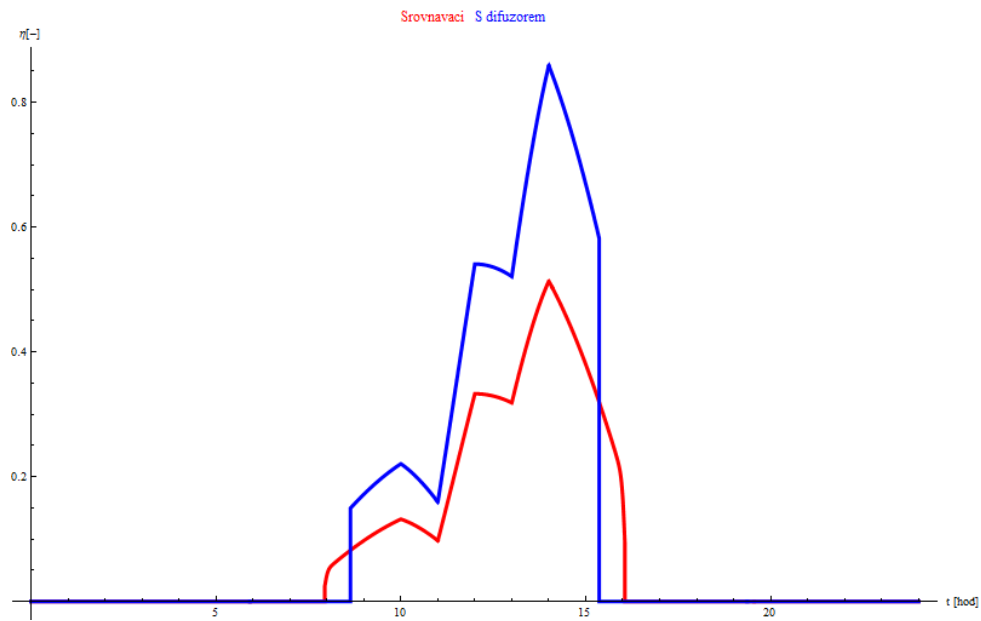


Obr.82

To je pozitivní zpráva z hlediska typizace, úhel FV části lze pojmout relativně volněji a výsledně tedy využít jen jeden typ kolektoru vždy instalovaný s ohledem na úhel zastínění.

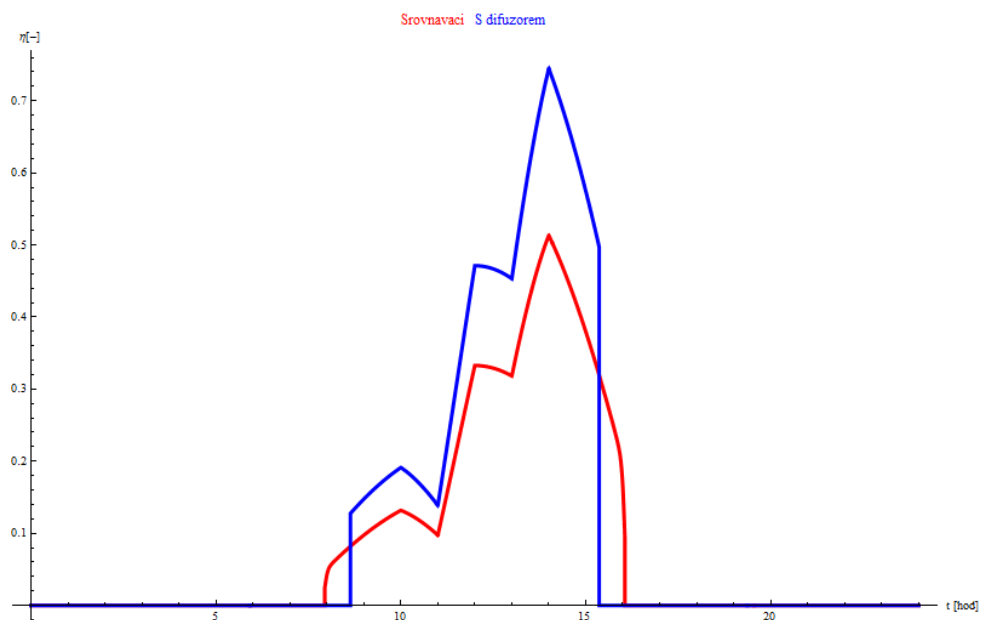
Pro srovnání ještě získk těchto dvou variant ve dni 10, aby byl vidět efekt koncentrace pro termické využití v zimě:

FV 15°:



Obr.83

FV 40°:

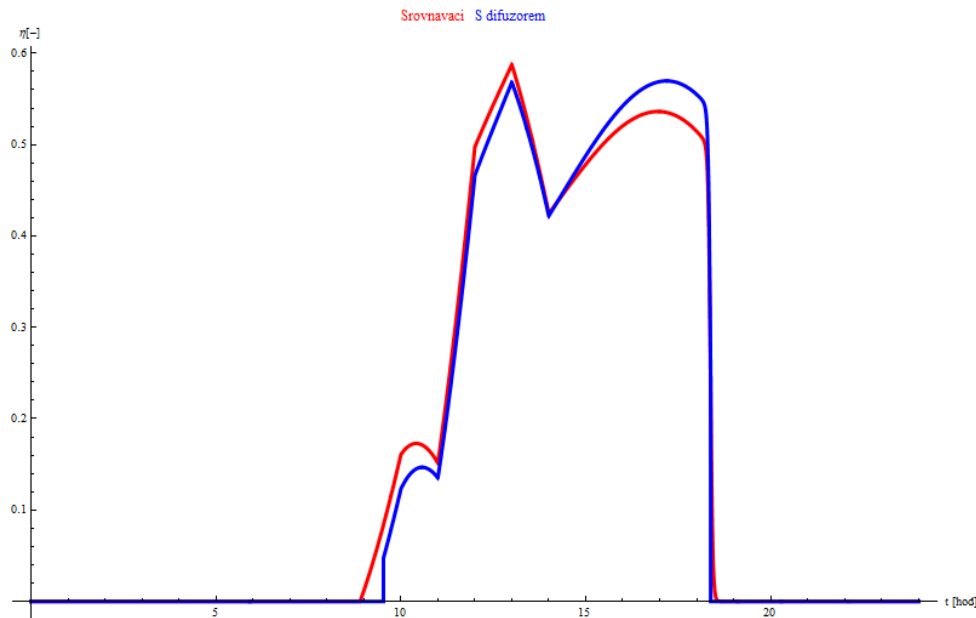


Obr.84

Kolektory se strmým osazením FV části získávají také větší koncentraci, což je z hlediska využití pro termické účely zásadní plus.

12.2.2. Osazení na šikmou střechu

V případě osazení kolektoru na šikmou střechu provedu srovnání jak jsem naznačil dříve s tím, že se opět zaměřím nejen na absolutní čísla, ale rovněž na vliv určujících parametrů. Výsledkem je, že pro odklon 90° (orientace na západ) lze dosáhnout jisté úrovně koncentrace, byť výsledky nejsou nijak závratné.

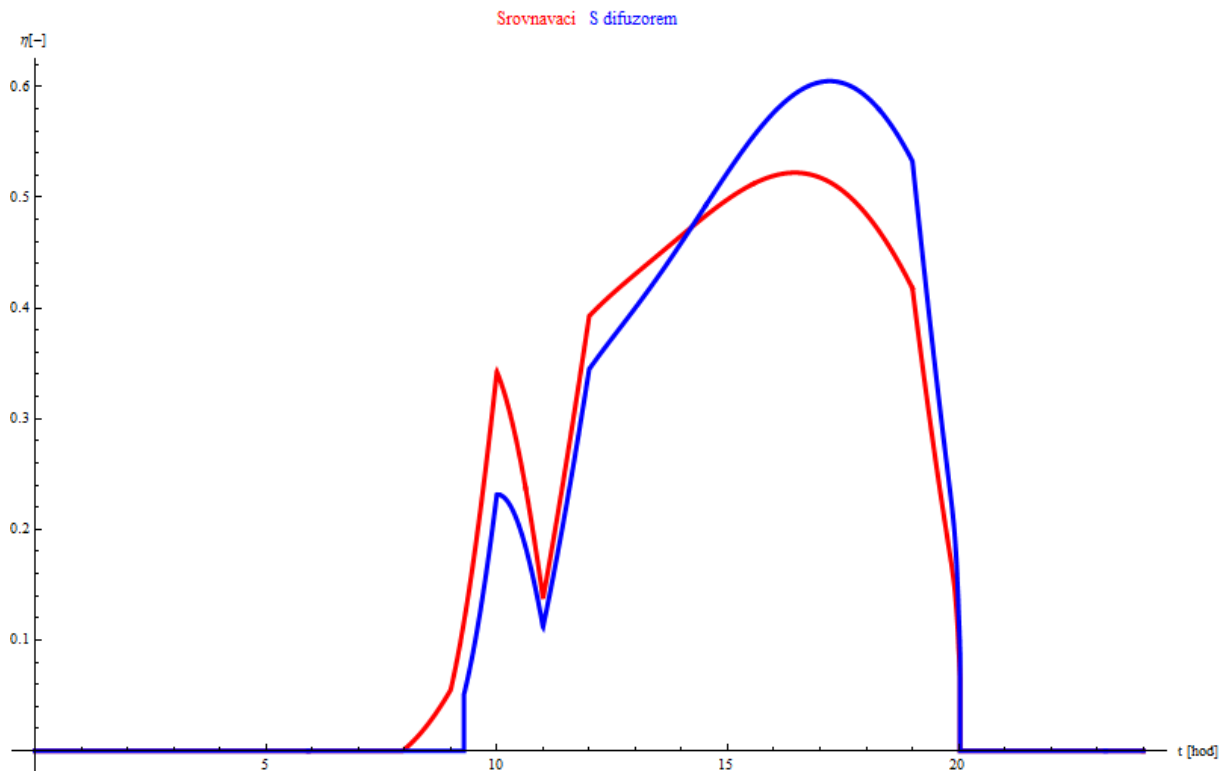


Obr.85

Je zde však jeden aspekt z hlediska termického využití, který vychází z tvaru charakteristiky – k největšímu posílení zisku dochází na konci cyklu, kdy zároveň je akumulční nádrž nejvíce ohřátá a zesílení zisku zde napomáhá udržet termickou funkci kolektoru. Toto je specifikum takto konstruovaných kolektorů. Pro západní orientaci tedy je využití zajímavé i v případě, že integrál účinnosti vychází stejně.

Například pro sklon FV části 20° , difusor v horizontální rovině a sklon kombinovaného kolektoru 60° vychází účinnost 1,12. Tato konfigurace již ale vykazuje takový nárůst délky (87%), že výsledný kolektor by již pravděpodobně nebyl ve finále finančně zajímavý.

Pro ilustraci vlivu orientace na západ ještě jeden srovnávací graf, úhel FV 30° , úhel kolektoru 50° , difusor v horizontální rovině. Přesto, že tato konfigurace vykazuje zvýšení účinnosti jen 4,5% při zvýšení plochy kombinovaného kolektoru o 34%, využitelnost termické složky zde stoupne výrazně, zejména pak v zimních měsících, kdy je u klasických plochých solárních panelů problém dostat jejich teplotu na potřebný potenciál k otopné funkci.



Obecně se ve výpočtech této části projevuje jeden aspekt. Jediné „životaschopné“ varianty jsou ty, kde úhel difuzoru odpovídá úhlu zastínění. Pokud difuzor stíní byť malou část paprsků dochází velmi rychle k poklesu účinnosti konfigurace pod 100%. Naopak pro účinnost není úplně zásadní úhel FV části. Všechny konfigurace vedou k jistému zesílení, které není ale nijak zásadní. Problém tedy je v rozmanitosti sklonů střech. Aby bylo zajištěno, že úhel difuzoru bude 0° až -5° (potažmo adekvátně více podle úhlu zastínění) bylo by třeba vyrobit speciální panel pro každých 5°-10° sklonu.

Důvod je nasnadě, kolektory na jižní stěně (či na ploché střeše) jsou ozářeny sluncem, které je nízko nad obzorem pod značným úhlem, zastínění několika stupňů proto nehraje tak vysokou roli. V případě kolektorů se značným odklonem od jihu dochází k tomu, že slunce těsně nad obzorem je zachycováno s maximální účinností a tedy ztráta každého stupně, který zůstane nevyužit kvůli zastínění difuzorem, je ztráta příliš velká.

Vybrané výsledky:

Sklon kolektoru 60°, orientace západ, difuzor v hor. Rovině

Sklon FV	účinnost	"c"
50	1,03	1,28
40	1,07	1,53
30	1,1	1,73
20	1,12	1,88
10	1,12	1,97

Sklon kolektoru 50°, orientace západ, difuzor v hor. Rovině

Sklon FV	účinnost	"c"
40	1,02	1,19
30	1,05	1,35
20	1,06	1,46
15	1,06	1,50
10	1,05	1,53

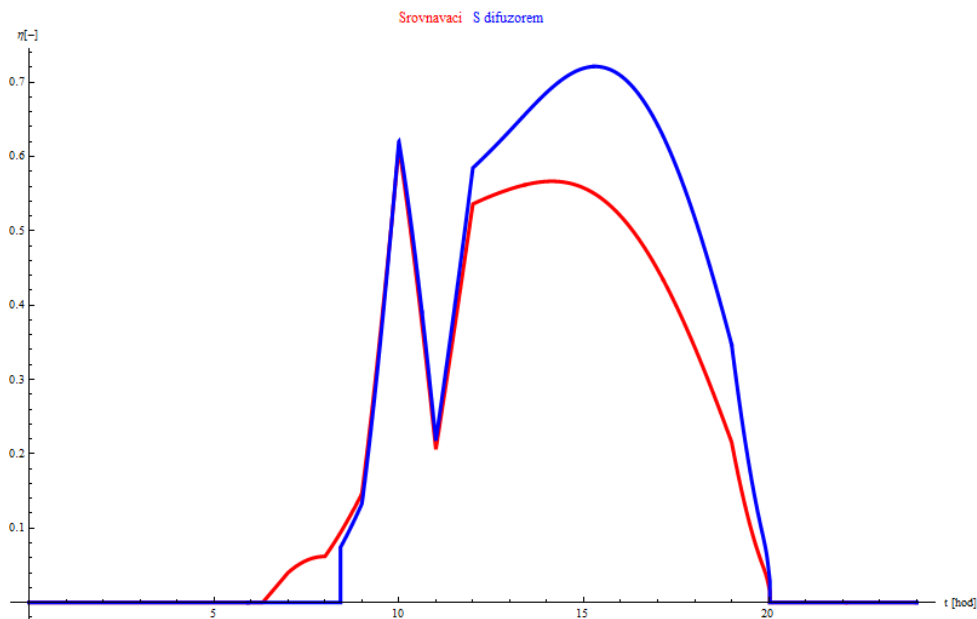
Sklon kolektoru 50°, orientace jihozápad (45°), difusor v hor.
Rovině

Sklon FV	účinnost	"c"
40	1,05	1,19
30	1,10	1,35
20	1,13	1,46
15	1,14	1,50
10	1,15	1,53
0	1,14	1,56

Sklon kolektoru 60°, orientace jihozápad (45°), difusor v hor.
Rovině

Sklon FV	účinnost	"c"
50	1,07	1,28
40	1,14	1,53
30	1,20	1,73
20	1,25	1,88
10	1,28	1,97

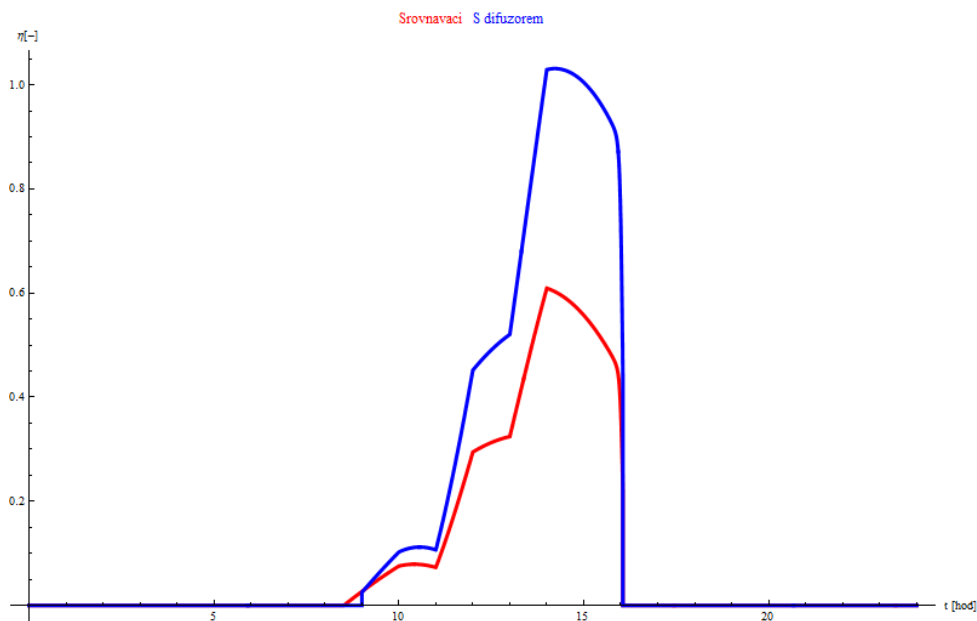
Zde je vidět jeden podstatný aspekt a to, že stejně tvarované kolektory, které pro čistě západní směr byly stěží použitelné získávají pro JZ směr podstatně lepší účinnost.



Obr.86

Tento vzorový graf ilustruje proč (FV10°/kolektor60°). Dochází k omezení funkce v úseku, kde je nízká účinnost a k posílení v části, kde je účinnost vysoká, zároveň pro JZ směr narozdíl od vyložení Z směru dochází k tomuto efektu celoročně.

Například pro den 10 (FV10°/kolektor60°) vypadá srovnávací graf následovně:



Obr.87

Pro zimní provoz je vyšší sklon FV části jednoznačně výhodný a daná konfigurace bude jednoznačně podstatně využitelnější i pro termické využití, kdy je třeba vzít v úvahu (viz kapitola o termických kolektorech) není získaná energie přímo úměrná intenzitě záření, ale s intenzitou záření roste účinnost.

12.3. Závěry pro kombinované kolektory

Cílem této práce bylo v této části ověřit ideu použití fotovoltaicko-termických kolektorů s koncentrátorem jako použitelné koncepce pro malé instalace. Zajímavé jsou zejména konfigurace se strmější fotovoltaickou částí, kde je dosaženo podstatně lepšího efektu využití termické části.

V rámci této práce jsem se zaměřil na kritérium, že je třeba zlepšit využití fotovoltaické části, což jsem dokázal. Předmětem následného výzkumu a vývoje by mělo být jednak zhodnocení fungování termické části, pro což modely objektu a kolektoru, které jsem vypracoval poskytují dobrou výchozí bázi, dále pak zhodnocení výrobně-ekonomického potenciálu.

Určující parametry (nárůst účinnosti versus nárůst plochy) vycházejí v relacích, kdy existuje možnost, že výsledný produkt bude ekonomicky zajímavý. Z uživatelského hlediska pak vychází optimálně využití pro kolektory s orientací jih až jihozápad, kdy dojde k nejvyššímu nárůstu využití termické části.

13. Závěr

Zvolené téma je poměrně široké, proto tato disertační práce nemá poskytovat jeho stoprocentní pokrytí, cílem je pomocí matematických modelů vytvořit nástroje umožňující část problematiky vyhodnotit pro konkrétní objekty (projekty).

13.1. Přehled výsledků disertace včetně původního přínosu doktoranda

V úvodní části jsou popsány teoretické základy a obecně metodiky k řešení daného typu problematiky. Výstupem této práce nejsou konkrétní výsledky, ale programy umožňující flexibilní vyhodnocení:

Zjednodušený model objektu

Základní zjednodušený model (Kapitola 5) slouží k základnímu vyhodnocení chování objektu. Lze ho využít pro rámcové určení ztrát, dimenzování tepelných čerpadel a základní srovnání různých zdrojů tepla v rámci navazujícího modelu pro ekonomické vyhodnocení (kapitola 6).

Model využívá data o průměrné teplotě, nad kterými je aplikována fiktivní oscilace, která simuluje reálné výkyvy teplot. Tento přístup vede k nejrychlejšímu vyhodnocení, kdy pro přesnější data je určen komplexní model.

Komplexní model objektu

Komplexní model (kapitola 7) byl zpracován ve dvou variantách. První varianta počítá dynamické chování objektu s ohledem na tepelné kapacity, je však pomalá a hodí se pouze k jednorázovému ověření výsledků, nikoli pro vyhodnocování různých variant optimalizace. Druhá varianta počítá obvodové stěny zjednodušeně se zanedbáním kapacit pomocí vztahů pro ustálený stav, vznikající nepřesnost je v případech objektů s vysokou kapacitou eliminována úpravou funkce teploty. Ekonomické vyhodnocení optimalizace a zhodnocení je provedeno v rámci navazujících kapitol s příkladovými studiemi (Kapitoly 8-10). Výstupy modelu pro jednotlivé veličiny a jednotlivé dny umožňují analyzovat chování objektu a porozumět složení tepelných ztrát. Model umožňuje pracovat centrální akumulací, solárními panely, konfigurací oken, různými zdroji energie, zemním výměníkem, zateplováním objektu a rekuperací, což pokrývá širokou škálu objektů.

Model pracuje se vstupními daty (teplota, zamračenost) z databáze Wolfram Mathematica. Model vyžaduje předzpracování oslunění jednotlivých ploch ve zvláštním modelu.

Model solárních panelů s difuzním koncentrátorem

Pro zhodnocení potenciálu využití fixních panelů s difuzním koncentrátorem byl zpracován model v rámci kapitoly 12.1. Model slouží k vyhodnocení nárůstu výstupu fotovoltaické části ve srovnání s nárůstem plochy kolektoru jako celku. Zároveň výstupy modelu umožňují grafické srovnání průběhů oslunění pro konkrétní dny.

Model pracuje se vstupními daty zamračenosti z databáze Wolfram Mathematica.

13.2. Hodnocení dosažených výsledků

Modely díky reálným vstupům vykazují velmi dobrou shodu s reálnými daty srovnávaných objektů. Díky vysoké flexibilitě použitého prostředí Wolfram Mathematica je snadné modely upravit tak, aby respektovaly specifika daných objektů.

Zjednodušený model se osvědčil jako nástroj primárního zpracování ve smyslu dimenzování tepelných čerpadel či náhledu na výhodnost použití alternativních zdrojů energie.

Komplexní model se osvědčil jako nástroj na modelování chování systému v reálném celoročním provozu. Výsledná data o spotřebě energie velmi dobře odpovídají datům z objektů a díky využití zjednodušené varianty objektu bez kapacit je dosaženo rychlého vyhodnocení při minimální ztrátě přesnosti. Model zejména velmi korektně zachycuje vliv teploty vody v otopné soustavě a venkovní teploty na funkci tepelného čerpadla (včetně typů vzduch/voda) a lze díky tomu velmi přesně dimenzovat konkrétní typ, což (viz kapitola 10) může vést ke snížení investičních nákladů a atraktivnější osazení tepelného čerpadla i při souběžném zateplení objektu. Díky tomuto modelu lze jednoduše identifikovat nejvýhodnější směry pro optimalizaci energetického managementu objektu.

V rámci této práce jsem využil model pro fixní solární panel s difuzním koncentrátorem v sérii typových vyhodnocení, abych dokázal využitelnost tohoto konceptu a vyhodnotil základní charakteristiky a přínosy této koncepce solárního panelu. Z výsledků vyplývá, že navržená koncepce poskytuje dostatečný přínos ve formě zvýšení účinnosti fotovoltaické části a dosažení zajímavějších průběhů pro využití termické části, že stojí za to pokračovat ve výzkumu v tomto směru.

13.3. Závěry pro další rozvoj vědy nebo pro realizaci v praxi

Práce přispívá k rozšíření teoretických poznatků v oboru:

- Analyzuje chování objektů, popisuje vliv kapacit na jejich chování a navrhuje možnosti vyhodnocení při jejich zanedbání.
- Popisuje způsob vyhodnocení objektů za užití reálných vstupů pro danou lokaci (poloha slunce, teplota, zamračenost).
- Navrhuje metodický přístup pro vyhodnocení objektů, popisuje způsob ošetření nejčastějších variant.
- Popisuje teoretickou bázi řešené problematiky a způsob jejího začlenění do vyhodnocení.
- Pro kombinované kolektory s difuzním reflektorem poskytuje výchozí bod pro další výzkum.

Přínos práce pro praxi:

- Pro praxi je přínosná část vyhodnocení budov, kde jsou popsány působící mechanismy.
- Modely umožňují vyhodnocení přesně uzpůsobené pro daný objekt s minimální časovou náročností.
- Optimální řešení pro daný objekt vykazuje znatelnou úsporu v provozních nákladech, lze přitom zpracovat řešení optimálně využívající investiční potenciál investora.

Výhledy do budoucna

V části věnující se vyhodnocení budov lze dále rozšiřovat pokrytí na různé konfigurace systému. Rovněž lze výhledově zakomponovat modely různých solárně-termických panelů, teplotně stratifikovaných nádrží, klimatizačních jednotek či zahrnout přímo do modelu širší škálu funkcí vycházejících z externích databází (vlastnosti materiálů, ceny energií), aby nemusely být doplňovány ručně.

Problematika optimalizace energetického managementu je široká a stále vyvstávají nové technologické možnosti a standardy, proto je vývoj nástrojů k jejímu vyhodnocení kontinuální proces.

Po určité optimalizaci kódů pro možnosti nových verzí Mathematiky by dalším logickým krokem bylo tyto modely přepracovat pro využití webového rozhraní, aby mohly sloužit pro co nejširší využití.

Z hlediska fixních kombinovaných fotovoltaicko-termických solárních panelů bylo provedeno ověření koncepce z hlediska dosažení takových parametrů výnosů fotovoltaické části, aby byla reálná ekonomická rozvaha k výrobě těchto panelů. Předmětem další práce v této oblasti je rozšíření modelu na plné fotovoltaicko-termické vyhodnocení a provedení výrobních kalkulací, instalace prototypů a podobně.

14. Literatura

- [1] ČSN 73 0540 Tepelná ochrana budov
- [2] Encyklopedia efunda (<http://www.efunda.com>)
- [3] WolframAlpha - computational knowledge engine (<http://www.wolframalpha.com>)
- [4] Stiebel Eltron katalogy, ceníky a produktové listy (<http://www.stiebel-eltron.cz/>)
- [5] Wolfram, S.: The Mathematica Book. 4th. Ed., Wolfram Media/Cambridge University Press, online verze
- [6] Michal Popovič: Návrh solárního systému pro zásobování rodinného domu TUV, diplomová práce, ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ, 2013
- [7] CIHELKA, Jaromír. Solární tepelná technika. 1. vyd. Praha: T. Malina, 1994, 203 s. ISBN 80-900-7595-9.
- [8] TZB-info - stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov (<http://tzb-info.cz/>)
- [9] Společnost Dražice (<http://dzd.cz/>)
- [10] M. J. M. Pathak, P. G. Sanders, J. M. Pearce: Optimizing Limited Solar Roof Access by Exergy Analysis of Solar Thermal, Photovoltaic, and Hybrid Photovoltaic Thermal Systems
- [11] Y. Tripanagnostopoulos, M. Souliotis, R. Battisti and A. Corrado: APPLICATION ASPECTS OF HYBRID PV/T SOLAR SYSTEMS
- [12] http://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaic_thermal_hybrid_solar_collector
- [13] Doc. Dr. Ing. Jan Kyncl - přednášky předmětů Elektroenergetika 3, Elektrické teplo 1 a 2.
- [14] Prof. Ing. Jiří Habel, DrSc. - přednášky předmětů Světelná technika, Fotometrie a kolorimetrie

15. Seznam publikací autora vztahujících se k disertaci

Podíl autorství je ve všech případech rovným dílem. Na uvedené publikace nebyly registrovány ohlasy či citace.

Publikace v impaktovaných časopisech

Publikace v recenzovaných časopisech

- [L1] Ing. Richard Najman, Nonlinear aspects of heat pump utilization, Acta Polytechnica vol. 50, August 2010, ČVUT Praha, ISSN 1210-2709, p. 60-64

Patenty

publikace excerptované ISI

Ostatní

- [L2] MATYSKA, Pavel; MUSÁLEK, Lubomír; KYNCL, Jan; NAJMAN, Richard; ZAMAZALOVÁ, Marcela; NOVÁK, Zdeněk; HARIRAM, Adithya;. Vývoj matematického modelu pro optimalizaci provozu budov. SBTP 2012 SIMULACE BUDOV A TECHNIKY PROSTŘEDÍ, Brno: IBPSA-CZ, ISBN 978-80-260-3392-9.

[L3] Najman, R. - Nonlinear Aspects of Heat Pump Utilization, *POSTER 2010* [CD-ROM], ČVUT Praha, 2010, ISBN 978-80-01-04544-2

[L4] Najman, R. - Kašpar, J. - Vyhliídko, T.: Vliv zateplení objektu na ekonomiku provozu tepelného čerpadla. In *Sborník konference ELEN 2008* [CD-ROM]. Praha: ČVUT FEL, Katedra elektroenergetiky, 2008, s. 1-16. ISBN 978-80-254-2293-9.

[L5] Najman, R. - Kašpar, J. - Vyhliídko, T.: Economy and mathematic aspects of heat pumps utilization. In *Poster 2009* [CD-ROM]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2009, p. 1-4.

[L6] Kyncl J., Najman R., Šafránek D.: Ekonomičnost elektrického a plynového vytápění porovnávána s možností použití tepelného čerpadla, Prezentace na Eltherm 2007

Prototyp/funkční vzorek

[L7] Musil, L. - Bálský, M. - Bayer, R. - Najman, R.: Koncentrátorový fotovoltaický panel (Photovoltaic panel with concentrator optics), [Program/Prototype]. 2010.

[L8] Musil, L. - Najman, R. - Kyncl, J. Fotovoltaický panel s vodou chlazeným článkem (Photovoltaic panel with water cooling), [Program/Prototype]. 2010.

16. Seznam ostatních publikací autora

Podíl autorství je ve všech případech rovným dílem. Na uvedené publikace nebyly registrovány ohlasy či citace.

Publikace v impaktovaných časopisech

Publikace v recenzovaných časopisech

Patenty

publikace excerptované ISI

Ostatní

[LA1] KYNCL, Jan; HARIRAM, Adithya; MATYSKA, Pavel; NAJMAN, Richard. Simulating the Power System Dynamics and Energy Consumption in a Hydrogen Bus. International Conference on Environment and Electrical Engineering IEEEIC 2013, ISBN 978-83-932625-9-5.

[LA2] Najman, R. - Kyncl, J. - Kašpar, J. - Vyhliídko, T. - Nalezení závislosti magnetického toku na proudu v časové oblasti z naměřené závislosti (Finding magnetic flux dependency on current from measured data)
In: *Sborník konference ELEN 2008* [CD-ROM]. Praha: ČVUT FEL, Katedra elektroenergetiky, 2008, s. 1-6. ISBN 978-80-254-2293-9.

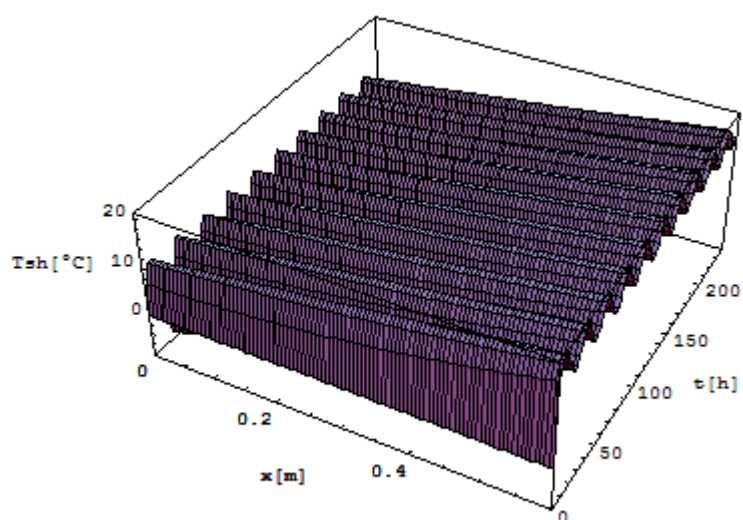
[LA3] Najman, R. - Kyncl, J. - Kašpar, J. - Vyhliídko, T. Návrh rychlého zmrazení knih pomocí kapalného dusíku (Design of quick book freezing by liquid nitrogen)
In: *Sborník konference ELEN 2008* [CD-ROM]. Praha: ČVUT FEL, Katedra elektroenergetiky, 2008, s. 1-8. ISBN 978-80-254-2293-9.

17. Přílohy

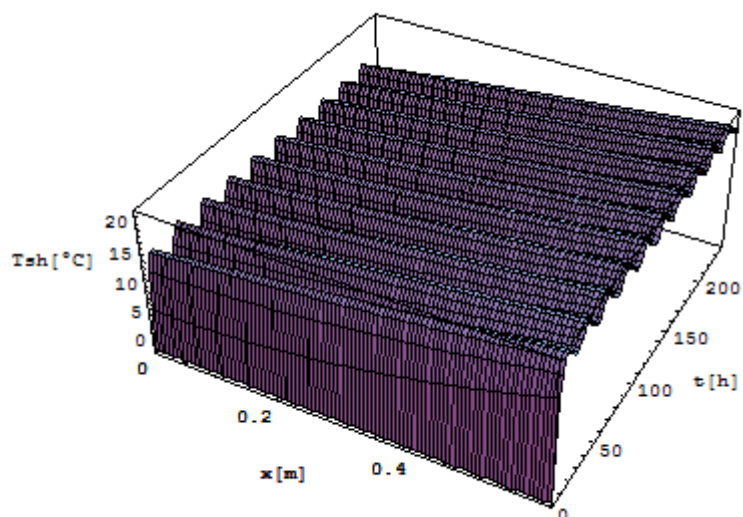
17.1. Příloha A - výstupní údaje modelů nezařazené do těla publikace

Ke kapitole 4.2:

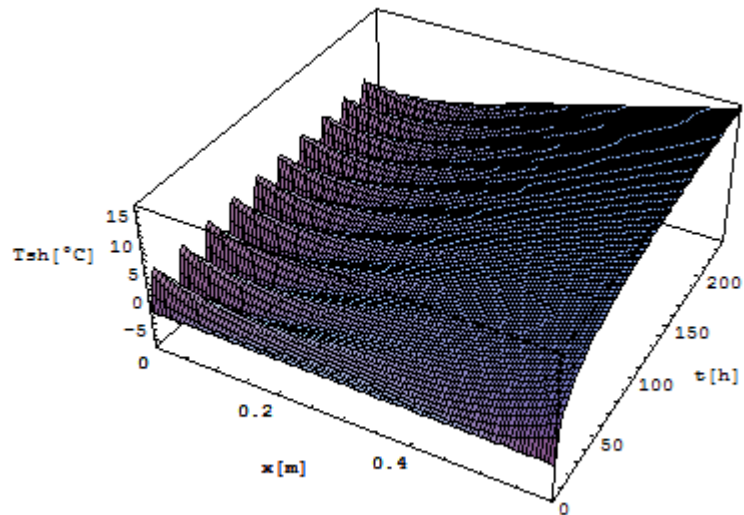
Graf teplot ve stěně dřevostavby:



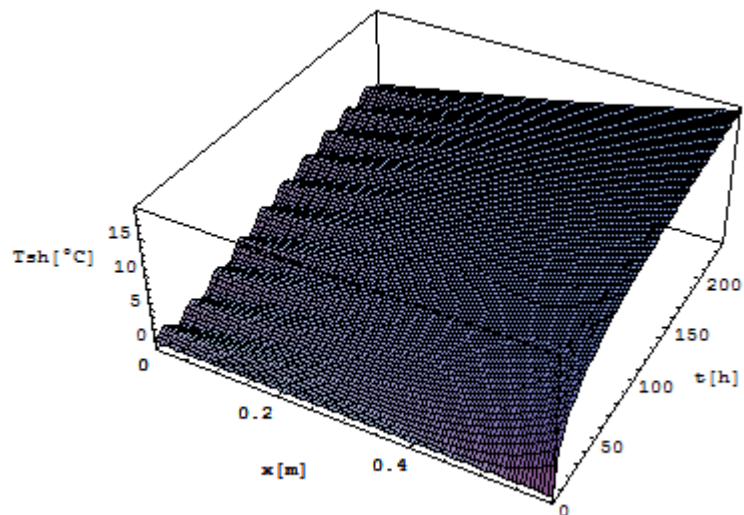
Graf teplot ve stěně dřevostavby s izolací:



Graf teplot ve stěně těžké stavby:



Graf teplot ve stěně těžké stavby s izolací:



Ke kapitole 8.3.3 celková tabulka modelových a naměřených dat:

Den	Model bez kapacit		Model s Kapacitami		Data z objektu	
	Spotřeba [kWh]	Denní sp. [kWh]	Spotřeba [kWh]	Denní sp. [kWh]	Spotřeba [kWh]	Denní sp. [kWh]
1	24,863	24,863			23,6	23,6
2	56,793	31,930			56,8	33,2
3	97,566	40,773	28,532	28,53	86,1	29,3
4	153,736	56,170	83,244	54,71	142,6	56,5
5	209,285	55,549	138,167	54,92	199,9	57,3
6	255,097	45,812	183,254	45,09	243,9	44

7	307,901	52,804	233,956	50,70	292,9	49
8	362,117	54,216	285,539	51,58	345	52,1
9	417,428	55,311	340,720	55,18	401,4	56,4
10	464,497	47,069	388,165	47,44	452,6	51,2
11	509,280	44,783	431,583	43,42	498	45,4
12	551,025	41,745	472,503	40,92	540,5	42,5
13	597,350	46,324	515,872	43,37	582,4	41,9
14	653,696	56,347	568,294	52,42	636,2	53,8
15	716,190	62,494	629,028	60,73	698,7	62,5
16	781,494	65,303	693,982	64,95	770	71,3
17	842,135	60,641	755,255	61,27	829,4	59,4
18	889,047	46,913	807,961	52,71	881,3	51,9
19	936,636	47,589	857,291	49,33	931,1	49,8
20	990,312	53,676	909,602	52,31	983,6	52,5
21	1045,721	55,408	964,799	55,20	1037,1	53,5
22	1097,840	52,119	1011,748	46,95	1086,3	49,2
23	1153,849	56,009	1059,729	47,98	1138,9	52,6
24	1209,529	55,680	1111,700	51,97	1192,7	53,8
25	1259,429	49,900	1161,956	50,26	1243	50,3
26	1327,315	67,886	1227,820	65,86	1312,7	69,7
27	1366,246	38,931	1264,668	36,85	1351	38,3
28	1400,653	34,407	1290,451	25,78	1377,7	26,7
29	1437,778	37,125	1316,939	26,49	1403,4	25,7
30	1476,563	38,785	1344,613	27,67	1431,8	28,4
31	1516,373	39,810	1376,391	31,78	1464,7	32,9
32	1561,742	45,370	1416,680	40,29	1504,6	39,9
33	1623,180	61,438	1475,529	58,85	1562,5	57,9
34	1671,870	48,690	1521,403	45,87	1610,5	48
35	1725,732	53,862	1579,224	57,82	1669,3	58,8
36	1774,965	49,233	1625,761	46,54	1720	50,7
37	1860,207	85,242	1707,600	81,84	1802,5	82,5
38	1937,739	77,532	1787,018	79,42	1887,1	84,6
39	1983,274	45,536	1830,994	43,98	1935,4	48,3
40	2062,307	79,032	1906,371	75,38	2016,6	81,2
41	2130,876	68,569	1978,482	72,11	2090,3	73,7
42	2181,716	50,840	2026,433	47,95	2136,4	46,1
43	2224,130	42,414	2059,114	32,68	2168,2	31,8
44	2298,178	74,048	2123,300	64,19	2230,7	62,5
45	2346,329	48,151	2171,385	48,08	2282,7	52
46	2398,529	52,200	2223,468	52,08	2338,3	55,6
47	2461,612	63,083	2284,996	61,53	2401,1	62,8
48	2522,935	61,322	2345,971	60,98	2461,7	60,6
49	2572,715	49,780	2397,295	51,32	2512	50,3
50	2606,285	33,570	2430,008	32,71	2545,6	33,6
51	2640,771	34,486	2457,856	27,85	2574,1	28,5
52	2677,657	36,886	2490,881	33,03	2609,9	35,8

53	2717,096	39,439	2528,194	37,31	2647,5	37,6
54	2754,674	37,578	2563,913	35,72	2685,5	38
55	2797,501	42,827	2603,271	39,36	2725,6	40,1
56	2834,570	37,069	2640,176	36,90	2762,8	37,2
57	2868,983	34,413	2673,402	33,23	2797,8	35
58	2906,799	37,816	2706,991	33,59	2832	34,2
59	2952,590	45,791	2753,169	46,18	2877,1	45,1
60	3004,978	52,388	2807,407	54,24	2933,4	56,3
61	3047,624	42,646	2847,722	40,32	2973,5	40,1
62	3093,497	45,872	2893,429	45,71	3021,6	48,1
63	3131,432	37,935	2929,563	36,13	3057,7	36,1
64	3157,576	26,144	2951,369	21,81	3078,7	21
65	3179,634	22,058	2968,756	17,39	3097,6	18,9
66	3201,682	22,048	2984,131	15,38	3113,1	15,5
67	3227,947	26,265	2999,914	15,78	3129,7	16,6
68	3250,905	22,958	3018,630	18,72	3149	19,3
69	3302,402	51,497	3065,462	46,83	3200,5	51,5
70	3338,655	36,253	3100,958	35,50	3234,9	34,4
71	3369,593	30,939	3124,667	23,71	3259,2	24,3
72	3404,164	34,571	3157,309	32,64	3293,5	34,3
73	3443,651	39,487	3196,234	38,93	3336,3	42,8
74	3492,762	49,111	3245,067	48,83	3389,7	53,4
75	3542,987	50,225	3294,534	49,47	3440,8	51,1
76	3580,182	37,195	3329,925	35,39	3479,1	38,3
77	3596,909	16,726	3339,612	9,69	3489,1	10
78	3610,977	14,069	3350,236	10,62	3500,7	11,6
79	3622,584	11,607	3358,506	8,27	3509,7	9
80	3638,619	16,034	3365,872	7,37	3517	7,3
81	3654,301	15,682	3374,183	8,31	3525,5	8,5
82	3668,719	14,419	3384,377	10,19	3536	10,5
83	3682,556	13,837	3391,274	6,90	3543,5	7,5
84	3695,603	13,047	3396,578	5,30	3549,3	5,8
85	3709,970	14,367	3403,688	7,11	3556,6	7,3
86	3724,161	14,191	3410,555	6,87	3563,6	7
87	3739,596	15,435	3419,098	8,54	3571,8	8,2
88	3756,497	16,901	3431,662	12,56	3584	12,2
89	3768,628	12,131	3437,594	5,93	3590,3	6,3
90	3784,420	15,793	3446,168	8,57	3598,5	8,2
91	3821,400	36,980	3480,038	33,87	3631,5	33
92	3865,509	44,109	3519,976	39,94	3674,9	43,4
93	3896,321	30,813	3549,126	29,15	3706,1	31,2
94	3925,350	29,029	3578,606	29,48	3735,7	29,6
95	3953,782	28,432	3607,526	28,92	3766,6	30,9
96	3966,008	12,226	3612,100	4,57	3771,7	5,1
97	3996,211	30,203	3633,031	20,93	3792	20,3
98	4046,380	50,169	3682,097	49,07	3842,9	50,9

99	4081,215	34,835	3716,327	34,23	3877,8	34,9
100	4109,892	28,677	3742,248	25,92	3903,7	25,9
101	4137,424	27,532	3766,595	24,35	3929,4	25,7
102	4154,304	16,880	3779,024	12,43	3942,4	13
103	4168,632	14,328	3788,988	9,96	3952	9,6
104	4187,633	19,001	3802,125	13,14	3965,5	13,5
105	4222,216	34,583	3831,455	29,33	3993,7	28,2
106	4248,697	26,481	3850,262	18,81	4013,4	19,7
107	4291,247	42,550	3891,469	41,21	4054,7	41,3
108	4337,786	46,540	3935,852	44,38	4099,1	44,4
109	4375,935	38,148	3973,624	37,77	4136,3	37,2
110	4399,353	23,418	3997,093	23,47	4159,9	23,6
111	4410,673	11,320	4002,212	5,12	4165	5,1
112	4426,871	16,199	4015,183	12,97	4177,5	12,5
113	4436,673	9,802	4020,622	5,44	4183,1	5,6
114	4455,687	19,014	4032,170	11,55	4194,3	11,2
115	4470,015	14,328	4044,373	12,20	4206,8	12,5
116	4481,546	11,530	4052,098	7,73	4215,3	8,5
117	4497,313	15,767	4066,592	14,49	4230,7	15,4
118	4510,946	13,633	4073,713	7,12	4237,8	7,1
119	4516,121	5,175	4073,726	0,01	4238,77	0,97
120	4518,726	2,605	4073,739	0,01	4239,8	1,03
121	4518,736	0,010	4073,749	0,01	4241,56	1,76
122	4518,747	0,011	4073,759	0,01	4243,21	1,65
123	4518,882	0,135	4073,770	0,01	4244,53	1,32
124	4520,802	1,920	4073,782	0,01	4245,57	1,04
125	4523,545	2,743	4073,794	0,01	4246,73	1,16
126	4530,139	6,594	4073,813	0,02	4247,94	1,21
127	4554,686	24,547	4091,509	17,70	4266,54	18,6
128	4555,852	1,166	4091,521	0,01	4267,87	1,33
129	4571,476	15,624	4098,209	6,69	4274,47	6,6
130	4604,347	32,870	4130,496	32,29	4308,77	34,3
131	4624,826	20,479	4148,846	18,35	4327,87	19,1
132	4624,838	0,012	4148,858	0,01	4328,97	1,1
133	4624,849	0,011	4148,869	0,01	4330,52	1,55
134	4624,862	0,013	4148,882	0,01	4331,44	0,92
135	4647,689	22,828	4160,755	11,87	4343,44	12
136	4667,584	19,895	4179,624	18,87	4364,24	20,8
137	4690,001	22,417	4196,802	17,18	4382,44	18,2
138	4713,311	23,311	4217,978	21,18	4405,04	22,6
139	4727,352	14,041	4228,847	10,87	4416,14	11,1
140	4746,593	19,241	4247,314	18,47	4434,24	18,1
141	4750,258	3,664	4250,291	2,98	4437,14	2,9
142	4750,269	0,011	4250,303	0,01	4438,93	1,79
143	4750,279	0,011	4250,314	0,01	4439,9	0,97
144	4750,290	0,011	4250,325	0,01	4441,43	1,53

145	4750,301	0,011	4250,336	0,01	4442,38	0,95
146	4750,312	0,011	4250,348	0,01	4443,78	1,4
147	4750,324	0,012	4250,361	0,01	4445,44	1,66
148	4750,336	0,012	4250,373	0,01	4446,68	1,24
149	4750,348	0,012	4250,385	0,01	4447,76	1,08
150	4750,360	0,012	4250,398	0,01	4449,32	1,56
151	4753,150	2,789	4250,410	0,01	4450,56	1,24
152	4753,162	0,012	4250,422	0,01	4451,95	1,39
153	4753,174	0,012	4250,434	0,01	4452,92	0,97
154	4753,187	0,013	4250,447	0,01	4454,3	1,38
155	4767,961	14,774	4260,155	9,71	4464,6	10,3
156	4775,504	7,543	4266,633	6,48	4470,8	6,2
157	4775,949	0,445	4267,256	0,62	4472,42	1,62
158	4797,030	21,081	4283,872	16,62	4490,52	18,1
159	4828,287	31,257	4309,554	25,68	4517,02	26,5
160	4844,654	16,367	4327,383	17,83	4536,32	19,3
161	4844,665	0,011	4327,394	0,01	4538,1	1,78
162	4844,675	0,010	4327,404	0,01	4539,61	1,51
163	4853,946	9,271	4331,401	4,00	4543,71	4,1
164	4860,879	6,933	4335,623	4,22	4548,31	4,6
165	4873,600	12,721	4349,904	14,28	4563,01	14,7
166	4894,473	20,873	4371,493	21,59	4584,61	21,6
167	4908,495	14,022	4382,083	10,59	4595,41	10,8
168	4908,505	0,010	4382,094	0,01	4596,69	1,28
169	4908,513	0,008	4382,104	0,01	4598,42	1,73
170	4908,521	0,008	4382,114	0,01	4599,25	0,83
171	4908,530	0,009	4382,123	0,01	4600,92	1,67
172	4908,538	0,008	4382,133	0,01	4601,79	0,87
173	4908,550	0,012	4382,144	0,01	4602,61	0,82
174	4910,949	2,399	4382,159	0,01	4604,24	1,63
175	4923,634	12,685	4388,569	6,41	4610,64	6,4
176	4928,748	5,115	4388,580	0,01	4611,55	0,91
177	4928,761	0,013	4388,593	0,01	4612,46	0,91
178	4936,143	7,382	4388,822	0,23	4613,97	1,51
179	4939,605	3,462	4388,833	0,01	4615,77	1,8
180	4939,617	0,012	4388,845	0,01	4616,62	0,85
181	4942,743	3,126	4388,857	0,01	4617,71	1,09
182	4942,754	0,011	4388,867	0,01	4618,77	1,06
183	4942,762	0,008	4388,874	0,01	4620,44	1,67
184	4942,773	0,011	4388,886	0,01	4622	1,56
185	4942,782	0,009	4388,894	0,01	4623,17	1,17
186	4942,793	0,011	4388,905	0,01	4624,03	0,86
187	4942,804	0,011	4388,916	0,01	4625,08	1,05
188	4942,815	0,011	4388,925	0,01	4626,23	1,15
189	4942,827	0,012	4388,937	0,01	4627,29	1,06
190	4942,839	0,012	4388,949	0,01	4628,5	1,21

191	4942,851	0,012	4388,961	0,01	4629,97	1,47
192	4942,864	0,013	4388,974	0,01	4631,28	1,31
193	4942,875	0,011	4388,985	0,01	4632,19	0,91
194	4942,886	0,011	4388,996	0,01	4633,23	1,04
195	4942,898	0,012	4389,008	0,01	4634,19	0,96
196	4948,242	5,345	4391,164	2,16	4636,39	2,2
197	4955,883	7,641	4395,960	4,80	4641,09	4,7
198	4970,398	14,515	4406,396	10,44	4651,49	10,4
199	4988,145	17,747	4421,916	15,52	4666,79	15,3
200	5000,165	12,020	4435,570	13,65	4681,49	14,7
201	5000,177	0,012	4435,582	0,01	4683,01	1,52
202	5000,189	0,012	4435,594	0,01	4684,72	1,71
203	5000,201	0,012	4435,606	0,01	4685,93	1,21
204	5013,580	13,379	4443,983	8,38	4694,63	8,7
205	5013,592	0,012	4443,994	0,01	4695,52	0,89
206	5013,603	0,011	4444,005	0,01	4696,56	1,04
207	5013,613	0,010	4444,016	0,01	4697,49	0,93
208	5013,625	0,012	4444,028	0,01	4699,24	1,75
209	5017,876	4,251	4444,042	0,01	4700,69	1,45
210	5017,887	0,011	4444,053	0,01	4701,5	0,81
211	5017,895	0,009	4444,063	0,01	4702,71	1,21
212	5017,909	0,014	4444,076	0,01	4704,18	1,47
213	5023,357	5,448	4444,088	0,01	4705,71	1,53
214	5023,368	0,011	4444,100	0,01	4706,56	0,85
215	5023,377	0,009	4444,112	0,01	4707,83	1,27
216	5023,386	0,009	4444,123	0,01	4708,81	0,98
217	5023,396	0,010	4444,135	0,01	4709,64	0,83
218	5026,771	3,376	4444,147	0,01	4711,24	1,6
219	5027,720	0,948	4444,159	0,01	4712,08	0,84
220	5027,732	0,012	4444,171	0,01	4713,6	1,52
221	5028,801	1,070	4444,184	0,01	4714,87	1,27
222	5031,432	2,631	4444,198	0,01	4716,57	1,7
223	5033,643	2,212	4444,211	0,01	4717,73	1,16
224	5039,087	5,444	4444,224	0,01	4718,88	1,15
225	5047,465	8,377	4445,653	1,43	4720,28	1,4
226	5079,955	32,490	4476,155	30,50	4751,58	31,3
227	5103,473	23,518	4499,263	23,11	4774,78	23,2
228	5109,208	5,735	4500,504	1,24	4776,18	1,4
229	5115,560	6,352	4505,163	4,66	4780,78	4,6
230	5116,999	1,439	4505,175	0,01	4781,76	0,98
231	5117,011	0,012	4505,187	0,01	4782,69	0,93
232	5133,028	16,017	4517,602	12,41	4795,39	12,7
233	5133,040	0,012	4517,614	0,01	4796,28	0,89
234	5133,052	0,012	4517,625	0,01	4797,2	0,92
235	5133,064	0,012	4517,636	0,01	4798,96	1,76
236	5133,076	0,012	4517,648	0,01	4800,05	1,09

237	5133,088	0,012	4517,659	0,01	4801,1	1,05
238	5133,100	0,012	4517,671	0,01	4802,01	0,91
239	5133,112	0,012	4517,683	0,01	4802,88	0,87
240	5135,799	2,687	4517,696	0,01	4803,83	0,95
241	5145,833	10,034	4521,592	3,90	4807,93	4,1
242	5157,517	11,684	4529,350	7,76	4815,63	7,7
243	5158,058	0,541	4529,737	0,39	4816,97	1,34
244	5168,458	10,400	4529,871	0,13	4818,24	1,27
245	5168,692	0,234	4529,883	0,01	4819,47	1,23
246	5174,009	5,316	4529,896	0,01	4820,47	1
247	5204,806	30,798	4558,004	28,11	4850,27	29,8
248	5232,394	27,587	4585,677	27,67	4878,97	28,7
249	5258,246	25,852	4611,564	25,89	4905,87	26,9
250	5267,977	9,731	4617,224	5,66	4911,97	6,1
251	5268,693	0,715	4617,720	0,50	4912,57	0,6
252	5297,256	28,563	4637,775	20,06	4932,87	20,3
253	5300,089	2,833	4638,647	0,87	4933,77	0,9
254	5316,584	16,495	4653,982	15,33	4949,87	16,1
255	5318,740	2,156	4655,700	1,72	4951,77	1,9
256	5319,990	1,251	4655,714	0,01	4952,89	1,12
257	5320,002	0,012	4655,726	0,01	4954,66	1,77
258	5326,403	6,400	4655,738	0,01	4955,7	1,04
259	5367,420	41,018	4689,942	34,20	4993,3	37,6
260	5397,827	30,406	4722,165	32,22	5028,7	35,4
261	5403,181	5,354	4725,165	3,00	5032	3,3
262	5425,438	22,257	4748,347	23,18	5056,1	24,1
263	5428,869	3,431	4751,263	2,92	5059,2	3,1
264	5432,046	3,177	4751,276	0,01	5060,69	1,49
265	5439,179	7,133	4751,289	0,01	5061,74	1,05
266	5466,937	27,758	4771,661	20,37	5081,94	20,2
267	5475,880	8,943	4774,926	3,27	5085,24	3,3
268	5483,883	8,003	4778,839	3,91	5089,34	4,1
269	5494,672	10,789	4783,522	4,68	5094,54	5,2
270	5512,483	17,811	4801,317	17,80	5113,64	19,1
271	5524,112	11,629	4808,388	7,07	5120,84	7,2
272	5528,765	4,653	4811,977	3,59	5124,34	3,5
273	5532,954	4,189	4813,559	1,58	5125,94	1,6
274	5561,722	28,767	4831,278	17,72	5143,84	17,9
275	5570,304	8,582	4835,582	4,30	5148,14	4,3
276	5597,898	27,594	4864,075	28,49	5177,14	29
277	5611,157	13,259	4872,034	7,96	5185,14	8
278	5622,185	11,028	4880,452	8,42	5193,34	8,2
279	5649,938	27,754	4905,174	24,72	5217,64	24,3
280	5657,748	7,809	4909,354	4,18	5221,94	4,3
281	5675,314	17,567	4917,255	7,90	5230,04	8,1
282	5688,050	12,735	4925,415	8,16	5238,14	8,1

283	5705,739	17,689	4935,368	9,95	5248,34	10,2
284	5725,529	19,790	4948,629	13,26	5261,24	12,9
285	5746,540	21,012	4966,765	18,14	5279,84	18,6
286	5766,084	19,544	4982,990	16,23	5296,54	16,7
287	5796,573	30,489	5005,964	22,97	5319,64	23,1
288	5835,847	39,274	5047,479	41,51	5360,94	41,3
289	5849,425	13,578	5059,155	11,68	5373,64	12,7
290	5870,263	20,839	5078,860	19,71	5392,84	19,2
291	5903,727	33,464	5109,224	30,36	5424,04	31,2
292	5949,686	45,959	5153,298	44,07	5472,14	48,1
293	5963,991	14,305	5164,553	11,26	5483,44	11,3
294	5977,633	13,642	5173,694	9,14	5493,44	10
295	5995,531	17,898	5181,378	7,68	5501,84	8,4
296	6011,717	16,186	5189,618	8,24	5510,64	8,8
297	6029,259	17,543	5198,024	8,41	5519,24	8,6
298	6048,226	18,966	5208,125	10,10	5529,24	10
299	6091,845	43,619	5247,747	39,62	5569,54	40,3
300	6132,806	40,962	5287,837	40,09	5613,44	43,9
301	6176,710	43,904	5331,071	43,23	5654,84	41,4
302	6206,861	30,151	5357,990	26,92	5683,74	28,9
303	6265,246	58,385	5413,609	55,62	5744,44	60,7
304	6320,979	55,734	5469,131	55,52	5799,24	54,8
305	6382,068	61,088	5529,543	60,41	5862,44	63,2
306	6436,628	54,560	5585,855	56,31	5919,04	56,6
307	6459,728	23,100	5601,310	15,45	5936,04	17
308	6503,811	44,083	5645,168	43,86	5979,24	43,2
309	6530,064	26,253	5668,359	23,19	6002,74	23,5
310	6550,702	20,638	5681,916	13,56	6017,34	14,6
311	6568,032	17,330	5695,939	14,02	6032,74	15,4
312	6599,288	31,256	5719,770	23,83	6057,74	25
313	6630,881	31,593	5747,192	27,42	6085,44	27,7
314	6672,705	41,824	5789,496	42,30	6130,94	45,5
315	6700,019	27,314	5814,781	25,29	6156,74	25,8
316	6735,016	34,997	5844,598	29,82	6188,04	31,3
317	6757,814	22,797	5867,211	22,61	6210,84	22,8
318	6776,458	18,645	5880,571	13,36	6224,04	13,2
319	6816,140	39,681	5915,922	35,35	6257,84	33,8
320	6857,282	41,142	5954,684	38,76	6297,44	39,6
321	6884,508	27,227	5971,515	16,83	6314,84	17,4
322	6912,782	28,274	5987,894	16,38	6332,24	17,4
323	6952,490	39,707	6026,559	38,66	6369,94	37,7
324	6978,616	26,127	6046,082	19,52	6389,54	19,6
325	7024,048	45,432	6088,712	42,63	6436,24	46,7
326	7059,967	35,919	6122,267	33,56	6470,94	34,7
327	7083,147	23,181	6138,774	16,51	6486,74	15,8
328	7121,104	37,957	6171,475	32,70	6521,74	35

329	7161,533	40,429	6209,946	38,47	6559,04	37,3
330	7211,192	49,659	6257,557	47,61	6607,14	48,1
331	7258,125	46,933	6301,899	44,34	6653,14	46
332	7300,977	42,852	6343,036	41,14	6693,24	40,1
333	7331,260	30,282	6368,646	25,61	6719,74	26,5
334	7364,732	33,473	6402,100	33,45	6755,14	35,4
335	7394,856	30,123	6428,011	25,91	6781,44	26,3
336	7430,052	35,196	6458,204	30,19	6814,04	32,6
337	7477,201	47,149	6501,419	43,21	6857,84	43,8
338	7536,098	58,897	6557,682	56,26	6917,74	59,9
339	7597,388	61,289	6617,685	60,00	6977,14	59,4
340	7656,821	59,433	6675,586	57,90	7037,34	60,2
341	7706,124	49,303	6722,493	46,91	7084,34	47
342	7744,449	38,325	6757,896	35,40	7120,44	36,1
343	7801,493	57,044	6810,225	52,33	7174,44	54
344	7868,229	66,736	6873,488	63,26	7239,24	64,8
345	7908,411	40,182	6906,502	33,01	7275,34	36,1
346	7948,875	40,464	6939,670	33,17	7311,44	36,1
347	8015,641	66,766	7006,105	66,44	7377,14	65,7
348	8080,017	64,376	7068,736	62,63	7443,14	66
349	8150,867	70,850	7137,879	69,14	7515,54	72,4
350	8202,011	51,144	7182,327	44,45	7561,54	46
351	8240,446	38,436	7215,687	33,36	7594,14	32,6
352	8290,963	50,516	7267,960	52,27	7645,64	51,5
353	8344,238	53,276	7319,481	51,52	7700,94	55,3
354	8388,979	44,740	7361,608	42,13	7742,54	41,6
355	8443,939	54,961	7414,885	53,28	7800,34	57,8
356	8499,732	55,792	7468,709	53,82	7857,74	57,4
357	8561,150	61,418	7527,289	58,58	7920,64	62,9
358	8631,456	70,306	7594,218	66,93	7990,34	69,7
359	8702,689	71,233	7664,576	70,36	8058,24	67,9
360	8769,577	66,888	7732,031	67,45	8130,44	72,2
361	8827,912	58,335	7791,095	59,06	8189,84	59,4
362	8867,815	39,903	7830,978	39,88	8231,44	41,6
363	8914,907	47,093	7874,991	44,01	8278,94	47,5
364	8960,202	45,294	7919,873	44,88	8323,84	44,9
365	9010,953	50,751	7969,071	49,20	8376,84	53

Ke kapitole 9.3.3: Kompletní tabulka modelových výsledků

Den	Model bez kapacit		Model s kapacitami	
	Spotřeba [kWh]	Denní spotř. [kWh]	Spotřeba [kWh]	Denní spotř. [kWh]
1	31,3	31,3		
2	73,1	41,8		
3	117,9	44,8	41,7	41,7
4	179,8	61,9	104,4	62,7

5	241,2	61,4	166,0	61,7
6	295,9	54,7	221,1	55,0
7	355,5	59,6	280,2	59,1
8	416,7	61,2	339,9	59,7
9	477,7	61,1	401,3	61,4
10	532,8	55,0	457,5	56,2
11	585,1	52,3	510,8	53,3
12	633,6	48,5	562,9	52,1
13	690,5	56,9	618,6	55,7
14	754,6	64,1	679,1	60,5
15	823,4	68,8	747,2	68,1
16	895,3	71,9	818,0	70,8
17	962,7	67,3	886,2	68,2
18	1019,3	56,6	948,6	62,4
19	1076,8	57,5	1004,6	56,0
20	1137,7	60,9	1066,2	61,6
21	1200,0	62,3	1127,0	60,9
22	1259,1	59,1	1183,4	56,3
23	1321,9	62,8	1240,9	57,6
24	1385,4	63,5	1302,5	61,6
25	1445,0	59,6	1360,6	58,1
26	1520,2	75,2	1433,2	72,6
27	1560,9	40,7	1475,2	42,0
28	1608,6	47,8	1521,3	46,1
29	1655,8	47,1	1561,8	40,5
30	1705,1	49,3	1607,9	46,1
31	1755,7	50,6	1655,4	47,5
32	1825,6	69,8	1723,1	67,7
33	1904,2	78,6	1799,2	76,1
34	1959,7	55,5	1853,9	54,8
35	2033,8	74,2	1936,5	82,6
36	2100,3	66,5	2007,1	70,6
37	2194,8	94,5	2100,9	93,7
38	2281,5	86,7	2189,4	88,5
39	2343,4	61,9	2250,9	61,6
40	2430,8	87,5	2338,3	87,4
41	2512,2	81,4	2422,4	84,1
42	2565,8	53,5	2475,6	53,2
43	2618,2	52,5	2524,8	49,1
44	2700,5	82,2	2606,8	82,0
45	2763,5	63,1	2671,6	64,8
46	2822,8	59,3	2736,3	64,8
47	2892,8	70,0	2807,6	71,2
48	2961,9	69,1	2877,5	70,0
49	3019,9	58,0	2937,8	60,2

50	3060,0	40,1	2979,6	41,8
51	3111,9	51,8	3029,1	49,4
52	3149,2	37,4	3065,5	36,4
53	3199,9	50,7	3119,2	53,8
54	3240,9	41,0	3163,0	43,8
55	3294,5	53,6	3218,0	55,0
56	3333,2	38,7	3258,3	40,3
57	3377,6	44,4	3305,9	47,6
58	3418,5	40,9	3347,1	41,2
59	3479,9	61,5	3403,8	56,7
60	3537,5	57,6	3463,0	59,2
61	3582,7	45,2	3512,4	49,4
62	3632,8	50,0	3564,4	52,1
63	3671,4	38,7	3603,1	38,6
64	3698,9	27,4	3631,5	28,4
65	3728,8	30,0	3663,2	31,7
66	3752,1	23,3	3684,5	21,3
67	3777,0	24,9	3706,6	22,1
68	3805,8	28,8	3735,7	29,2
69	3868,8	63,1	3798,0	62,3
70	3904,2	35,4	3833,4	35,5
71	3938,8	34,6	3870,8	37,3
72	3972,4	33,6	3905,9	35,1
73	4025,2	52,9	3961,3	55,4
74	4078,5	53,3	4015,3	53,9
75	4133,1	54,6	4069,9	54,6
76	4170,3	37,3	4106,7	36,8
77	4192,2	21,8	4126,5	19,8
78	4214,2	22,0	4146,7	20,2
79	4227,5	13,4	4163,7	17,0
80	4245,5	18,0	4182,8	19,1
81	4263,3	17,8	4194,9	12,1
82	4286,0	22,6	4214,6	19,8
83	4304,2	18,2	4230,1	15,4
84	4316,7	12,5	4239,6	9,6
85	4336,3	19,6	4253,2	13,5
86	4353,0	16,7	4269,1	15,9
87	4370,2	17,3	4279,8	10,7
88	4388,7	18,5	4294,4	14,6
89	4401,9	13,2	4306,3	11,9
90	4422,0	20,1	4323,6	17,4
91	4465,4	43,3	4362,9	39,3
92	4512,9	47,5	4407,2	44,3
93	4546,9	34,0	4440,9	33,6
94	4580,5	33,6	4476,3	35,4

95	4609,9	29,4	4508,3	32,1
96	4620,6	10,8	4517,1	8,8
97	4658,5	37,9	4550,5	33,3
98	4712,5	54,0	4602,2	51,7
99	4746,3	33,8	4636,1	33,9
100	4782,0	35,6	4674,2	38,2
101	4810,4	28,5	4698,7	24,4
102	4829,2	18,8	4722,9	24,2
103	4844,6	15,4	4738,5	15,6
104	4866,3	21,7	4761,7	23,2
105	4899,9	33,7	4792,9	31,2
106	4933,2	33,3	4821,0	28,1
107	4978,2	45,0	4865,6	44,5
108	5027,7	49,5	4913,4	47,8
109	5066,5	38,8	4953,9	40,5
110	5091,5	25,0	4981,7	27,9
111	5103,9	12,4	4989,7	8,0
112	5115,5	11,7	5005,5	15,8
113	5126,7	11,2	5018,4	13,0
114	5141,3	14,6	5030,2	11,7
115	5155,9	14,6	5044,6	14,5
116	5165,5	9,6	5054,4	9,8
117	5183,5	18,0	5075,0	20,6
118	5195,2	11,7	5084,0	9,0
119	5200,8	5,6	5087,8	3,8
120	5201,3	0,5	5087,8	0,0
121	5201,3	0,0	5087,8	0,0
122	5201,3	0,0	5087,8	0,0
123	5201,5	0,2	5087,9	0,0
124	5202,2	0,7	5087,9	0,0
125	5202,6	0,4	5087,9	0,0
126	5208,6	6,0	5089,0	1,1
127	5229,2	20,6	5107,2	18,3
128	5229,2	0,0	5107,2	0,0
129	5243,5	14,2	5116,8	9,6
130	5279,3	35,8	5149,8	32,9
131	5295,7	16,4	5165,1	15,3
132	5295,7	0,0	5165,1	0,0
133	5295,7	0,0	5165,1	0,0
134	5295,7	0,0	5165,1	0,0
135	5316,3	20,6	5182,0	16,8
136	5341,8	25,5	5203,3	21,3
137	5357,9	16,2	5221,8	18,5
138	5380,6	22,7	5243,8	22,1
139	5399,7	19,1	5260,8	17,0

140	5420,5	20,8	5284,9	24,1
141	5420,7	0,2	5287,5	2,6
142	5420,7	0,0	5287,5	0,0
143	5420,7	0,0	5287,6	0,0
144	5420,7	0,0	5287,6	0,0
145	5420,7	0,0	5287,6	0,0
146	5420,7	0,0	5287,6	0,0
147	5420,7	0,0	5287,6	0,0
148	5420,7	0,0	5287,6	0,0
149	5420,8	0,0	5287,6	0,0
150	5420,8	0,0	5287,6	0,0
151	5420,8	0,0	5287,6	0,0
152	5420,8	0,0	5287,7	0,0
153	5420,8	0,0	5287,7	0,0
154	5420,8	0,0	5287,7	0,0
155	5432,9	12,1	5299,7	12,1
156	5438,2	5,3	5305,6	5,9
157	5438,2	0,0	5305,7	0,0
158	5458,4	20,3	5324,2	18,6
159	5490,1	31,7	5352,1	27,8
160	5502,8	12,6	5365,6	13,5
161	5502,8	0,0	5365,6	0,0
162	5502,8	0,0	5365,6	0,0
163	5513,5	10,7	5371,4	5,8
164	5516,8	3,2	5376,5	5,1
165	5529,3	12,5	5391,9	15,4
166	5551,6	22,3	5414,3	22,4
167	5562,6	11,0	5425,8	11,5
168	5562,6	0,0	5425,8	0,0
169	5562,6	0,0	5425,9	0,0
170	5562,6	0,0	5425,9	0,0
171	5562,6	0,0	5425,9	0,0
172	5562,6	0,0	5425,9	0,0
173	5562,7	0,0	5425,9	0,0
174	5564,3	1,6	5425,9	0,0
175	5574,2	9,9	5428,5	2,6
176	5574,2	0,0	5428,5	0,0
177	5574,2	0,0	5428,5	0,0
178	5574,2	0,0	5428,5	0,0
179	5574,3	0,1	5428,6	0,0
180	5574,3	0,0	5428,6	0,0
181	5574,3	0,0	5428,6	0,0
182	5574,3	0,0	5428,6	0,0
183	5574,3	0,0	5428,6	0,0
184	5574,3	0,0	5428,6	0,0

185	5574,3	0,0	5428,6	0,0
186	5574,3	0,0	5428,6	0,0
187	5574,3	0,0	5428,6	0,0
188	5574,4	0,0	5428,6	0,0
189	5574,4	0,0	5428,7	0,0
190	5574,4	0,0	5428,7	0,0
191	5574,4	0,0	5428,7	0,0
192	5574,4	0,0	5428,7	0,0
193	5574,4	0,0	5428,7	0,0
194	5574,4	0,0	5428,7	0,0
195	5574,4	0,0	5428,7	0,0
196	5578,7	4,3	5429,6	0,9
197	5583,2	4,4	5432,7	3,1
198	5595,3	12,1	5441,9	9,2
199	5613,1	17,8	5458,2	16,3
200	5627,8	14,7	5475,1	16,9
201	5627,8	0,0	5475,1	0,0
202	5627,8	0,0	5475,1	0,0
203	5627,8	0,0	5475,1	0,0
204	5638,8	11,0	5485,2	10,1
205	5638,9	0,0	5485,2	0,0
206	5638,9	0,0	5485,2	0,0
207	5638,9	0,0	5485,3	0,0
208	5638,9	0,0	5485,3	0,0
209	5638,9	0,0	5485,3	0,0
210	5638,9	0,0	5485,3	0,0
211	5638,9	0,0	5485,3	0,0
212	5638,9	0,0	5485,3	0,0
213	5641,4	2,5	5485,3	0,0
214	5641,4	0,0	5485,3	0,0
215	5641,4	0,0	5485,3	0,0
216	5641,4	0,0	5485,4	0,0
217	5641,4	0,0	5485,4	0,0
218	5644,5	3,1	5485,4	0,0
219	5644,5	0,0	5485,4	0,0
220	5644,5	0,0	5485,4	0,0
221	5644,5	0,0	5485,4	0,0
222	5644,5	0,0	5485,4	0,0
223	5644,6	0,0	5485,4	0,0
224	5646,4	1,8	5485,4	0,0
225	5655,4	9,0	5488,8	3,3
226	5688,1	32,8	5519,9	31,1
227	5711,1	22,9	5543,4	23,5
228	5715,5	4,4	5548,0	4,6
229	5727,1	11,7	5558,6	10,6

230	5727,1	0,0	5558,6	0,0
231	5727,1	0,0	5558,6	0,0
232	5743,9	16,8	5574,8	16,2
233	5744,0	0,1	5574,8	0,0
234	5744,0	0,0	5574,8	0,0
235	5744,0	0,0	5574,9	0,0
236	5744,1	0,0	5574,9	0,0
237	5744,1	0,0	5574,9	0,0
238	5744,1	0,0	5574,9	0,0
239	5744,1	0,0	5574,9	0,0
240	5744,1	0,0	5574,9	0,0
241	5752,7	8,6	5578,3	3,3
242	5764,4	11,6	5588,0	9,7
243	5764,4	0,0	5588,0	0,0
244	5772,8	8,4	5592,3	4,3
245	5772,8	0,0	5592,3	0,0
246	5779,5	6,7	5596,8	4,4
247	5811,8	32,3	5627,1	30,3
248	5840,4	28,7	5655,5	28,4
249	5867,0	26,5	5683,0	27,6
250	5877,9	11,0	5692,0	9,0
251	5879,8	1,9	5692,0	0,0
252	5910,1	30,3	5718,3	26,3
253	5915,1	5,0	5723,0	4,7
254	5931,8	16,6	5742,0	19,0
255	5934,1	2,4	5742,8	0,8
256	5934,1	0,0	5742,8	0,0
257	5934,1	0,0	5742,8	0,0
258	5944,5	10,4	5747,9	5,1
259	5988,8	44,2	5786,3	38,5
260	6021,9	33,1	5818,2	31,9
261	6027,6	5,7	5823,7	5,4
262	6054,4	26,8	5852,5	28,8
263	6056,6	2,2	5854,4	1,9
264	6060,0	3,4	5859,0	4,6
265	6072,4	12,4	5868,2	9,2
266	6106,8	34,5	5898,2	30,0
267	6114,5	7,7	5903,9	5,8
268	6128,4	13,9	5918,0	14,1
269	6141,7	13,3	5929,9	11,9
270	6164,9	23,2	5953,2	23,3
271	6178,7	13,8	5968,2	15,0
272	6184,9	6,2	5975,5	7,3
273	6191,9	7,0	5981,1	5,6
274	6224,6	32,7	6009,2	28,1

275	6233,4	8,8	6017,2	8,0
276	6265,2	31,8	6048,6	31,3
277	6281,6	16,5	6063,0	14,4
278	6299,0	17,3	6079,5	16,5
279	6328,7	29,8	6109,5	30,0
280	6335,5	6,8	6115,8	6,3
281	6358,0	22,4	6134,4	18,6
282	6373,4	15,4	6149,5	15,0
283	6395,3	21,9	6169,6	20,1
284	6422,8	27,5	6192,4	22,8
285	6446,6	23,8	6215,8	23,5
286	6474,6	28,0	6240,5	24,7
287	6506,6	31,9	6271,1	30,6
288	6549,3	42,8	6316,0	44,9
289	6568,5	19,1	6335,8	19,9
290	6596,5	28,0	6365,4	29,6
291	6633,9	37,4	6402,7	37,3
292	6684,8	50,9	6451,1	48,4
293	6706,1	21,3	6470,5	19,4
294	6727,7	21,6	6489,5	19,0
295	6751,1	23,5	6509,6	20,0
296	6770,1	19,0	6527,8	18,2
297	6791,0	20,9	6541,9	14,1
298	6816,6	25,6	6563,6	21,7
299	6864,3	47,7	6610,1	46,5
300	6909,6	45,3	6654,9	44,7
301	6957,6	48,0	6702,3	47,4
302	6997,4	39,8	6739,0	36,8
303	7061,9	64,5	6799,4	60,4
304	7124,7	62,8	6859,9	60,4
305	7192,1	67,4	6925,2	65,3
306	7252,6	60,5	6986,8	61,6
307	7281,9	29,3	7013,8	27,0
308	7330,1	48,1	7064,6	50,8
309	7363,0	33,0	7098,5	33,9
310	7387,7	24,7	7124,4	25,9
311	7412,8	25,1	7150,0	25,6
312	7450,5	37,7	7185,2	35,2
313	7490,2	39,7	7223,0	37,9
314	7538,8	48,6	7271,8	48,7
315	7574,0	35,2	7309,8	38,1
316	7616,1	42,1	7347,4	37,6
317	7641,2	25,0	7376,7	29,3
318	7666,6	25,5	7402,2	25,5
319	7711,8	45,2	7445,0	42,8

320	7757,0	45,1	7490,2	45,2
321	7791,5	34,5	7518,7	28,5
322	7826,8	35,3	7548,0	29,3
323	7875,4	48,5	7596,2	48,2
324	7912,0	36,6	7631,2	35,1
325	7962,1	50,1	7681,3	50,1
326	8005,5	43,4	7723,5	42,2
327	8034,5	29,1	7750,9	27,5
328	8082,4	47,9	7796,5	45,6
329	8126,0	43,6	7840,3	43,8
330	8180,5	54,5	7893,8	53,5
331	8233,8	53,3	7945,6	51,8
332	8282,0	48,2	7993,5	47,9
333	8320,4	38,4	8028,7	35,2
334	8360,3	39,8	8070,3	41,6
335	8398,7	38,4	8108,7	38,4
336	8438,3	39,5	8148,0	39,2
337	8493,8	55,6	8199,8	51,8
338	8559,0	65,2	8260,9	61,1
339	8627,3	68,3	8325,9	65,0
340	8694,6	67,3	8390,7	64,9
341	8755,1	60,5	8449,2	58,5
342	8804,6	49,5	8497,5	48,3
343	8871,4	66,7	8561,8	64,3
344	8945,7	74,3	8633,0	71,2
	Model bez kapacit		Model s kapacitami	
Den	Spotřeba [kWh]	Denní spotř. [kWh]	Spotřeba [kWh]	Denní spotř. [kWh]
345	9000,0	54,3	8683,3	50,2
346	9054,5	54,5	8730,9	47,7
347	9129,1	74,6	8806,4	75,5
348	9200,6	71,5	8878,0	71,6
349	9278,5	77,9	8954,5	76,5
350	9340,5	62,1	9018,4	64,0
351	9390,7	50,2	9067,6	49,1
352	9448,3	57,6	9130,2	62,6
353	9508,2	59,9	9191,6	61,5
354	9562,0	53,8	9246,1	54,5
355	9622,5	60,5	9306,6	60,5
356	9684,4	61,9	9367,4	60,7
357	9752,0	67,6	9432,3	65,0
358	9830,1	78,1	9505,5	73,1
359	9908,6	78,5	9581,0	75,5
360	9982,7	74,1	9654,6	73,6
361	10047,5	64,8	9721,2	66,6
362	10097,6	50,1	9772,9	51,7

363	10152,2	54,6	9828,5	55,6
364	10206,6	54,4	9883,8	55,3
365	10263,0	56,4	9940,7	56,8

Roční spotřeba naměřená 10 620 kWh

17.2. Příloha B – Matematické modely

Modely jsou obsaženy v elektronické verzi, v souladu se směrnicí k odevzdání disertační práce jsou odevzdány jedenkrát tištěně mimo samotnou práci.