



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATEMATIKY

INSTITUTE OF MATHEMATICS

OPTIMÁLNÍ ŘÍZENÍ VYTÁPĚNÍ A CHLAZENÍ BYTOVÉ JEDNOTKY S NĚKOLIKA ZDROJI POMOCÍ HEURISTICKÉ OPTIMALIZACE

OPTIMUM CONTROL OF HEATING AND COOLING OF A MULTI-SOURCE
HOUSING UNIT WITH HEURISTIC OPTIMIZATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Sekula

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Tomáš Mauder, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav matematiky
Student: **Jakub Sekula**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Matematické inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Mauder, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Optimální řízení vytápění a chlazení bytové jednotky s několika zdroji pomocí heuristické optimalizace

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V dnešní době je trendem inteligentní řízení, osvětlení, zabezpečovací systémy a vytápění/chlazení bytové jednotky. V případě chlazení popř. vytápění je ale nejčastěji jeden zdroj tepla/chladu. V dnešní době však může vycházet vzhledem k dynamicky měnícím se cenám energií ekonomičtěji využití více zdrojů tepla/chladu a jejich kombinace. Tato práce se zaměřuje na hledání optimálního scénáře využití různých zdrojů tepla/chladu v reakci na okolní klimatické podmínky a rovněž na aktuální ceny energií.

Cíle bakalářské práce:

Vytvoření bilančního modelu bytové jednotky obsahující několik zdrojů tepla/chlazení a 1D numerického modelu přenosu tepla ve stěně bytové jednotky.

Pomocí heuristické optimalizace by se hledal optimální scénář řízení těchto jednotek závislý na okolních klimatických podmínkách a zohledňující ceny jednotlivých energií.

Seznam doporučené literatury:

INCROPERA, Frank P. Fundamentals of heat and mass transfer. 5th ed. New York: J. Wiley, c2002, xix, 981 s. ISBN 04-713-8650-2.

CHYSKÝ, Jaroslav. Větrání a klimatizace. Vyd. 3., zcela přeprac. Praha: Česká Matica technická, 1993, 490 s. ISBN 80-901-5740-8.

<http://www.vytapenioptiheat.cz/>

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. RNDr. Josef Šlapal, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Cielom práce je zoptimalizovanie procesu vykurovania a chladenia obytného priestoru s využitím viacerých zdrojov tepla, za účelom zníženia finančných nákladov pomocou heuristickej optimalizácie. Tepelné straty, ktoré je potrebné vykryť, sú vypočítané z modelu 1D prechodu tepla cez rovinnú stenu. Hodnoty vonkajšej teploty, rýchlosti vetru a ďalších vonkajších vplyvov pochádzajú z meteorologickej stanice v Brne.

Summary

Aim of this work is to optimize the process of heating and cooling of living space with application of many heat sources in order to decrease financial costs by heuristic optimization. Heat losses, which are needed to be covered, are counted using 1D heat transfer through plane wall model. Values of external temperature, speed of wind and another external effects came from weather station in Brno.

Klíčové slová

Heuristická optimalizácia, prenos tepla, strata tepla, minimalizácia nákladov, zdroj tepla

Keywords

Heuristic optimization, heat transfer, heat loss, cost minimization, heat source

Optimální řízení vytápění a chlazení bytové jednotky s několika zdroji pomocí heuristické optimalizace. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2020. 35 s. Vedúci bakalárskej práce Ing. Tomáš Mauder, PhD.

Prehlasujem, že som bakalársku prácu s názvom *”Optimální řízení vytápění a chlazení bytové jednotky s několika zdroji pomocí heuristické optimalizace”* spracoval samostatne a uviedol všetky použité zdroje.

Jakub Sekula

Rád by som podakoval pánovi Ing. Tomášovi Mauderovi, PhD. za rady, podnety a vedenie tejto práce a celej rodine za podporu počas celého štúdia.

Jakub Sekula

Obsah

1	Úvod	2
2	Energetická náročnosť budovy	4
2.1	Pojmy a termíny	4
2.2	Tepelná strata prestupom cez rovinnú stenu	4
2.2.1	Prenos tepla	4
2.2.2	Prenos tepla vedením / kondukcia	5
2.2.3	Prenos tepla prúdením / konvekcia	6
2.2.4	Tepelné žiarenie/radiácia	8
2.3	Tepelná strata vetraním	9
2.4	Tepelné zisky	10
3	Matematický model	11
3.1	Obytný priestor	11
3.1.1	Zloženie steny	11
3.1.2	Pohodlnosť/Odolnosť	12
3.1.3	Zdroje tepla	12
3.2	Vonkajšie faktory	14
3.3	Výsledky modelu	15
4	Optimalizácia	17
4.1	Lineárna optimalizácia	17
4.1.1	Plánovanie	17
4.2	Heuristická optimalizácia	18
4.3	Optimalizačný problém	18
4.3.1	Metóda náhodného prehľadávania	19
4.3.2	Gradientná metóda	20
5	Implementácia v programe Matlab	22
5.1	Matematický model straty tepla	22
5.2	Implementácia optimalizačného algoritmu	22
5.3	Aplikácia v programe Matlab Appdesigner	24
5.4	Výsledky	25
5.5	Návrhy na vylepšenie	29
6	Záver	30
7	Zoznam použitých skratiek a symbolov	33
8	Zoznam príloh	35

1. Úvod

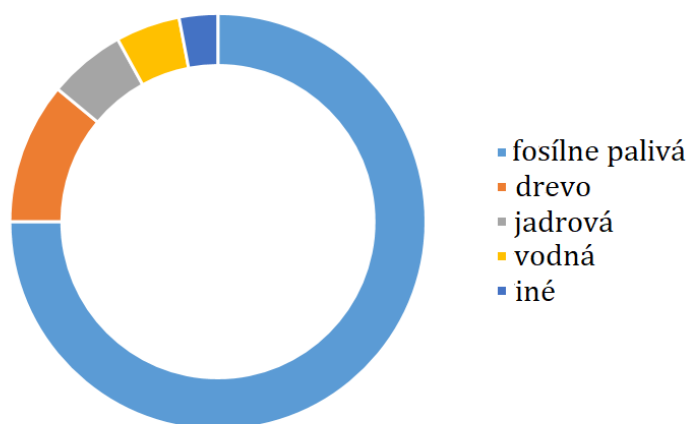
V súčasnosti je jednou z celosvetovo najviac rozoberaných tém ekológia a s ňou spätá energetika a ekonomika.

V nasledujúcich rokoch, či desaťročiach môže byť totiž rozvoj ekonomiky výrazne skomplikovnými faktormi ako:

- možná núdza o globálne zdroje nafty a plynu
- tlak na zmenu po regulácii a privatizácii na niektorých miestach sveta
- potenciálny a časový rozvoj obnoviteľných zdrojov energie
- všadeprítomná hrozba potenciálneho totálneho ohrevu zeme spolu s potrebnými preventívnymi meraniami na vedeckej úrovni, finančne veľmi náročnými
- následky pandemického ochorenia na celosvetovú ekonomiku

Spotreba energie vo svete je veľmi nerovnomerná. Pre príklad Severná Amerika má v porovnaní so západnou Európou 2-krát väčšiu spotrebu energiu na obyvateľa [8].

Výrazne nerovnomerné je aj rozdelenie druhov energií. Až približne 75% využívanej energie tvoria fosílna palivá, okolo 11% drevo a zvyšok jadrová, vodná, či energia z obnoviteľných zdrojov [8].



Obr. 1.1: Využitie energií vo svete

Cieľom energetickej politiky je preto podpora systémov so združenou výrobou elektriny a tepla a podpora technických opatrení zvyšujúcich účinnosť spotreby energie v distribúcii a konečnom užití.

Pozornosť je preto treba venovať rozdielnym zdrojom tepla, keďže každý má inú účinnosť, využíva inú formu paliva/energie a ďalšie rozličné parametre ako cena samotného zdroja či jeho údržba. Kombináciou viacerých menej výkonných zdrojov by sa mohol totiž dosiahnuť výhodnejší scenár výhrevu budovy ako pri využití jedného zdroju.

Pre zobrazenie energetického auditu budovy zostrojíme matematický model 1D prechodu tepla rovinnou stenou. Tento model zohľadňuje tak vnútorné ako aj vonkajšie vplyvy. Čo sa týka vnútorných, ide hlavne o rozmery obytného priestoru, materiály, z ktorých sa skladá stena, či ľudské faktory ako požadovaná vnútorná teplota, vetranie, či energie, ktorými sa má vykurovať a chladiť. V prípade vonkajších vplyvov ide najmä o vonkajšiu teplotu ale aj o rýchlosť vetru, či intenzitu slnečného žiarenia. Všetky tieto údaje pochádzajú z meteorologickej stanice v Brne. Po zostavení modelu, z ktorého získame hodnoty tepla, ktoré je potrebné obytnému priestoru dodať, prichádza na rad viac matematická časť práce a to optimalizácia. Jedná sa o heuristickú optimalizáciu, konkrétne minimalizáciu nákladov na vykurovanie či chladenie obytného priestoru. Zohľadňujú sa aktuálne zdroje energií, ako aj priemerné ceny zariadení, či zdrojov tepla.

2. Energetická náročnosť budovy

2.1. Pojmy a termíny

Pojmy sú opísané podľa normy ČSN EN 12831-1: Energetická náročnosť budov-Výpočet tepelného výkonu: Část 1: Tepelný výkon pro vytápění, Modul M3-3 z roku 2018. Jedná sa o preklad európskej normy EN 12831-1:2017 a má rovnaký status ako oficiálna verzia.

Funkčná časť budovy - určitá časť budovy používaná ako jedna jednotka, kde môže byť dodávka tepla individuálne regulovaná užívateľom [5].

Návrhový tepelný výkon a tepelná strata - vzájomne opačné tepelné toky. Tepelná strata vzniknutá unikajúcim teplom z budovy musí byť vykompenzovaná dostatočným tepelným výkonom pre dosiahnutie požadovanej vnútornej teploty [5].

Priemerná vnútorná teplota vzduchu - priemerná teplota vykurovaného priestoru. Pri budovách s výškou $h < 4$ m sa dá predpokladať, že sa teplota vzduchu vo všetkých častiach rovná priemernej [5].

Minimálna intenzita vetrania - počet výmen vzduchu za hodinu, ktoré je treba zaistiť za účelom dodržania úrovne kvality vzduchu [5].

Tepelná strata - Tepelná strata budovy vzniká dvomi spôsobmi a to konkrétne vetraním a prestupom tepla cez rovinnú stenu obálky budovy [5].

2.2. Tepelná strata prestupom cez rovinnú stenu

Rovnice a definície v nasledujúcej podkapitole pochádzajú z *Minilexikónu tepla* od Viktora Wittlingera [18].

2.2.1. Prenos tepla

K prenosu tepla dochádza tromi spôsobmi [11]:

- *vedením* (kondukciou)
- *prúdením* (konvekciou)
- *sálaním* (tepelným žiarením, radiáciou)

Celkový prenos tepla je daný súčtom súčasne prebiehajúcich prenosov tepla rôznymi spôsobmi. Prenos tepla sa ďalej delí na *ustálený* a to ak teplota v každom bode počas celého procesu je stála a na *neustálený* ak sa mení teplota a tepelný tok. Jedná sa o ohrev a chladnutie.

2.2.2. Prenos tepla vedením / kondukcia

Základný zákon vedenia tepla je *Fourierov zákon* [18]

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \nabla t, \quad (2.1)$$

ktorý vyjadruje, že vektor hustoty tepelného toku \dot{q} je úmerný súčiniteľu tepelnej vodivosti látky λ a gradientu teploty t . Znamienko mínus značí smer šírenia tepla od miesta s vyššou teplotou k chladnejšiemu.

Vedenie tepla v priestore pre tuhé teleso s vnútornými zdrojmi tepla vyjadruje *Fourierova-Kirchoffova diferenciálna rovnica vedenia tepla* [18]

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \left(\nabla^2 t + \frac{q_v}{\lambda} \right). \quad (2.2)$$

Pre ustálené teplotné procesy je ľavá strana tejto rovnice nulová. Súčiniteľ teplotnej vodivosti a definuje pomer:

$$a = \frac{\lambda}{c_v \cdot \rho} \quad (2.3)$$

a slúži k určaniu rýchlosti teplotných zmien v látke. Druhá mocnina *Hamiltonovho operátora* ∇ je rovná *Laplaceovmu operátoru* Δ , avšak tento sa v rovnici nepoužíva aby nedošlo k zámene s rozdielom teplôt [18].

Vedenie tepla rovinnou stenou

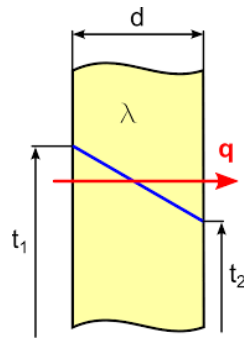
Pre stenu s hrúbkou δ , ktorá je oveľa menšia ako jej dĺžka, výška, či šírka, pri $\lambda = konst$ a bez vnútorných zdrojov platí:

$$\dot{q} = \frac{\lambda}{d}(t_i - t_e) = \frac{(t_i - t_e)}{R}, \quad (2.4)$$

kde \dot{q} je merný tepelný tok, t_i je teplota interiéru a t_e teplota exteriéru. R je tepelný odpor, ktorý charakterizuje, aký je teplotný rozdiel medzi vrstvami steny, cez ktorú vedie tepelný výkon 1 Watt. Tepelný odpor je priamo úmerný rozmeru danej konštrukcie d a nepriamo od súčiniteľa tepelnej vodivosti λ :

$$R = \frac{d}{\lambda}. \quad (2.5)$$

2.2. TEPELNÁ STRATA PRESTUPOM CEZ ROVINNÚ STENU



Obr. 2.1: Vedenie tepla rovinnou stenou [13]

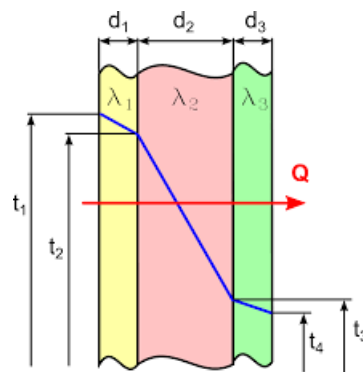
Vedenie tepla zloženou rovinnou stenou

V prípade, že stena sa neskladá z jedného materiálu ale má viac (n) vrstiev, môže mať každá vrstva inú hrúbku δ_i a tepelnú vodivosť λ_i , kde $i = 1, \dots, n$. Preto rovnicu (2.4) nasledovne upravíme:

$$\dot{q} = \frac{t_i - t_e}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n}} = \frac{t_i - t_e}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i}} . \quad (2.6)$$

Čo sa týka tepelného odporu sa celkový odpor rovná súčtu odporov jednotlivých zložiek:

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} . \quad (2.7)$$



Obr. 2.2: Vedenie tepla zloženou rovinnou stenou [13]

2.2.3. Prenos tepla prúdením / konvekcia

Ku konvekcie dochádza pri prenose tepla medzi pevným, či kvapalným telesom a obtekajúcou tekutinou, s tým, že majú rozdielne teploty. V porovnaní s kondukciou sa jedná o prenos energie pri pohybe väčších makročastí tekutiny z oblasti o teplote t_1 do oblasti o teplote t_2 . Konvekcia je tým pádom zviazaná s pohybom tekutiny.

2.2. TEPELNÁ STRATA PRESTUPOM CEZ ROVINNÚ STENU

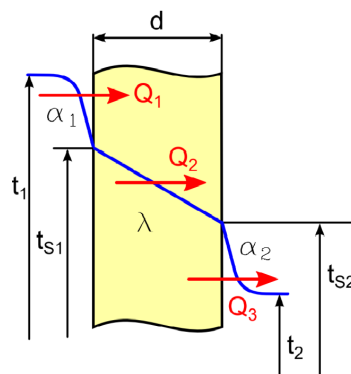
Vzhľadom na to, že konvekcia je definovaná ako prenos tepla, pri ktorom dochádza ku kontaktu obtekajúcej tekutiny s pevným, či kvapalným telesom, je možné konštatovať, že pri konvekcii bude vždy dochádzať aj ku kondukcii.

V prípade, že je obtekajúcou tekutinou plyn so schopnosťou sálať a pohlcovať žiarivú energiu sa ku konvekcii primieša aj prenos energie *žiarením*. Výpočty v praxi pre konvekciu sú stavané na *Newtonovom zákone ochladzovania* [3, 18].

$$\dot{Q} = \alpha \cdot S \cdot (t_i - t_e), \quad (2.8)$$

kde S je veľkosť povrchu obtekaného telesa a α súčiniteľ prestupu tepla.

V prípade prechodu cez stenu teplo prechádza tromi rôznymi tepelnými odporami. Prvý pri prechode z teplejšieho prostredia do steny. Druhý v samotnej stene a tretí pri prechode zo steny do chladnejšieho prostredia. Celkový tepelný odpor sa rovná ich súčtu [18].



Obr. 2.3: Vedenie a prúdenie tepla rovinnou stenou [13]

Kombinovaný prenos tepla

Pri prenose tepla cez stenu sa jedná o kombinovaný prenos tepla. Jednotlivé spôsoby prenosu tepla vedením, konvekciou a radiáciou sú zjednodušenia pre uľahčenie matematického opisu výsledného prenosu tepla. Samostatný výskyt jedného typu prenosu je zriedkavý avšak môžeme ho vidieť napríklad pri prenose tepla medzi Slnkom a Zemou. Ide o radiáciu, keďže vo vesmíre sa vyskytuje vákuum.

Väčšinou ale spolu pôsobia všetky tri, hoci nie v rovnakom pomere. Najčastejšie sa jedná len o kombináciu dvoch typov prenosu tepla, vzhľadom k zanedbateľnému množstvu tepla preneseného tretím typom prenosu. Pri riešení sa sčítajú tepelné toky, resp. hustoty tepelných tokov [18].

Pri prenose tepla cez stenu sa teda jedná najmä o kombináciu prenosu tepla vedením a prúdením, či konvekciou. Tento kombinovaný proces sa nazýva *prechod tepla*.

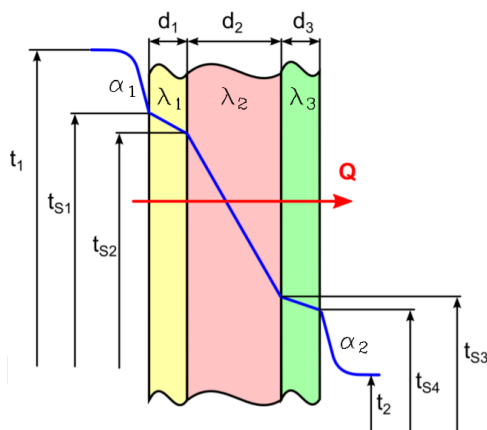
Vzhľadom k tomu, že tepelné odpory sú za sebou radené sériovo, pre merný tepelný tok platí

2.2. TEPELNÁ STRATA PRESTUPOM CEZ ROVINNÚ STENU

$$\dot{q} = k \cdot (t_i - t_e), \quad (2.9)$$

kde k je súčiniteľ prechodu tepla cez rovinnú stenu

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (2.10)$$



Obr. 2.4: Prechod tepla zloženou rovinnou stenou [13]

V prípade, že chceme poznať množstvo tepla, ktoré prejde stenou s povrchom S , tak len vynásobíme pravú stranu rovnice (2.9) týmto povrchom:

$$\dot{Q}_s = \frac{(t_i - t_e) \cdot S}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (2.11)$$

2.2.4. Tepelné žiarenie/radiácia

Oproti vedeniu a konvekcie má *prenos tepla žiarením* odlišný charakter. Na povrchoch telies sa nachádzajú atómy, ktoré vyžarujú kvantá energie cez elektromagnetické vlny, ktoré sú pohlcované inými telesami, resp. prostredím ako je plyn či rozptýlené mikročastočky. Teleso, ktoré zachytáva kvantá energie sa pri tomto procese zahrieva. *Žiarivý tok*, teda tepelný tok prenesený žiarením závisí najmä od teploty povrchov telies [3].

Elektromagnetické žiarenie sa môže šíriť aj vo vákuu a to bez strát, či v plynch, kde sa pohlcuje len málo, pretože plyny sú *preteplivé* a teda prepúšťajú tepelné žiarenie. Tepelnému žiareniu sa často v literatúre hovorí *infračervené žiarenie*.

Akonáhle žiarivý tok dopadne na povrch telesa, tak sa jeho časť odrazí (*reflexia*), časť pohltí (*absorbcia*) a tretia časť môže cez teleso prejsť (*diatermia*).

K výpočtu žiarivého toku sa používa **Stefanov-Boltzmannov zákon**. Ten popisuje, ako čierne teleso resp. ideálny žiarič vyžaruje žiarivý tok \dot{q} úmerný štvrtej mocnine absolútnej teploty T [3].

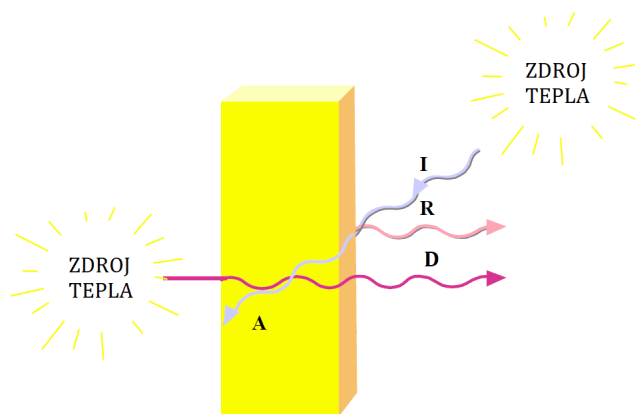
$$\dot{q} = \sigma \cdot T^4, \quad (2.12)$$

2.3. TEPELNÁ STRATA VETRANÍM

kde σ je *Stefanova-Boltzmannova konštanta* s hodnotou $(5,6697 \pm 0,0029) \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$. Žiarivý tok reálneho telesa je však pri rovnakej teplote menší v porovnaní s čiernym telesom a je daný podľa rovnice:

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (2.13)$$

kde $\varepsilon \in (0,1)$ a jedná sa o *emisivitu povrchu telesa*. Táto vlastnosť poskytuje mieru efektívnosti vyžarovania povrchu telesa v porovnaní s telesom čiernym. Silne závisí od materiálu na povrchu telesa a od povrchovej úpravy [3].



Obr. 2.5: Žiarivý tok dopadajúci na teleso [9]

2.3. Tepelná strata vetraním

Tepelná strata vetraním - jedná sa o stratu do vonkajšieho prostredia vetraním a infiltráciou cez obálku a tok tepla prenášaný z jedného vykurovaného priestoru do druhého, prípadne nevykurovaného priestoru [5].

Množstvo tepla, ktoré sa stratí pri vetraní podľa ČSN EN 12831-1. [5]:

$$\dot{Q}_V = V \cdot \eta \cdot \rho_a \cdot c_{p,a} \cdot (t_i - t_e), \quad (2.14)$$

kde je:

- η intenzita vetrania budovy
- ρ_a hustota vzduchu
- $c_{p,a}$ merná tepelná kapacita vzduchu

V rámci zjednodušeného prístupu sú ρ_a a $c_{p,a}$ brané ako konštanty a ich súčin má hodnotu $\rho_a \cdot c_{p,a} = 0,34$ [5].

Celková tepelná strata - rovná sa súčtu straty prechodom cez stenu a straty vetraním:

$$\dot{Q}_C = \dot{Q}_s + \dot{Q}_V. \quad (2.15)$$

2.4. Tepelné zisky

V každej domácnosti dochádza k veľa rôznym typom tepelných ziskov. Prakticky každý človek generuje určitý tepelný výkon, ktorý závisí od jeho aktivity. Či sedí, spí alebo vykonáva určitú činnosť. Priemerné teplo vyprodukované ľuďmi sa dokonca líši aj podľa pohlavia a je to pre muža zhruba 1,25 W/kg pri sedení, či ľahšej aktivite. Pre ženy sa jedná približne o 85% a pre deti 75% z tepla vyprodukovaného mužmi [8].

Ďalším príkladom tepelných ziskov sú spotrebiče v domácnosti. Väčšina ich generuje určité teplo. Či už sa jedná o práčku, či chladničku, ktoré vygenerujú najviac tepla, alebo bežný počítač, televízor, či len obyčajné osvetlenie.

V súčasnosti je ale veľká snaha obmedzovať spotrebu elektrosprebičov a preto sa predpokladá pokles vygenerovaného tepla a teda mierne nižšie tepelné zisky. Veľkým podielom sa na tepelných ziskoch podiela samotné slnko a to prenosom tepla žiarením, či radiáciou.

Pre výpočet tepelných ziskov od slnečného žiarenia cez okná na obvodových stenách budovy Q_z použijeme platnú normu ČSN 730542: Způsob stanovení energetické bilance zasklených ploch obvodového pláště budov z roku 1995 [6]:

$$\dot{Q}_z = \dot{q}_g \cdot S_{po} \cdot P \cdot c_m \cdot c_n, \quad (2.16)$$

kde \dot{q}_g je globálne slnečné žiarenie, údaje o ktorom sme získali z meteorologickej stanice [14]. Ďalej potrebujeme poznať plochu priesvitnej časti okna S_{po} . Z dôvodu zjednodušenia výpočtu nebudeme brať v úvahu rám okna, keďže jeho rozmery sú v porovnaní so zasklením zanedbateľné. Parameter P predstavuje priepustnosť okna a je rovný súčinu viacerých parametrov:

$$P = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3. \quad (2.17)$$

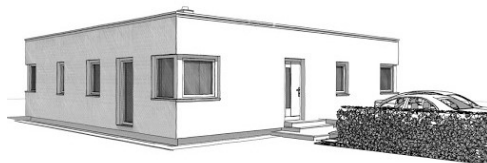
Parameter P_1 predstavuje priepustnosť slnečného žiarenia cez zasklenie z číreho skla. Pre dvojsklenné okno nadobúda hodnotu $P_1 = 0,81$. Parameter P_2 počíta so znečistením zasklenia. Pokiaľ sa neuvádza inak, tak sa za tento parameter dosadzuje hodnota $P_2 = 0,9$ [6]. Tretí z týchto parametrov uvádza hodnoty tieniacich činiteľov. Samotné dvojité sklo vytvára mierny tieň a teda má hodnotu $P_3 = 0,9$. Do úvahy však budeme brať aj svetlé lamelové žalúzie, ktoré pri náklone 45° výrazne zabraňujú tepelným ziskom z dôvodu hodnoty parametru $P_3 = 0,15$ [7]. V úvahu by sa mohli brať aj vonkajšie žalúzie, či markízy, ktoré by ešte zredukovali teplo, ktoré by budova nadobudla, avšak v tomto modeli s nimi nebudeme počítať z dôvodu nasledujúceho parametru. Činiteľ využitia slnečného žiarenia c_m totiž neuvažuje externé tieniace prvky. Jeho hodnota závisí od mesiaca v roku a svetovej strany, ale pohybuje sa v rozmedzí $c_m \in \langle 0,67; 1 \rangle$. Posledný z parametrov c_n koriguje skutočnosť, že dopad slnečných paprskov nie je kolmý a má hodnotu $c_n = 0,9$ [6].

3. Matematický model

Za účelom zistenia množstva tepla, ktoré prejde cez obálku budovy sme zostrojili model prechodu tepla cez rovinnú zloženú stenu, do ktorého vstupujú údaje týkajúce sa vonkajších faktorov, teda predovšetkým počasia a údaje, ktoré sa môžu pre každého užívateľa meniť, čiže údaje o samotnej budove, či o požiadavkách užívateľa samotného.

3.1. Obytný priestor

Pri výpočte energetickej náročnosti budovy, konkrétne tepelného výkonu zohrávajú veľkú rolu rozmery samotnej budovy. Čím väčší je povrch obálky a objem budovy, tým väčšia tepelná strata vznikne. Z tohto dôvodu je potrebné zvážiť, pre aké rozmery sa bude daný model počítať. Pri vzorovom modeli sú rozmery domu nasledovné: $a \cdot b \cdot c = 15 \text{ m} \cdot 10 \text{ m} \cdot 3 \text{ m}$ (dĺžka · šírka · výška).



Obr. 3.1: Ukážka budovy [25]

3.1.1. Zloženie steny

Zloženie samotnej steny je podstatné pri určovaní tepelného odporu steny. V modeli sme sa rozhodli uvažovať „lahkú“ stenu a teda stenu, ktorej tepelná kapacita je zanedbateľná a teda v sebe neuschováva takmer žiadne teplo. Zvolili sme trojvrstvovú stenu a to klasické murivo, minerálnu vatu a Ytongovú omietku. Aby sme mohli zistiť veľkosť tepelného odporu jednotlivých zložiek (2.5), potrebujeme poznať ich hrúbku d a súčiniteľ tepelnej vodivosti λ .

Vrstva	Hrúbka [cm]	Súčiniteľ tepelnej vodivosti [W · m ⁻¹ · K ⁻¹]
Murivo	30	0,6
Min.vata	10	0,056
Ytong. omietka	1,5	0,8

Tabuľka 3.1: Zloženie steny

Ďalším podstatným faktorom v zložení steny sú okná. Vzhľadom k tomu, že sa predpokladá použitie modelu pri novostavbách sme z normy ČSN EN 12831-1 získali údaj

tepelnej vodivosti $\lambda = 1,8 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$. Táto hodnota je rovnaká pre drevený, plastový, či kovový rám takže nie je potrebné sa rámom zaoberať [5]. Vidíme ale, že v porovnaní so stenou je aj pre nové okná hodnota tepelnej vodivosti vcelku vysoká a tým pádom odpor malý. Cieľom je mať odpor čo najväčší a tak treba brať do úvahy veľkosť okien. Či uprednostniť vizuálne výhody francúzskeho okna alebo radšej zvoliť ekonomicky výhodnejšiu alternatívu okien menších.

3.1.2. Pohodlnosť/Odolnosť

Pre určenie množstva tepla prechádzajúceho cez stenu je potrebné určiť, na akú teplotu má byť obytný priestor vyhriaty. Táto hodnota je ale rozličná pre rôznorodosť domácností a ľudí v nich žijúcich. Preto sme sa rozhodli teplotu interiéru v denných hodinách nastaviť na $t_{i,d} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$. V noci ale väčšina ľudí preferuje trochu nižšiu teplotu a tak sme teplotu interiéru pre nočné hodiny (21 : 00 – 5 : 00) nastavili na $t_{i,n} = 19 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ďalej sme sa rozhodli v prípade, že teplota okolia je takmer identická tej požadovanej, nevykurovať, či nechladiť obytný priestor. Ušetrí sa tým určitá čiastka nákladov a ľudský organizmus si zmeny možno ani nevšimne.

Vyššie sme zistili, že tepelná strata vzniká prechodom cez stenu, ale aj vetraním. Je preto potrebné zdefinovať, ako často bude obytný priestor vetraný. Za minimálnu intenzitu vetrania sme teda zvolili normovanú hodnotu pre nové domy a to $\eta_{min} = 0.5/\text{hod}$ (1-krát za 2 hodiny) [5].

Ďalším faktorom pri zostrojovaní modelu sú samotné zdroje tepla, ktoré musia vykryť tepelnú stratu. Konkrétnejšie forma energie, ktorou sú poháňané. Väčšina domácností má zabudovanú elektriku, ale nie každá má plynovú prípojku, či miesto na uskladňovanie dreva. Treba preto brať do úvahy, ktoré zdroje navrhnúť do optimalizácie vykurovacieho procesu.

3.1.3. Zdroje tepla

Tepelnú stratu, ktorá vzniká vetraním a prestupom tepla cez obálku budovy je potrebné vykryť zdrojmi tepla o určitom tepelnom výkone.

Každý zdroj tepla má iné vlastnosti. Každý generuje teplo odlišným spôsobom. Napríklad krb je, samozrejme v závislosti od typu, schopný vytvárať veľké množstvo tepla, ale nie veľmi plošne. Jedná sa o bodový zdroj tepla. Z tohoto dôvodu sme sa rozhodli model zjednodušiť. Celý interiér budovy berieme ako bod, ktorému je potrebné dodať teplo. Model teda neberie v úvahu vnútorné steny budovy a teplo sa generuje v rámci celej budovy rovnomerne.

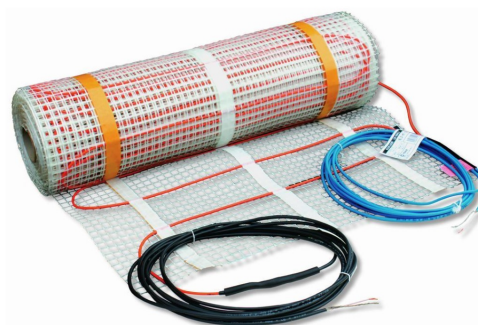
V úvahu sme zobrali dva výkonnejšie a pochopiteľne drahšie zdroje. Konkrétne klimatizáciu **LG DC24RQ, Standard**, ktorú môžeme vidieť na Obr. 3.2. Cena zariadenia je približne 1580 eur v závislosti od predajcu. Jedná sa o úspornú klimatizáciu so samočistením, filtrami pre komfortný vzduch a tichým chodom. Jej maximálny výkon pre vykurovanie síce siaha až k 6 kW, ale rozhodli sme sa uvažovať nižší pre optimálny chod

zdroju. Tento postup sme zvolili u všetkých zdrojov [22].



Obr. 3.2: LG DC24RQ, Standard [22]

Na obrázku Obr. 3.3 je zobrazený druhý z výkonných zdrojov a to jednožilová vykurovacia rohož **LPSV 80/28**. Jej cena sa pohybuje v okolí 300 eur za 28 m² a jej výkon je 80 W/m². Maximálny výkon a cena teda súvisia s plochou, v ktorej má byť vykurovacia rohož implementovaná [23]. V prípade rohože ale aj ostatných zdrojov je ale potrebné počítať s tým, že niečo stojí aj ich montáž do budovy. Rohož je potrebné zaliat do betónu, krb potrebuje komín a klimatizáciu na stenu musí osadiť kvalifikovaný pracovník. Cena zdroja je preto mierne vyššia, pretože je v nej zahrnutá aj montáž samotného zdroja.



Obr. 3.3: LPSV 80/28 [23]

Tretí zo zdrojov je už spomínaný krb. Oproti ostatným zdrojom využíva na tvorbu tepla drevo. Je preto potrebné zvážiť aký typ dreva sa bude používať. Zvolili sme bukové drevo, ktoré má najvýhodnejšiu cenu v závislosti od účinnosti [20]. Krbov je na trhu veľké množstvo druhov a tak sme zvolili variantu **Romotop LAREDO 03**, Obr. 3.4, ktorá odpovedala priemeru za 1000 eur s maximálnym výkonom 2350 W.

A posledný zo zdrojov je menej výkonný, ale oproti ostatným zdrojom aj výrazne lacnejší elektrický radiátor **ISAN Quadrat Elektro**. Jedná sa o klasický radiátor rebríkového typu ako môžeme vidieť na Obr. 3.5. Cena tohto zdroja je závislá od jeho maximálneho výkonu, ale rozhodli sme sa vybrať variantu s výkonom 700 W za cenu približne 400 eur [24]. Pochopiteľne sa rebríkový radiátor bežne nepoužíva na výhrev budovy, ale skôr len jej časti, poväčšine kúpelne, mohol by však poskytnúť zaujímavé výsledky v kombinácii s iným zdrojom.



Obr. 3.4: Romotop LAREDO 03 [26]

Všetky spomínané zdroje by sa dali nájsť aj v lacnejšom prevedení ale aj v podstatne drahšom a tak sme zvolili približný priemer. Je samozrejmé, že existuje ešte veľa iných typov zdrojov tepla, ale pre zrýchlenie následnej optimalizácie sme zvolili týchto zástupcov. V budúcnosti je však možné tieto zdroje pozmeniť, či uvažovať začlenenie ďalších do procesu optimalizácie popri už spomínaných štyroch zdrojoch.



Obr. 3.5: ISAN Quadrat Elektro [24]

3.2. Vonkajšie faktory

Všetky údaje o počasí sú získané z meteorologickej stanice v Brne. Jedná sa o údaje v každej hodine v roku od 01.01. po 31.12 [14].

Asi najpodstatnejšou premennou je teplota okolitého prostredia. Čím nižšia je, tým väčšia tepelná strata vzniká (2.1). Akonáhle je teplota pod požadovanou teplotou interiéru tak teplo prúdi von z budovy, akonáhle ale teplota stúpne nad požadovanú teplotu, dochádza k opačnému procesu a je potrebné priestor chladiť. Treba ale zvážiť, či je klimatizovanie priestoru nutné. K prekročeniu teploty samozrejme dochádza, ale nejedná sa ani zďaleka o tak veľký tepelný tok ako vzniká v najchladnejších mesiacoch. V prípade, že by sa jednalo o budovu v tropických, či prímorských oblastiach je to považované takmer za samozrejmosť, ale v zemepisných šírkach Brna, či celej Českej republiky prípadne Slovenska sa klimatizácia nevyskytuje v bežnej domácnosti a jedná sa skôr o osobné preferencie ako o výslovnú potrebu. Je ale potrebné zvážiť koľko tepla budova prijme, ak sa budú brať v úvahu solárne zisky.

Ďalej sme z meteorologickej stanice mali údaje o rýchlosti vetru. V norme ČSN EN 12831-1 sa nachádzajú údaje o tepelnom odpore pri prestupe tepla na vonkajšej strane budovy v závislosti od rýchlosti prúdenia vetru. Jedná sa len o pár hodnôt a tak sme na získanie presnejších výsledkov použili intrapoláciu a extrapoláciu. Z tabuľky ale vyplýva, že čím väčšia je rýchlosť prúdenia, tým nižší je tepelný odpor na vonkajšej strane budovy [5].

Tretím z údajov je intenzita slnečného žiarenia. Jedná sa o hodnoty celkovej intenzity slnečného žiarenia ako aj hodnoty tej difúznej [14]. Tepelné zisky budeme počítat pre oslnenú časť budovy a teda pre tú, na ktorú dopadá priame slnečné žiarenie. Intenzita priameho slnečného žiarenia sa rovná rozdielu celkového a difúzneho slnečného žiarenia [8].

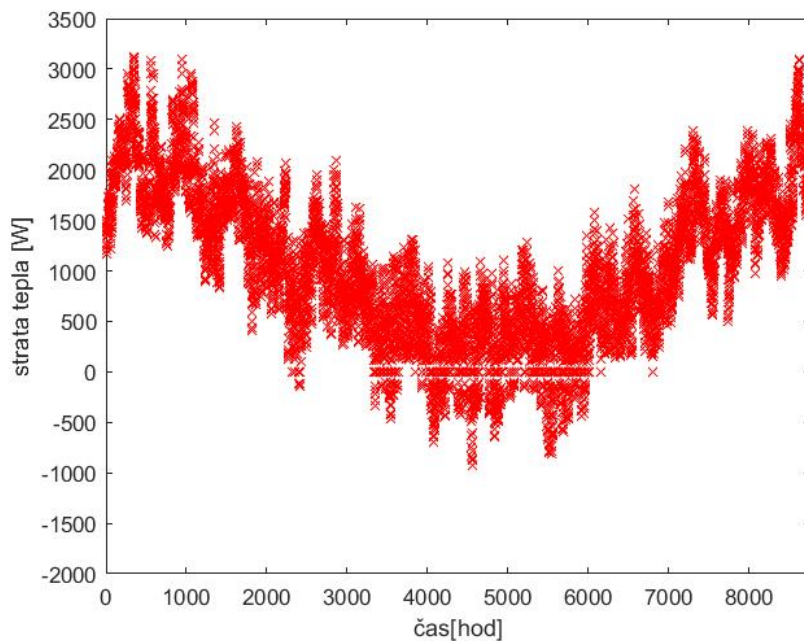
3.3. Výsledky modelu

Po dosadení všetkých vstupných údajov poznáme tepelnú stratu obytného priestoru v každej hodine v priebehu roka, ktorú môžeme vidieť v grafe na Obr. 3.6. Môžeme pozorovať vyradenie procesu vykurovania a chladenie v prípade, že strata tepla je malá a takisto aj veľmi kolísavý priebeh počas celého roka.

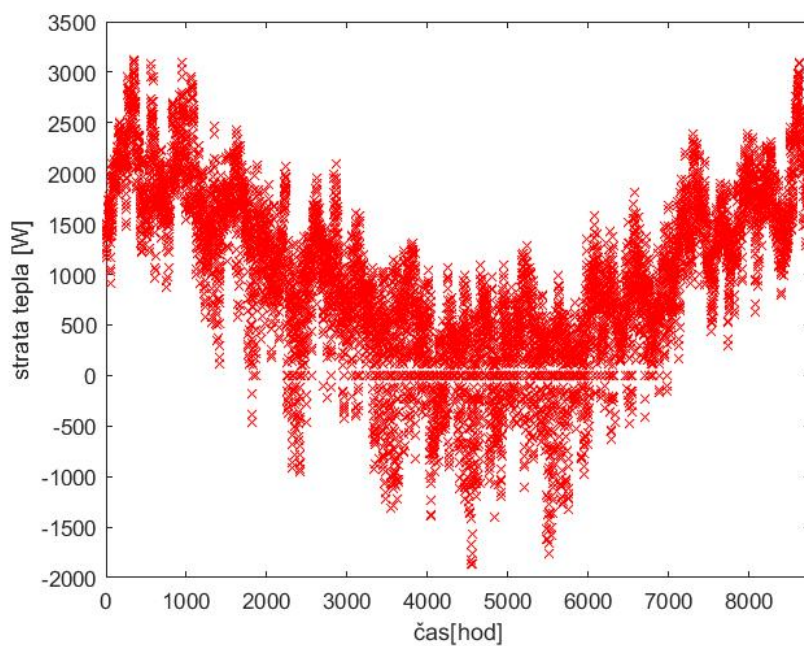
V tomto prípade sa jedná o vzorový dom, či budovu, ktorej rozmery budeme schopní pozmeniť a tým pádom sa zmení aj tepelná strata budovy. Graf Obr.3.6 však zobrazuje stratu tepla bez uvažovania tepelných ziskov. Graf sa teda pozmení ak zvážime, že celkový tepelný tok, ktorý treba budove dodať sa rovná:

$$\dot{Q}_P = \dot{Q}_C - \dot{Q}_Z. \quad (3.1)$$

Z grafu Obr. 3.7 je zrejmé, že dni kedy je strata záporná alebo inak povedané - teplo prúdi z exteriéru do budovy, je podstatne viac a tak pri počítaní modelu s tepelnými ziskami vzniká väčšia potreba budovu chladiť.



Obr. 3.6: Tepelná strata v priebehu roka



Obr. 3.7: Tepelná strata znížená tepelnými ziskami

Matematický model má teda výstupné údaje vo forme vektoru $\vec{Q}_P = (\dot{Q}_{P_1}, \dots, \dot{Q}_{P_n})$, kde n je počet jednotiek času v roku. Pre zjednodušenie výpočtu je totiž možné nahradiť hodiny dňami pri spočítaní priemernej straty tepla za 24 hodín. Každú jednu hodnotu je ale možné vykryť rôznymi zdrojmi, či ich kombináciami. Preto je potrebné výstupné údaje z modelu prejsť procesom optimalizácie za účelom minimalizácie nákladov na vykurovanie, či chladenie.

4. Optimalizácia

4.1. Lineárna optimalizácia

Lineárna optimalizácia je proces, pri ktorom sa rieši *optimalizačný problém*, ktorý spĺňa nasledujúce podmienky [12]:

- Minimalizuje alebo maximalizuje **lineárnu účelovú funkciu** viacerých premenných.
- Jednotlivé premenné v účelovej funkcii musia spĺňať predpísané *lineárne ohraničenia*. Každé z týchto ohraničení je dané buď rovnicou alebo neostrou nerovnicou. Ostré nerovnice sa v ohraničeniach nemôžu vyskytovať.
- Hodnoty premenných spadajú do množiny reálnych čísel, avšak u niektorých môže byť kladená podmienka nezápornosti.

Úloha lineárnej optimalizácie má tvar [12]:

$$\text{opt}(z) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (4.1)$$

$$a_{1,1}x_1 + a_{1,2}x_2 + \dots + a_{1,n}x_n \diamond b_1 \quad (4.2)$$

$$a_{m,1}x_1 + a_{m,2}x_2 + \dots + a_{m,n}x_n \diamond b_m \quad (4.3)$$

V rovnici (4.1) je znak *opt* zástupcom buď pre *min*, ak sa jedná o minimalizáciu alebo *max*, ak sa jedná o maximalizáciu. Symbol \diamond je nahradený buď operátorom $=$, \leq alebo \geq . Premennými sú x_1, \dots, x_n a čísla $a_{1,1}, \dots, a_{m,n}$; b_1, \dots, b_m a c_1, \dots, c_n sú reálne čísla.

N-tica premenných, ktorá spĺňa všetky riešenia sa nazýva *prípustné riešenie*. Prípustné riešenie v ktorom naberá účelová funkcia najmenšiu, prípadne najväčšiu hodnotu, sa nazýva **optimálne riešenie** [12].

4.1.1. Plánovanie

Rozhodnutie znamená vybrať si aspoň z dvoch prístupných možností. Väčšina rozhodovaní v bežnom živote je jednoduchých, ako výber jedla, oblečenia a tak ďalej. Vždy pri tom berieme ohľad na faktory ako cena, chuť. *Podpora rozhodovania* znamená, že si podvedome formulujeme model rozhodnutia. Robíme tak tým spôsobom, že vnímame efekt špecifických rozhodnutí pri preskúmaní rôznych možností závislých na kritériách rozhodovania. Subjektívne hodnoty vyberania možností sú teda pevne definované a ich vyhodnotenie výberu vhodných možností je transparentné. Konečný výber je preto až posledným krokom v celom procese rozhodovania [2].

Plánovanie, na druhej strane, je proces rozmýšľania nad organizovaním aktivít potrebných k dosiahnutiu určitého cieľa. Zahŕňa v sebe vytvorenie a spracovanie plánu. Je teda úzko späté so samotným procesom vytvárania modelu rozhodnutia. Plánovanie je možné

chápať ako príručku k dosiahnutiu výsledného rozhodnutia.

Vyberanie najoptimálnejšieho rozhodnutia ale nie je jediným problémom pri rozhodovaní sa. Môže sa taktiež jednať o roztriedenie, či usporiadanie možností podľa ich optimálnosti [10].

Postup pri plánovaní, či vytváraní finálneho rozhodnutia je nasledovný:

1. Štrukturalizovanie problému rozhodovania.
2. Definícia následkov pri rôznych alternatívach rozhodovania.
3. Vyberanie preferencií pri tvorbe rozhodnutí.
4. Vyčíslenie a porovnanie dostupných možností.

Niektoré procesy vyberania najlepšieho možného riešenia je ale niekedy obtiažne riešiť pomocou klasickej lineárnej optimalizácie. Väčšina problémov totiž nie je lineárna, prípadne ich nie je možné linearizovať. V posledných rokoch sa tak do popredia dostáva heuristická optimalizácia, ktorá využíva viaceré metódy k zisteniu optima.

4.2. Heuristická optimalizácia

Heuristická optimalizácia je ideálna k problému minimalizácie nákladov, či populačných problémov. Často je založená na poznatkoch z biológie či fyziky. Medzi najznámejšie metódy heuristickej optimalizácie patria *genetický algoritmus* či *metóda simulovaného žihania*.

Pri heuristickej optimalizácii nie je zaručená uskutočniteľnosť či optimálnosť riešenia. Väčšinou nachádza len takmer optimálne riešenie a niekedy nevie identifikovať ako ďaleko od optimálneho, či zrealizovateľného riešenia sa riešenie nachádza. Veľa v súčasnosti používaných techník sa nazýva *metaheuristických*. Jedná sa o techniku zapojenia viacerých logických štruktúr k heuristike za účelom zvýšenia efektívnosti. Podľa Laporteho a Osmana [16] sa metaheuristika považuje za „*Proces iteračného generovania, ktorý vedie k podriadenej heuristike využitím rozdielnych inteligentných konceptov k preskúmaniu a využitiu celého prehladaváneho priestoru, tieto stratégie vedú k štrukturovaniu informácii za účelom priblíženia sa k okoliu optimálnych riešení*”.

Princípy heuristickej optimalizácie sú väčšinou jednoducho pochopiteľné vzhľadom k minimu podmienok potrebných k štruktúre problému. Výhodou je často rýchlosť optimalizácie, niekedy však na úkor menej presného riešenia.

4.3. Optimalizačný problém

Pri riešení minimalizácie nákladov na vykurovanie budovy sa budeme snažiť minimalizovať nasledujúcu účelovú funkciu s podmienkami:

$$\min(Cost) = \sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^n (X_{j,i} \cdot \eta_j^{-1} \cdot c_j) + \text{sgn}(\sum_{i=1}^n (X_{j,i})) \cdot C_j \right) \quad (4.4)$$

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n X_{j,i} \geq \dot{Q}_P \quad (4.5)$$

$$X_{j,min} \leq X_{j,i} \leq X_{j,max}, \quad (4.6)$$

kde $X_{i,j}$ reprezentuje výkon jednotlivých zdrojov v konkrétnej časovej jednotke. Index i určuje časový údaj a teda značí výkon v určitom dni, či hodine. Index j rozlišuje jednotlivé zdroje, kde každý z nich je ohraničený výkonom, ktorý je schopný vyprodukovať (4.6). Hodnota c_j je cena za kwh používanej formy energie v eurách a C_j je cena samotného zariadenia, ktorá zahrňuje aj jeho montáž.

4.3.1. Metóda náhodného prehľadávania

Metóda náhodného prehľadávania (Random Search) priestoru riešení, alebo inak nazývaná metóda pokus omyl, či metóda Monte Carlo je najzákladnejšou metódou heuristickej optimalizácie. Na rozdiel od metódy hľadania v mriežke, ktorá prehľadáva manuálne stanovené priestory, je táto metóda schopná nájsť optimum aj vo viacdimeznionálnych priestoroch. Má však výhody metódy vyhľadávania v mriežke ako veľmi jednoduchý koncept, či implementácia a strieda jemné zníženie efektívnosti v nízkodimeznionálnych priestoroch za veľké zvýšenie ekektívnosti v priestoroch vyšších dimenzií [4, 19].

Algoritmus metódy Random Search [19]:

1. Inicializujeme parametre algoritmu Θ_0 , počiatočné body $X_0 \subset S$, kde S je priestor všetkých možných riešení, a iteračný index $k = 0$.
2. Vytvoríme kolekciu bodov, ktoré sú kandidátmi $V_{k+1} \subset S$ pomocou špecifického generátora s pridruženou distribúciou kandidátov.
3. Aktualizujeme body X_{k+1} založené na kandidátoch V_{k+1} , predchádzajúcich iteráciách, či parametroch algoritmu Θ_{k+1} .
4. Ak je splnené kritérium zastavenia, algoritmus zastaví. Ak nie, tak navýšime index k a vrátime sa ku kroku 2.

Jej princíp spočíva v testovaní náhodných bodov, nezávisle vybratých a rovnomerne pokrývajúcich celý vyhľadávací priestor. Z prejdenných bodov vyberie tú konfiguráciu premenných, ktorá dosiahla hodnotu, čo najbližšiu k optimu [15].

Generátory jedného kroku

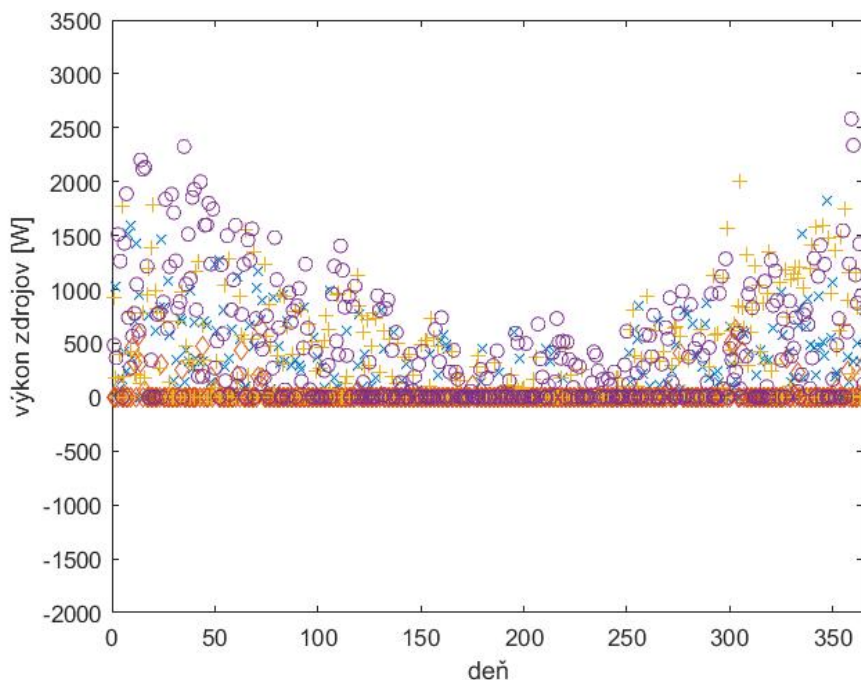
Veľa z algoritmov náhodného prehľadávania generuje pri iterácii len jeden bod. Bežnou metódou k tomuto procesu je vytvorenie kandidáta v smere vektoru, ktorý sa nazýva *direction-step paradigm*. Krok 2 by v prípade tohto algoritmu vypadal nasledovne:

$$V_{k+1} = X_k + S_k D_k, \quad (4.7)$$

kde kandidát V_{k+1} je generovaný posunutím bodu X_k o dĺžku S_k v smere D_k pri k -tej iterácii. Smer kroku D_k môže byť motivovaný napríklad informáciou o gradiente.

S využitím tejto metódy sa nám však nepodarilo dostať dostatočne blízko k optimu. Veľkou zložkou nákladov je totiž cena samotného zdroja. Tá sa ale vynuluje až v momente,

pokiaľ sa neuvažuje využitie tohto zdroja ani v jeden deň, prípadne hodinu. Je preto veľmi málo pravdepodobné, aby táto metóda našla riešenie, kde by náhodne vybrala hodnotu v okolí nuly pre každý jeden časový interval v priebehu roka, ako môžeme vidieť na obrázku Obr.4.1, kde jednotlivé farebne rozlíšené symboly reprezentujú výkony rozličných zdrojov.



Obr. 4.1: Výsledky metódy náhodného vyhľadávania.

4.3.2. Gradientná metóda

Gradient funkcie je vektor tvorený prvými parciálnymi deriváciami tejto funkcie a značí sa symbolom ∇ . Matematický zápis gradientu vyzerá nasledovne [17]:

$$\nabla = \left(\vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad (4.8)$$

a gradient konkrétnej funkcie f nasledovne [17]:

$$\nabla f = \left(\vec{i} \frac{\partial f}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial f}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial f}{\partial z} \right). \quad (4.9)$$

Gradientná metóda alebo inak nazývaná metóda spádu (*gradient descent*) je jednou z najstarších optimalizačných metód. Jedná sa o iteračnú procedúru, ktorej algoritmus je možné zapísať ako [1]:

1. Zvolíme počiatočný bod x_0 a dĺžku kroku η .
2. Vypočítame gradient funkcie f v k -tej iterácii:

$$\nabla f = \frac{\partial f}{\partial x_k}. \quad (4.10)$$

3. Spočítame hodnotu x_{k+1} :

$$x_{k+1} = x_k - \eta \nabla x_k. \quad (4.11)$$

4. Pokiaľ nie je splnené kritérium zastavenia navýšime index k a pokračujeme krokom 2,

kde η môže byť fixná alebo meniac sa v priebehu výpočtu. Dĺžka kroku má totiž veľký vplyv na presnosť ale aj na efektívnosť, či časovú nenáročnosť algoritmu. Výstupné údaje pochopiteľne závisia od vstupných a vzhľadom k prehľadávanému priestoru sa často stane, že má metóda tendenciu dostať sa k lokálnemu optimu, namiesto toho globálneho. Preto je niekedy potrebné a výhodné spustiť celú procedúru viac krát s rôznymi štartovacími bodmi [1].

5. Implementácia v programe Matlab

5.1. Matematický model straty tepla

V prvom rade je potrebné zostrojiť matematický model prechodu tepla cez rovinnú stenu (2.11), straty tepla vetraním (2.14) a tepelných ziskov od slnka (2.16). Postup zostavovania modelu bol nasledovný:

- Ako prvé je potrebné do modelu dostať vstupné dáta. Jedná sa najmä o údaje o počasí pre každú hodinu v roku [14]. Z nich najpodstatnejšia je teplota exteriéru, ktorá slúži k výpočtu rozdielu teplôt ($t_i - t_e$), ktorý potrebujeme dosadiť do rovníc (2.11) a (2.14). Závisí však aj od časti dňa a preto je potrebné určiť kedy je deň a kedy noc.
- Ďalej je potrebné pomocou interpolácie, či extrapolácie určiť hodnotu odporu pri prechode tepla na vonkajšej strane steny v závislosti od rýchlosti vetru [5].
- Po zadefinovaní rozmerov domu vrátane plochy okien je možné určiť tepelné zisky. Potrebujeme len zadefinovať všetky parametre vstupujúce do rovnice (2.16).
- Pre výpočet tepelného odporu zloženej steny potrebujeme zadefinovať údaje o hrúbke konštrukcii jednotlivých vrstiev d_i a súčiniteloch tepelnej vodivosti λ_i z tabuľky Tab 3.1, ktoré dosadíme do rovnice (2.7).
- Z už vypočítaných údajov je teraz možné zistiť hodnotu súčiniteľa prechodu tepla cez rovinnú stenu k , ktorý ale bude každú hodinu mierne odlišný pretože sa bude meniť rýchlosť vetru. Tepelná strata prechodom cez stenu sa teda bude rovnať súčinu rozdielu teplôt, súčiniteľa prechodu tepla a plochy obálky budovy. Teplo sa ale výrazne stráca prechodom cez okná tak sa strata rovná podobne súčinu rozdielu teplôt, súčiniteľa prechodu tepla cez okná a plochy okien. Súčet týchto hodnôt udáva celkovú stratu tepla prechodom cez stenu.
- Stratu tepla vetraním vypočítame z rovnice (2.14) v ktorej sú už známe všetky premenné a celková strata tepla \dot{Q}_P sa teda bude rovnať súčtu straty prechodom cez stenu a straty vetraním od ktorého odčítame tepelné zisky zo slnečného žiarenia.

Výstupným údajom tohto modelu je vektor \vec{Q}_P . Tento vektor je potrebné nahradiť štyrmi vektormi $\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}, \vec{w}$, ktorých súčet po zložkách sa musí rovnať zložkám \vec{Q}_P . Tieto vektory reprezentujú výkon jednotlivých zdrojov tepla v každú časovú jednotku. Z dôvodu zrýchlenia algoritmu sme sa rozhodli zpriemerovať údaje o strate tepla za 24 hodín. Máme teda údaj o priemernej strate tepla každý deň v roku. Ďalej je potrebné do programu vložiť údaje o samotných zdrojoch ako ich cena, či výkony.

5.2. Implementácia optimalizačného algoritmu

Optimalizačný algoritmus sme vytvorili z kombinácie metód *Random Search* a *Stochastic gradient descent*. Algoritmus pomocou pseudokódu by vypadal nasledovne:

5.2. IMPLEMENTÁCIA OPTIMALIZAČNÉHO ALGORITMU

- zdefinujeme si pomocné premenné A_m, B_m, C_m, D_m , ktoré budú určovať, na koľko percent jednotlivé zdroje vykurojú, prípadne chladia. Budú sa meniť v každej z m iterácií ale potrebujeme poznať ich počiatočnú hodnotu a tak zvolíme, že:

$$A_1 = B_1 = C_1 = D_1 = 0, 1. \quad (5.1)$$

- **Pre** m od 2 po počet iterácií, konkrétna hodnota by mala byť dostatočne veľká na vyhotovenie presných výsledkov a zároveň malá z dôvodu časovej efektívnosti (v tomto algoritme je použitá hodnota 500):

– Vypočítame cenu v $(m - 1)$ -ej iterácii. (4.4). Cenu a Minimum v prvej iterácii zvolíme tak aby bola splnená nasledujúca podmienka:

– **Pokiaľ** Cena je menšia ako Minimum:

- * Stanovíme hodnotu aktuálnej ceny za Minimum.
- * ku každej z pomocných premenných pripočítame náhodnú hodnotu $R_{m,A}, R_{m,B}, R_{m,C}, R_{m,D}$ z intervalu $(-1;1)$, ktorý sa so zvyšujúcim počtom iterácií zmešuje k nule.

$$A_m = \min(\max(A_{m-1} + R_{m,A}; 0); 1) \quad (5.2)$$

$$B_m = \min(\max(B_{m-1} + R_{m,B}; 0); 1) \quad (5.3)$$

$$C_m = \min(\max(C_{m-1} + R_{m,C}; 0); 1) \quad (5.4)$$

$$D_m = \min(\max(D_{m-1} + R_{m,D}; 0); 1), \quad (5.5)$$

kde minimum a maximum zabezpečí aby každá z týchto premenných spadala do intervalu $(0;1)$.

– **Inak**

- * Vrátime všetkým pomocným premenným hodnotu z pred dvoch iterácií, ktoré zatiaľ dosiahli najnižšiu hodnotu ceny, či minima:

$$A_m = A_{m-2} \quad (5.6)$$

$$B_m = B_{m-2} \quad (5.7)$$

$$C_m = C_{m-2} \quad (5.8)$$

$$D_m = D_{m-2} \quad (5.9)$$

– **Koniec podmienky**

– **Pre** i od 1 po 365

- * prepočítame pomocné premenné na reálny výkon a to tak, že ich vynásobíme maximálnym výkonom jednotlivých zdrojov:

$$x_i = A_m \cdot X_{max} \quad (5.10)$$

$$y_i = B_m \cdot Y_{max} \quad (5.11)$$

$$z_i = C_m \cdot Z_{max} \quad (5.12)$$

$$w_i = D_m \cdot W_{max} \quad (5.13)$$

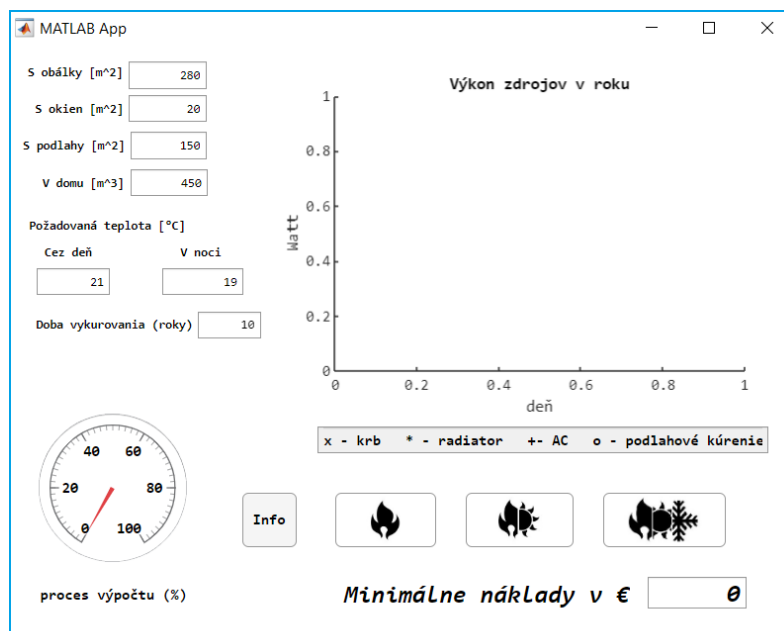
5.3. APLIKÁCIA V PROGRAME MATLAB APPDESIGNER

- * tu ale nastane problém, pretože $x_i + y_1 + z_1 + w_i \neq Q_{P_i}$.
- **Pre** k od 1 po 1000
 - * **Pokiaľ** je súčet výkonov väčší ako Q_{P_i}
 - vygenerujeme náhodné číslo R_k rádovo v jednotkách.
 - odčítame R_k od všetkých výkonov.
 - * **Inak**
 - vygenerujeme náhodné číslo R_k rádovo v jednotkách.
 - pričítame R_k ku všetkým výkonom.
 - * **Koniec podmienky**
- **Koniec cyklu**(k)
- **Koniec cyklu**(i)
- **Koniec cyklu**(m)

Algoritmus vytvorí bod v štvordimenzionálnom priestore a pohybuje s ním v smere vektora. V prípade, že nová pozícia sa priblížila k minimu stanoví túto pozíciu ako východiskovú pri ďalšej iterácii, a ak nie tak ju vráti na predchádzajúce miesto a skúsi bod pohnúť iným smerom. Dĺžka posunutia sa ale musí postupne znižovať aby pri nájdení okolia optima bod už toto okolie neopustil.

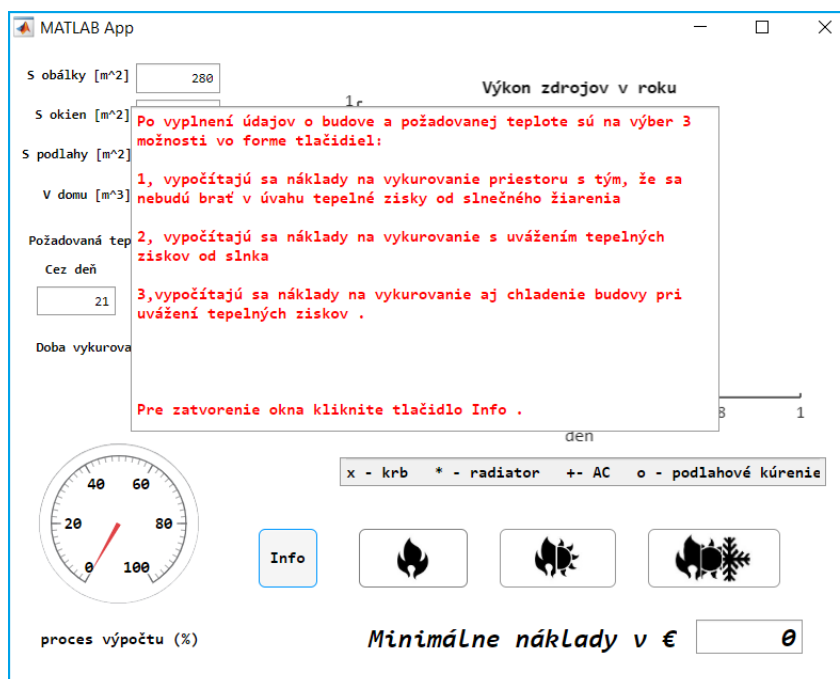
5.3. Aplikácia v programe Matlab Appdesigner

Pre ukážku väčšieho množstva výsledkov vo forme novej zmeny budovy, či teploty, na ktorú má byť budova vyhriata bola vytvorená aplikácia.



Obr. 5.1: Aplikácia pri spustení

Na obrázku Obr.5.1 môžeme vidieť, ako vypadá aplikácia po spustení. V ľavom hornom rohu sa nachádzajú už predvyplnené údaje o vzorovej budove, ktorú sme opisovali v kapitole 3. V ľavom dolnom rohu zase ukazovateľ, značiaci percentuálne, aká časť iterácií už prebehla. Ďalej sa v aplikácii nachádzajú osy x a y , kde na ypsilonovej osi budú farebne aj znakovito rozlíšené jednotlivé výkony zdrojov v každý deň roku (os x). Minimálne náklady na vykurovanie, či chladenie sa vypočítajú a zobrazia po stlačení jedného z troch tlačidiel rozoznanými rôznymi ikonami [21]. Pre prípad, že sa aplikácia používa po prvýkrát alebo nie je jasné načo tlačidlá slúžia je v aplikácii implementované tlačidlo „Info“. Po jeho kliknutí sa zobrazí okno s nápovedou a po opakovanom stlačení sa zatvorí ako môžeme vidieť na obrázku Obr 5.2.



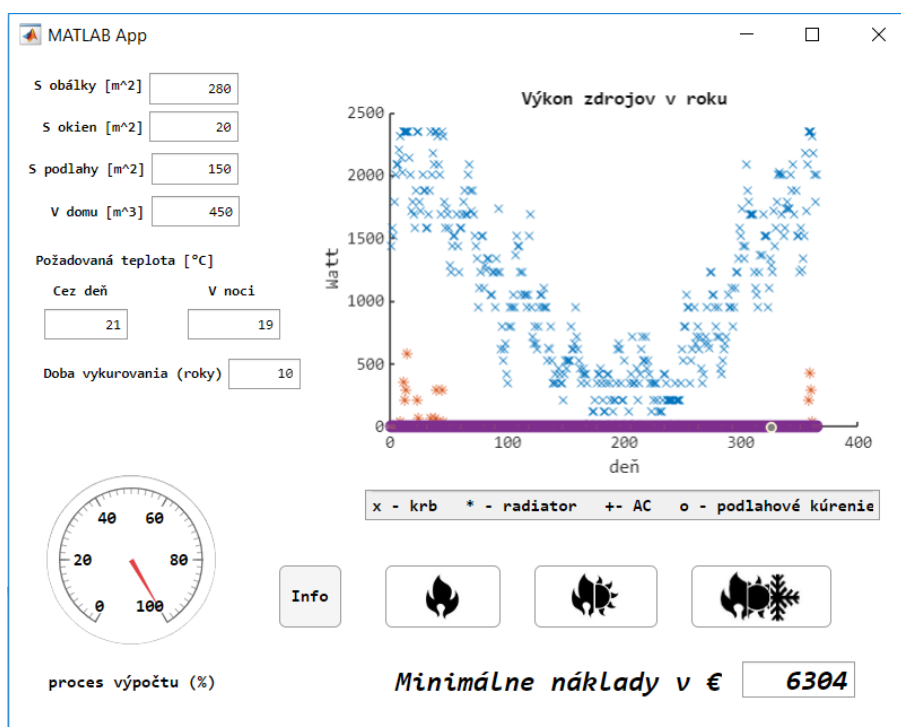
Obr. 5.2: Tlačidlo Info

Na výber je teda možnosť vykurovať budovu s neuvážení alebo uvážení tepelných ziskov od slnka. Rozdiel bude v tom, že sa mierne zníži tepelná strata budovy a tým pádom aj náklady na vykurovanie. Tretia možnosť spočíta náklady tak na vykurovanie ako aj chladenie budovy ale počíta s tepelnými ziskami od slnka. Bez uváženia týchto ziskov je totiž tepelný tok príliš malý na to aby bolo potrebné chladiť. V prípade, že užívateľ zadá do aplikácie vstupné údaje, ktoré v modeli zistia väčšiu tepelnú stratu než dokážu zdroje vykryť, sa zobrazí okno o prekročenom maximálnom výkone a požiada užívateľa o prekontrolovanie vstupných údajov.

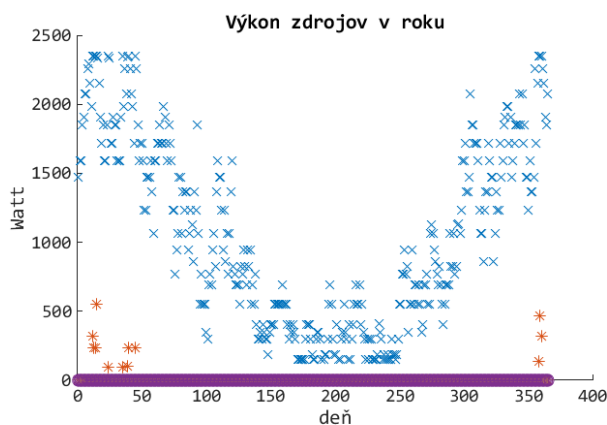
5.4. Výsledky

Do aplikácie je možné vložiť veľa rôznych vstupných údajov. Z tohto dôvodu zobrazíme len výsledky vzorovej budovy a pár ďalších príkladov. Všetky však počítajú so zložením steny z tabuľky Tab 3.1. Z obrázkov Obr. 5.3, Obr. 5.4 a Obr. 5.5 môžeme pozorovať, že rozdiel medzi vykurovaním s a bez uváženia tepelných ziskov nie je taký veľký. Cenovo je rozdiel

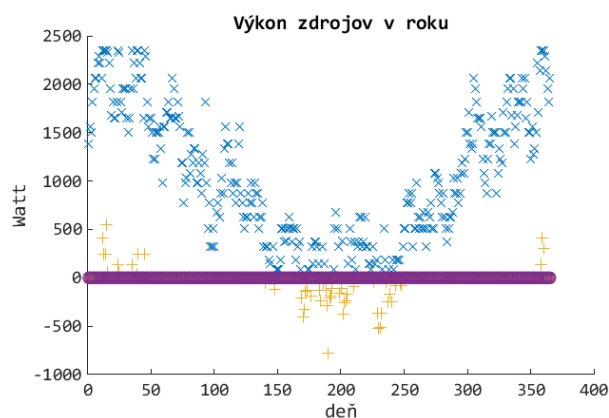
v pár stovkách eur. Ak by sme však zobrali v úvahu že žaluzie, ktoré bránia tepelným ziskom sa samozrejme dajú natáčať a vyťahovať tak by budova mala výrazne väčšie zisky. Nebolo by to však výhodné pri chladení, kde by pochopiteľne bolo potrebné oveľa viac klimatizovať. Zaujímavé je však, že je výhodnejšie si ku klimatizácii zaobstarať aj krb a aj so samotnou cenou zdroja budú náklady nižšie ako pri vykurovaní klimatizáciou. Aplikácia vyhodnotila využitie klimatizácie na vykurovanie a chladenie len pri počítaní na jeden rok. Treba však poukázať na to, že sa podarilo dokázať, že využitie viacerých zdrojov a to krbu s radiátorom môže byť výhodnejšie ako využitie jedného výkonnejšieho zdroju.



Obr. 5.3: Vykurovanie vzorovej budovy



Obr.5.4: Vykurovanie so ziskami

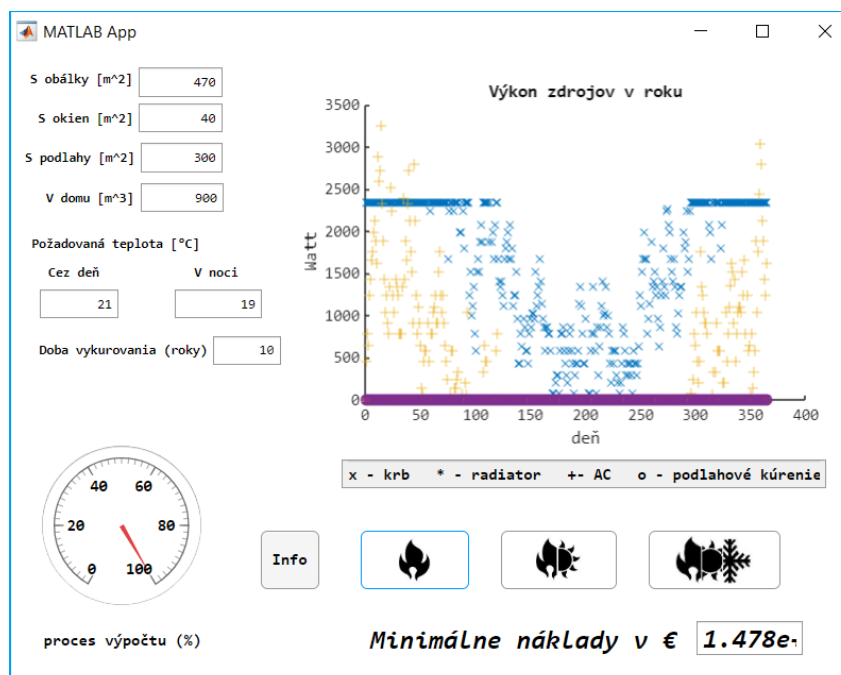


Obr.5.5: Vykurovanie a chladenie

Proces	Krb	Rad.	AC	V.R.	Náklady [euro]
Vykurovanie	●	●			6304
Vykurovanie so ziskami	●	●			6140
Vykurovanie a chladenie	●		●		7407

Tabuľka 5.1: Výsledky vzorovej budovy.

V tabuľke Tab 5.1 môžeme vidieť ktoré zo zdrojov sú potrebné pri jednotlivých možnostiach výhrevu či chladenia budovy. Výsledné náklady sú približné a pri každom spustení aplikácie sa môžu odlišovať o niekoľko desiatok eur. Podobnú tabuľku si zobrazíme aj pre niekoľko ďalších budov.

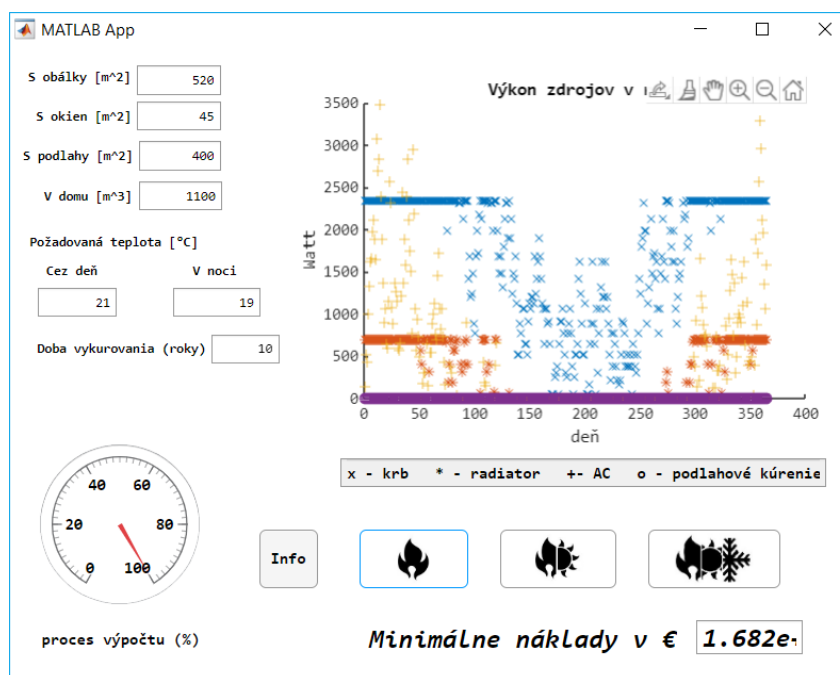


Obr. 5.7: Vykurovanie budovy B2

Proces	Krb	Rad.	AC	V.R.	Náklady [euro]
Vykurovanie	●		●		14780
Vykurovanie so ziskami	●		●		14208
Vykurovanie a chladenie	●		●		14321

Tabuľka 5.2: Výsledky budovy B2

Z tabuľky Tab 5.4 je možné získať zaujímavú informáciu o tom, že vykurovanie bez uvažovania tepelných ziskov by vyšlo ešte drahšie ako vykurovanie a chladenie dokopy s uvažovaním tepelných ziskov. Jedná sa teda o budovu, kde sa chladenie oplatí uvažovať, pretože klimatizácia by sa využila aj pri výhreve.



Obr. 5.8: Vykurovanie budovy B3

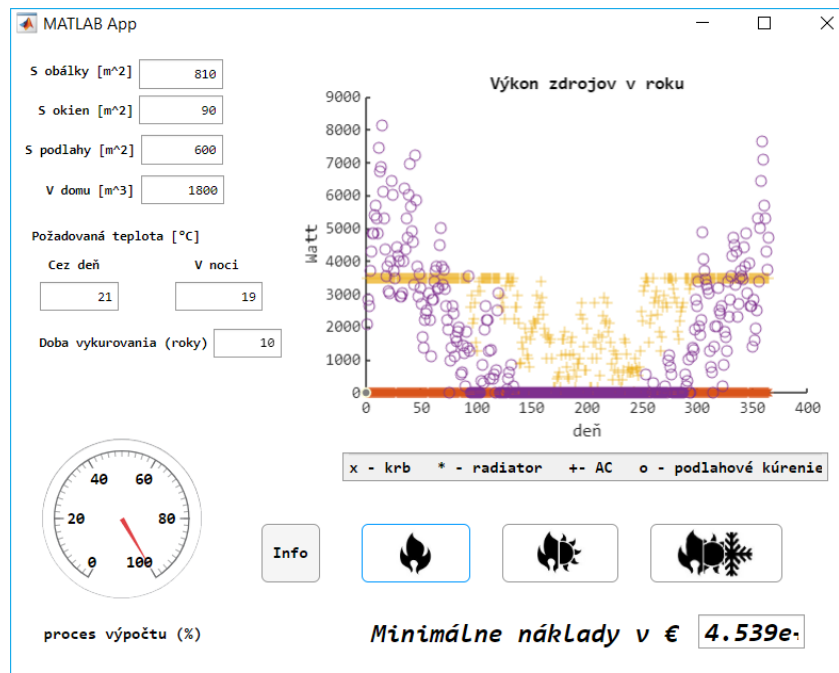
Proces	Krb	Rad.	AC	V.R.	Náklady [euro]
Vykurovanie	•	•	•		16823
Vykurovanie so ziskami	•	•	•		16299
Vykurovanie a chladenie	•	•	•		16338

Tabuľka 5.3: Výsledky budovy B3

V prípade budovy B3 môžeme vidieť, že je výhodnejšie použiť tri zdroje tepla ako samotné podlahové kúrenie. V tomto prípade je ale treba podotknúť, že cena ale aj výkon rastie s plochou na ktorej je vykurovacia rohož implementovaná a cena vykurovania v prípade použitia čisto vykurovacej rohože by bola vyššia len o pár stoviek euro. V prípade, že by sa vykurovacia rohož rozmiestnila len na určitú plochu, tak by mohla dospieť k lepším výsledkom. Ešte ak by sme uvažovali, že pri výhreve podlahovým kúrením môže byť teplota nastavená o stupeň nižšie z dôvodu vyššej pocitovej teploty.

Proces	Krb	Rad.	AC	V.R.	Náklady [euro]
Vykurovanie			•	•	45417
Vykurovanie so ziskami			•	•	43472
Vykurovanie a chladenie			•	•	43148

Tabuľka 5.4: Výsledky budovy B4



Obr. 5.9: Vykurovanie budovy B4

Ukážka vykurovania veľkej budovy, kde maximálny výkon podlahového kúrenia rastie so zvyšujúcou sa plochou podlahy.

5.5. Návrhy na vylepšenie

Aby sa aplikácia mohla používať v praxi, bolo by potrebné zaviesť pár možných vylepšení:

- Spresnenie modelu vo forme prípadnej voľby zloženia steny a tieniacich faktorov na oknách.
- K tepelným ziskom uvažovať aj priemerné zastúpenie počtu ľudí v budove, či elektrické spotrebiče.
- Uvažovanie vnútorných stien, či poschodí z dôvodu akumulácie tepla.
- Možnosť voľby spotrebičov a ich vlastností užívateľom.
- Zvýšenie počtu zdrojov uvažovaných do optimalizácie
- Možnosť určenia plochy na implementáciu podlahového kúrenia.
- Využiť ďalšie metódy heuristickej optimalizácie ako genetický algoritmus či metóda simulovaného žihania.
- Zvýšiť efektivitu a následne spočítať straty po hodinách, nie po dňoch.

6. Záver

Za predpokladu, že matematický model poskytol dostatočne reálne výsledky ohľadom tepelných strát, či ziskoch sa nám podarilo dosiahnuť požadovaného cieľa. Kombinácia viacerých zdrojov tepla totiž poskytla výhodnejší scenár udržovania teploty interiéru na požadovanej hodnote.

Je ale potrebné konštatovať, že výber zdrojov tepla bol obmedzený a pre niektorých ľudí možno nevyhovujúci. V budúcnosti však budú tieto zdroje účinnejšie, praktickejšie a ich výber bude snáď ešte väčší ako doteraz. Dôležitým faktorom je ale aj záruka, či výdrž daných zdrojov. Taktiež ceny energií sa pohybujú každým dňom a je preto možné, že v blízkej dobe by najvýhodejší scenár výhrevu, či chladenia budovy bol výrazne odlišný.

Už v súčasnosti ale máme na výber z viacerých alternatív šetrenia energie, prípadne lepšieho využitia slnečného žiarenia. Solárne panely sú v dnešnej dobe výrazne populárne a tak by sa mohlo počítať so šetrením nákladov týmto spôsobom. Taktiež materiál strechy výrazne ovplyvňuje tok tepla a v niektorých nízkoenergetických domoch sa teplo akumulované v streche využíva k predhrievaniu úžitkovej vody. V posledných rokoch sa do popredia dostávajú aj podzemné tepelné výmenníky, ktoré ale vyžadujú priestor na vloženie sústavy rúr do zemin, či tepelné čerpadlá.

Spôsobov, ktorými je možné znížiť náklady je kvantum, ale veľký vplyv na náklady má samotná budova, pre ktorú sa náklady počítajú. Žijeme v dobe, kedy sa takmer všetko dá ovládať smartphonom a to vrátane niektorých funkcií v domacnosti. Inteligentné domy by totiž dokázali v prípade riadenia tieniacich prvkov v interiéri, či exteriéri výrazne lepšie využívať tepelné zisky a zároveň im zabráňovať v prípade horúcich dní. Reálna strata tepla je preto veľmi odlišná pre všetky typy budov, ale aj pre zemepisné šírky, v ktorých sa budovy nachádzajú.

V aplikácii by sa preto mohla nachádzať aj možnosť nahráť meteorologické údaje z najbližšej stanice, či údaj o nadmorskej výške, v ktorej sa budova nachádza. Možnosť vylepšenia aplikácie je tak aj popri už spomenutých návrhoch stále dost. Či už v prípade matematického modelu, kde by sa pri efektívnejšom výpočte mohlo podať približne rovnakú rýchlosť výpočtu, ako pri počítaní na dni, alebo v prípade samotnej optimalizácie. Gradientná metóda ma niekedy problém dostať sa z lokálneho optima a tak by mohlo byť efektívnejšie použitie zložitejších heuristických či metaheuristických metód.

Optimalizáciou sme ale dokázali, že pri minimalizácii nákladov výrazne záleží na cene energie, ktorou je zdroj tepla poháňaný. Algoritmus sa totiž vždy po preskúšaní viacerých začiatkových bodov, čo si niekedy gradientná metóda vyžaduje, snažil využívať naplno krb. Pri vzorovej budove ale bol jeho uvažovaný maximálny výkon nedostačujúci a tak ho bolo potrebné doplniť radiatorom. Aj keď bol radiator využívaný len čiastočne, tak náklady boli nižšie ako pri využití len jedného z výkonnejších zdrojov. Algoritmus teda poskytol dobrý základ pre riešenie komplexnejších a viacdimenzionálnych úloh s užívateľsky priateľnejším prostredím .

Literatúra

- [1] BALDI, Pierre a Søren BRUNAK. Bioinformatics: The Machine Learning Approach. 2. Massachusetts: The MIT Press, 2001. ISBN -0-262-02506-X.
- [2] BELTON, V. a Theodor J. STEWART.: *Multiple criteria decision analysis: an integrated approach*. Boston: Kluwer, 2002. ISBN 079237505X.
- [3] BERGMAN, T. L., Adrienne S. LAVINE, Frank P. INCROPERA a David P. DEWITT.: *Incropera's principles of heat and mass transfer. Global edition*. Hoboken: Wiley, 2018. ISBN 978-1-119-38291-1.
- [4] BERGSTRA, James a Yoshua BENGIO, BOTTOU, Leon, ed.: *Random Search for Hyper-Parameter Optimization*. Montreal, 2012. Universite de Montreal.
- [5] ČSN EN 12831-1. Energetická náročnost budov-Výpočet tepelného výkonu: Část 1: Tepelný výkon pro vytápění , Modul M3-3. Praha: úřad pro technickou normalizaci metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [6] ČSN 73 0542 . Způsob stanovení energetické bilance zasklených ploch obvodového pláště budov. Praha: úřad pro technickou normalizaci metrologii a státní zkušebnictví, 1995.
- [7] ČSN 73 0548. Výpočet tepelné zátěže klimatizovaných prostorů. Praha: úřad pro technickou normalizaci metrologii a státní zkušebnictví, 1986.
- [8] DAHLSVEEN, Trond and PETRÁŠ, Dušan.: *Energetický audit budov..* Bratislava: Jaga, 1996. ISBN 80-967095-9-3.
- [9] GRUNER, Klaus-Dieter.: *Principles of Non-Contact Temperature Measurement* [online]. In: Berlin, 2003, s. 32 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: http://support.fluke.com/raytek-sales/Download/Asset/IR_THEORY_55514_ENG_REVB_LR.PDF
- [10] ISHIZAKA, Alessio a Philippe NEMERY.: *Multi-criteria decision analysis: methods and software*. Chichester: John Wiley, 2013. ISBN 978-1-119-97407-9.
- [11] KABÁT, Ernest.: *Termomechanika: Termokinetika..* Bratislava: Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1984. ISBN 63-820-84.
- [12] KNOR, Martin.: *Lineárna a nelineárna optimalizácia*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave v Nakladateľstve STU, 2009, 99 s. 5430. ISBN 978-80-227-3102-7.
- [13] KOVAŘÍK, Petr.: *Sdílení tepla* [online]. In: . [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/kovarikip/TM/cviceni/sdileni.pdf>
- [14] METEOTEST. *Meteonorm. 7.3*. Bern, 2020.
- [15] NICOSIA, Giuseppe, Panos PARDALOS, Renato UMETON, Giovanni GIUFFRIDA a Vincenzo SCIACCA. *Machine Learning, Optimization, and Data Science*. Siena: Springer Nature Switzerland, 2019. ISBN-978-3-030-37598-0.

- [16] OSMAN, Ibrahim H. a Gilbert LAPORTE.: *Metaheuristics: A Bibliography*. Amsterdam: Baltzer Science Publications, 1996. ISBN 63(5):513-628.
- [17] RAM, Babu.: *Engineering Mathematics*. New Delhi: Dorling Kindersley, 2010. ISBN 978-81-317-2691-4.
- [18] WITTLINGER, Viktor.: *Minilexikón tepla..* Bratislava: Alfa, 1992. ISBN 80-05-00995-x.
- [19] ZABINSKY, Zelda B.: *Random Search Algorithms* [online]. Seattle, 2009 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <http://courses.washington.edu/inde510/516/AdapRandomSearch4.05.2009.pdf>. University of Washington.
- [20] *Ekonomika dreva* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://klasici.sk/node/406>
- [21] Vecteezy [online]. [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.vecteezy.com/vector-art/120200-heater-and-heat-icon-vector>
- [22] [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://www.lg.com/sk/klimatizacie-pre-obytne-budovy/lg-DC24RQ>
- [23] [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://www.ecoprodukt.sk/vykurovanie.a.ohrev/vykurovacie.rohoze/vykurovacie.rohoze.lpsv.80w.m2/vykurovacia.rohoz.28m.lpsv.80.28?gclid=CjwKCAjwvZv0BRA8EiwAD9T2VfHNmeKQDVGNVzn-xFNbRLsMytsCqtIxjBQFFQj4afgbGKuZhxX_tRBoCX-YQAvD_BwE
- [24] [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://designove-radiatory.cz/produkt/isan-quadrat-elektro/>
- [25] [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <http://www.hausbaudirekt.de/sk/haus/elk-bungalov-125-bauhausstil/>
- [26] [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://kachle.heureka.sk/romotop-laredo-03/#specifikacia>

7. Zoznam použitých skratiek a symbolov

a - súčiniteľ teplotnej vodivosti [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

c_m - činiteľ využitia slnečného žiarenia [-]

c_n - parameter korigujúci uhol dopadu slnečných paprskov [-]

$c_{p,a}$ - merná tepelná kapacita vzduchu [$\text{Wh}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]

d_i - rozmer/hrúbka vrstvy konštrukcie [m]

h - výška miestnosti [m]

k - súčiniteľ prechodu tepla cez rovinnú stenu [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

P - priepustnosť okna [-]

P_1 - priepustnosť slnečného žiarenia cez zasklenie z číreho skla [-]

P_2 - parameter počítajúci so znečistením zasklenia [-]

P_3 - hodnoty tieniacich činiteľov [-]

\dot{q} - merný tepelný tok [W/m^2]

\dot{q}_g - globálne slnečné žiarenie [W/m^2]

q_v - teplo vyvinuté v jednotke objemu telesa za jednotku času [W/m^3]

\dot{Q} - tepelný tok [W]

\dot{Q}_C - celková tepelná strata [W]

\dot{Q}_P - celkový tepelný tok, ktorý je potrebné dodať [W]

\dot{Q}_s - tepelná strata prechodom cez stenu [W]

\dot{Q}_V - tepelná strata vetraním [W]

\dot{Q}_Z - tepelný zisk od slnečného žiarenia [W]

R - tepelný odpor [K/W]

S - povrch steny [m^2]

S_{po} - plochu priesvitnej časti okna [m^2]

t_e - teplota exteriéru [$^{\circ}\text{C}$]

t_i - teplota interiéru [$^{\circ}\text{C}$]

$t_{i,d}$ - denná teplota interiéru [$^{\circ}\text{C}$]

$t_{i,n}$ - nočná teplota interiéru [$^{\circ}\text{C}$]

T - absolútna teplota [K]

V - objem *funkčnej časti budovy* [m^3]

α - súčiniteľ prestupu tepla [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]

ε - emisivita povrchu telesa [-]

η - intenzita vetrania budovy [h^{-1}]

η_{min} - minimálna intenzita vetrania budovy [h^{-1}]

λ - súčiniteľ tepelnej vodivosti látky [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]

ρ - hustota [kg/m^3]

ρ_a - hustota vzduchu [kg/m^3]

σ - Stefanova-Boltzmannova konštanta [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$]

τ - čas [s]

8. Zoznam príloh

Príloha A -softwarová Aplikácia „modelApp.mlappinstall”