

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Rimbala** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **420053**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Analýza přesnosti různých výpočtových metod potřeby energie na vytápění v systémech s tepelnými čerpadly

Název diplomové práce anglicky:

Analysis of the accuracy of different calculation methods of energy demand for heating in systems with heat pumps

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou vytápění pomocí tepelných čerpadel
2. Často užívané systémy popište rovnicemi
3. Ve vhodném programovacím prostředí vytvořte kód pro výpočet potřeby energie na vytápění
4. Analyzujte chybu způsobenou použitím průměrných (denních, měsíčních, přes topnou sezónu) teplot namísto časových průběhů

Seznam doporučené literatury:

- [1] www.tzb-info.cz
- [2] Stephen Wolfram: The Mathematica Book, Cambridge University Press, 1999

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Jan Kyncl, katedra elektroenergetiky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **19.02.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**

doc. Dr. Ing. Jan Kyncl
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

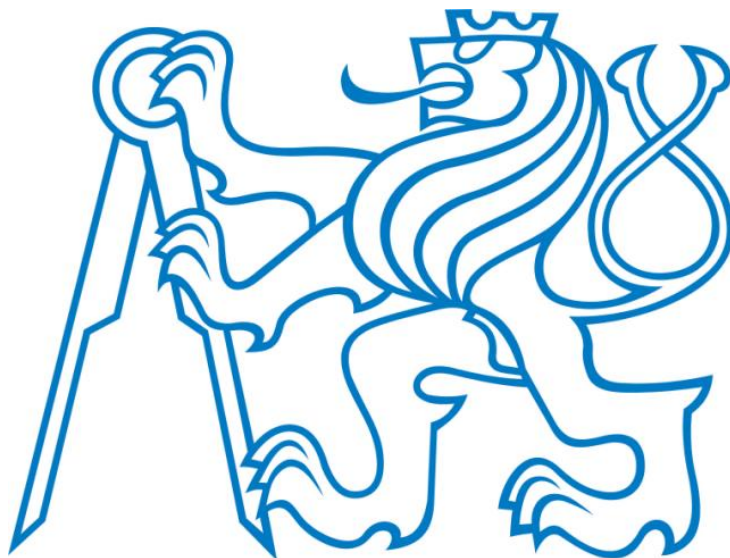
České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky

Analýza přesnosti různých výpočtových
metod potřeby energie na vytápění
v systémech s tepelnými čerpadly

Diplomová práce



Vypracoval: Jan Rimbala

Vedoucí práce: Doc. Dr. Ing. Jan Kyncl

Anotace:

V diplomové práci je uveden přehled dvou hlavních metod výpočtu tepelných ztrát, popis funkce tepelných čerpadel a používaných monovalentních a bivalentních způsobů vytápění.

Dále je na modelovém objektu analyzována problematika možnosti použití statických modelů tepelných ztrát pro výpočty dynamických stavů, vyčíslena chyba použití průměrných denních a měsíčních teplot pro výpočet potřebné energie pro ohřev teplé vody a vytápění objektů pomocí tepelných čerpadel.

Klíčová slova:

tepelná čerpadla, vytápění budov, reálná data o počasí, topný faktor (COP)

Annotation:

The diploma thesis presents an overview of two main methods of calculating heat losses, a description of the function of the heat pumps and the monovalent and bivalent heating methods used. In addition, the problem of the use of static heat loss models for dynamic state calculations is analyzed on the model object, the calculation of the error caused by the usage of average daily and monthly temperatures for calculation of the required energy for hot water heating and the heating of buildings by means of heat pumps is evaluated.

Keywords:

heat pump, heating of building, real weather data, coefficient of performance (COP)

Bibliografická citace:

RIMBALA, J. Analýza přesnosti různých výpočtových metod potřeby energie na vytápění v systémech s tepelnými čerpadly. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2018.85 s. Vedoucí diplomové práce doc. Dr. Ing. Jan Kyncl.

Poděkování

Za odbornou pomoc při zpracování předkládané práce chci na tomto místě poděkovat
Doc. Dr. Ing. Janu Kynclovi.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, dne 24.5. 2018

Jan Rimbala

OBSAH

1. Úvod	9
2. Tepelná čerpadla.....	12
2.1 Popis fungování.....	12
2.2 Význam topného faktoru.....	13
2.3 Základní rozdělení tepelných čerpadel.....	15
2.4 Popis tepelného čerpadla vzduch - voda.....	16
2.5 Způsoby provozu tepelných čerpadel.....	17
2.6 Tepelné ztráty budov, jejich význam a výpočet podle norem	17
2.7 Celkové tepelné ztráty a druhy tepelných ztrát	18
2.7.1 Celkové tepelné ztráty	18
2.7.2 Ztráty prostupem	18
2.7.3 Ztráty větráním	18
Přirozené větrání	19
Nucené větrání.....	19
2.7.4 Tepelně technické veličiny.....	19
2.8 Výpočet tepelných ztrát podle normy ČSN 06 0210.....	22
2.8.1 Výpočet celkových ztrát.....	22
Výpočet tepelných ztrát prostupem Q_p	22
Přirážky k základní tepelné ztrátě	23
Výpočet tepelných ztrát větráním Q_v	24
2.9 Výpočet tepelných ztrát podle normy ČSN EN 12831	25
2.9.1 Celková návrhová tepelná ztráta vytápěného prostoru	25
Návrhová tepelná ztráta prostupem tepla vytápěného prostoru	25
Součinitel tepelné ztráty prostupem z vytápěného prostoru do venkovního prostředí pláštěm budovy	26
Součinitel tepelné ztráty prostupem z vytápěného prostoru do nevytápěného prostoru	27
Součinitel tepelné ztráty prostupem z vytápěného prostoru do zeminy	28
Součinitel tepelné ztráty prostupem z vytápěného prostoru do sousedního prostoru vytápěného na jinou teplotu	29
Návrhová tepelná ztráta větráním.....	29
Přirozené větrání	30
Nucené větrání.....	31
Tepelný zátopový výkon	32
Návrhový tepelný výkon.....	32

3. Příprava teplé vody	33
4. Problematika potřebného topného výkonu v čase	41
4.1 Problematika průchodu tepla zdí	42
5. Případová studie výpočtu bilančních energií bivalentního systému s reálným tepelným čerpadlem	54
5.1 Vyhodnocení práce reálného tepelného čerpadla pro jednu topnou sezonu v lokalitě Brno 60	
6. Závěr	64
Seznam použité literatury	65

1. Úvod

Téma diplomové práce jsem si vybral, protože jsem se problematikou použití tepelných čerpadel zabýval v bakalářské práci, kde jsem analyzoval provoz otopného systému pomocí zjednodušených modelů vycházejících zejména z přednášek předmětu Elektrotepelná technika. Tyto modely obsahovaly určitá zjednodušení a tak jsme se s vedoucím práce dohodli, že bude zajímavé právě ona použitá zjednodušení analyzovat a pokud možno kvantifikovat chyby jimi způsobené.

Za hlavní zjednodušení způsobující chybu určení potřebných energií jsme považovali použití průměrných denních teplot a neuvažování kolísání teploty okolního vzduchu. Z tohoto důvodu jsme se zaměřili výhradně na tepelná čerpadla vzduch – voda: kolísání teploty zdrojů tepla u ostatních systémů je zanedbatelné a navíc (na rozdíl od dat o teplotě vzduchu v ČR) obtížně dostupné. Ostatně tepelná čerpadla vzduch – voda jsou v současnosti osazována nejčastěji.

Při zpracování diplomové práce se ukázalo, že problém je komplexnější, než se zpočátku zdálo a je třeba analyzovat další jevy, zejména časovou závislost potřebného topného výkonu čase. Obvykle používaný model je vlastně statické řešení ustálených stavů (výkon pokrývající tepelnou ztrátu větráním a průchod tepla pevnými částmi konstrukce). Zatímco výkon pro větrání sleduje časové změny teploty v podstatě okamžitě a výkon lehkými částmi konstrukce s malým zpožděním, tepelná ztráta dobře zaizolovanou zdí se chová jako integrační členek, tedy zmenšuje a zpožďuje kolísání výkonu oproti kolísání teploty okolního vzduchu. Bylo tedy třeba vytvořit dostatečně realistický (aby tyto jevy postihl) a dostatečně zjednodušený (aby byl v reálném čase sestavitelný a výpočty aby netrvaly příliš dlouho) model dynamického chování budovy v čase. Bez ověření, že je možné počítat potřebný výkon jako „statický model s uvažováním časově proměnlivé vnější teploty“, by všechny další výpočty musely obsahovat řešení Fourier-Kirchhoffovy rovnice průchodu tepla složenou stěnou a byly by podstatně výpočetně náročnější a navíc by poskytly obtížně zobecnitelné závěry. Naštěstí se ukázalo, že toto zjednodušení přináší jen malou nepřesnost nejvýše jednotek procent ve výkonech a do procenta v energiích při

uvažování simulovaných časových průběhů venkovní teploty a bylo tedy možné v reálném čase další simulace provést.

Téma práce se také na popud vedoucího rozrostlo o problematiku přípravy teplé vody pomocí tepelného čerpadla, kdy byla zkoumána chyba způsobená uvažováním střední teploty ohřívání vody a průměrnou teplotou okolního vzduchu. Výpočtem byly simulovány situace s fiktivním průběhem venkovních teplot a měřených teplot (teplota známá s krokem čtvrt hodiny v Brně). Ukázala se zajímavá možnost ušetřit elektrickou energii spínáním ohřevu ve vhodné části dne (kdy je teplota vzduchu nižší a tedy topný faktor vyšší a na zadané množství tepla převedeného do vody v ohřívacím zásobníku je tedy třeba méně elektrické energie).

Jelikož autor práce není tak programátorsky zdatný, aby implementoval použité metody do „rychlejších programovacích jazyků“ (což by bylo i neefektivní, na popud vedoucího byly v maximální míře využívány a upravovány existující kódy v SW Wolfram Mathematica a to jak ty, které autor vytvořil v bakalářské práci a zejména kódy z www.powerwiki.cz ze stránek předmětů „Inženýrské aplikace“ a „Elektrotepelná technika“), bylo často nutné používat rozličná zjednodušení. Například při uvažování roční spotřeby energie s použitím reálných dat o venkovní teplotě je výpočet několikanásobně delší, stejně tak jako použití interpolovaných charakteristik reálných tepelných čerpadel. Proto je často nejprve řešena situace v idealizovaných podmínkách (carnotské tepelné čerpadlo s konstantním příkonem pohonu, časový průběh teploty jako superpozice stejnosměrné složky a dvou sinusovek respektujících roční a denní chod teploty, případně normovaný roční průběh průměrných denních teplot v jednotlivých měsících se superponovanou sinusovkou simulující denní kolísání venkovní teploty a podobně) a teprve v idealizované situaci ověřený kód byl použit pro výpočet reálnějších situací (reálné teploty a idealizované tepelné čerpadlo, reálné tepelné čerpadlo a idealizované průběhy teplot a nakonec tam, kde se to podařilo, reálné tepelné čerpadlo a reálný průběh teplot.). Poznamenejme, že idealizované situace lépe postihují chování systému přes celou dobu životnosti, výpočet chování v některém z minulých let by mohl posloužit pro ověření modelů měření, pro to hlavní, tedy ekonomiku provozu je však jeden konkrétní rok statistický nevýznamný.

Při zapracování se tedy problematika tak rozvětvila, že se podařilo vytvořit kódy pro ověření několika málo konkrétních situací a oproti původnímu záměru vedoucí například nebyly provedeny simulace pro více konkrétních reálných tepelných čerpadel. Vytvořené kódy jsou však se znalostí SW Mathematica alespoň na úrovni látky předmětu „Matematické aplikace“ snadno použitelné pro jak další tepelná čerpadla, tak jiné dimenzování systému (průtok vody tepelným čerpadlem, teplotní spád na otopné soustavě atd.).

Podle sdělení vedoucího se jeho kolegové pokusí další výsledky získané s použitím vytvořených kódů využít v publikační činnosti.

2. Tepelná čerpadla

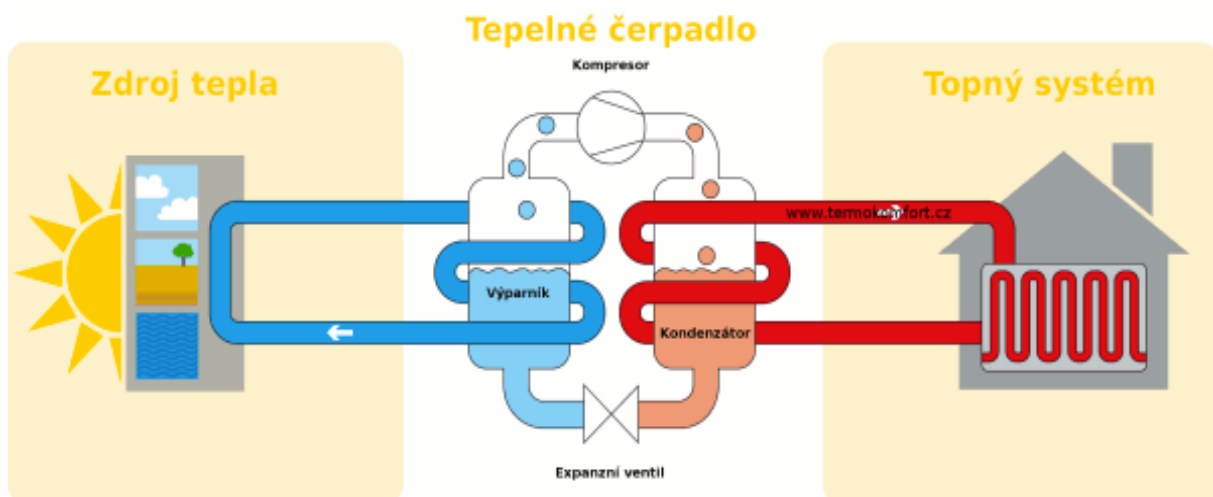
2.1 Popis fungování

Tepelné čerpadlo je soustava specifických komponent, které tvoří dohromady uzavřený okruh. Jednotlivé části, bychom mohli rozdělit do skupin podle jejich základní funkce:

a) První skupinou jsou **tepelné výměníky**. Tepelný výměník slouží k výměně energie mezi jednotlivými soustavami. Používané tepelné výměníky jsou *výparník* a *kondenzátor*.

b) Druhou skupinou jsou **tlakové části** upravující tlak příslušného pracovního média. Do tlakové části patří *kompresor* a *expanzní ventil*.

Výše zmíněné pracovní médium je látka, kterou je naplněn okruh tepelného čerpadla. Jedná se o speciální kapalinu s extrémně nízkým bodem varu. Pro fungování tepelného čerpadla hraje pracovní médium velmi významnou roli.



Obr. 1 : Ideové schéma tepelného čerpadla: Termokomfort [online]. Dostupné z <http://www.termokomfort.cz/img/princip-tepelneho-cerpadla.gif>

V uzavřeném okruhu jsou komponenty rozmístěny tak, aby mohly správně plnit svoji funkci. Výparník se proto nachází obvykle mimo obytnou budovu v místě přírodního

zdroje tzv. nízkopotenciální tepelné energie (tím rozumíme, že médium, ze kterého čerpáme teplo, má nízkou teplotu). Do výparníku vstupuje pracovní médium v kapalném skupenství, které se vyznačuje nízkou teplotou a tlakem. Pomocí výparníku je odebíráno teplo z nízkopotenciálního zdroje a předává se pracovnímu médiu. Médium se stane teplonosnou látkou. Důležitou podmínkou potřebného a správného přenosu energie je, aby teplota pracovního média byla nižší, než teplota využívaného zdroje nízkopotenciální energie. Tento teplotní rozdíl vyvolá podle druhého zákona termodynamiky přenos energie, který jde směrem od zdroje nízkopotenciální energie k pracovnímu médiu. Jelikož má pracovní médium při daném tlaku nízký bod varu, dodaná tepelná energie, která ho ohřívá, způsobí jeho vypařování. Pracovní médium se teď nachází v plynné fázi a je obohaceno o energii získanou z příslušného zdroje. energii v tomto stavu bohužel ještě nemůžeme využít k našim potřebám pro vytápění kvůli nízké teplotě teplonosného média. Pro zvýšení jeho teploty se využívá kompresoru. Vstupem do kompresoru jsou páry teplonosného média a elektrická práce potřebná pro jeho pohon. Kompresor páry pracovního média stlačí, čímž bude mít na výstupu teplonosná látka vyšší tlak a teplotu. Jde tedy o použití „adiabatického“ kompresoru, ideální, tedy „izotermický“ kompresor by byl v tomto případě zcela nevyhovující. Tím dojde k požadovanému přečerpání energie z nižší teplotní hladiny na vyšší. Tuto energii jsme nyní již schopni využít k potřebám vytápění. Proto se v další části okruhu tepelného čerpadla nachází tepelný výměník zvaný kondenzátor, který dokáže předat získanou tepelnou energii pracovního média do otopné soustavy objektu. Během procesu přenosu tepla se pracovní médium v plynné fázi ochlazuje a následně kondenzuje. Výstupem z kondenzátoru je pracovní médium opět v kapalném skupenství, ale stále o vysokém tlaku. Tlak média snížíme expanzním ventilem (izoentropický proces). Po expanzi média dojde kromě snížení jeho tlaku také k podstatnému snížení teploty. Médium v kapalném skupenství, které má teď potřebné parametry, proudí do výparníku a celý proces se opakuje.

2.2 Význam topného faktoru

Topný faktor (používáme obě obvyklá značení (značení používám v souladu s [8]), tedy ε a COP) je základním ukazatelem energetické účinnosti tepelného čerpadla a řadí se mezi nejvýznamnější hodnoty. Udává nám poměr mezi množstvím vyrobené energie a

energie, kterou jsme museli na pohon čerpadla vynaložit, respektive poměr topného výkonu a elektrického příkonu. Výsledkem je bezrozměrné číslo, které nabývá vždy hodnot větších jak jedna.

$$\varepsilon = \frac{Q_{top}}{P_{el}} [-]$$

ε - topný faktor tepelného čerpadla [-]

Q_{top} – topný výkon [W]

P_{el} – elektrický příkon pro pohon čerpadla [W]

Z této rovnice topného faktoru vyplývá, že čím bude jeho hodnota vyšší, tím jsme schopni dostat na výstupu větší topný výkon při stejném elektrickém příkonu.

Poznámka: Česká energetická legislativa obsahuje historicky vzniklé fyzikální nesmysly, kdy například pro „obejití“ podmínek EU pro chladicí a klimatizační systémy o větším výkonu je v energetickém zákoně výkon chladicího zařízení definován jako příkon jeho pohonné jednotky. V této práci se budeme držet fyzikálně správných termínů a výkon bude vždy rozuměn výkon a nikoli příkon.

Velikost topného faktoru je ale především závislá na teplotě zdroje nízkopotenciální tepelné energie, a požadované teplotě vody pro vytápění. Jelikož se tyto teploty mění, není topný faktor pro tepelné čerpadlo konstantou. Topný faktor současných tepelných čerpadel můžeme odhadnout podle vzorce:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} * \frac{T_k}{T_k - T_0} [-]$$

ε - topný faktor tepelného čerpadla [-]

T_k – teplota kondenzátoru [K]

T_0 – teplota odparníku [K]

Vidíme, že jde o polovinu topného faktoru obráceně běžícího (proti směru hodinových ručiček v T-S diagramu) Carnotova cyklu. Dnešní tepelná čerpadla jsou tedy v podstatě na polovině cesty k dokonalosti.

Čím vyšší bude rozdíl teploty odparníku, tj. teploty zdroje, ze kterého teplo odebíráme, a teploty kondenzátoru, tj. požadovaná teplota vody pro vytápění, tak tím bude topný faktor menší. Zároveň bude menší i potřebný topný výkon. Největších rozdílů těchto dvou teplot je dosaženo v zimních měsících.

2.3 Základní rozdělení tepelných čerpadel

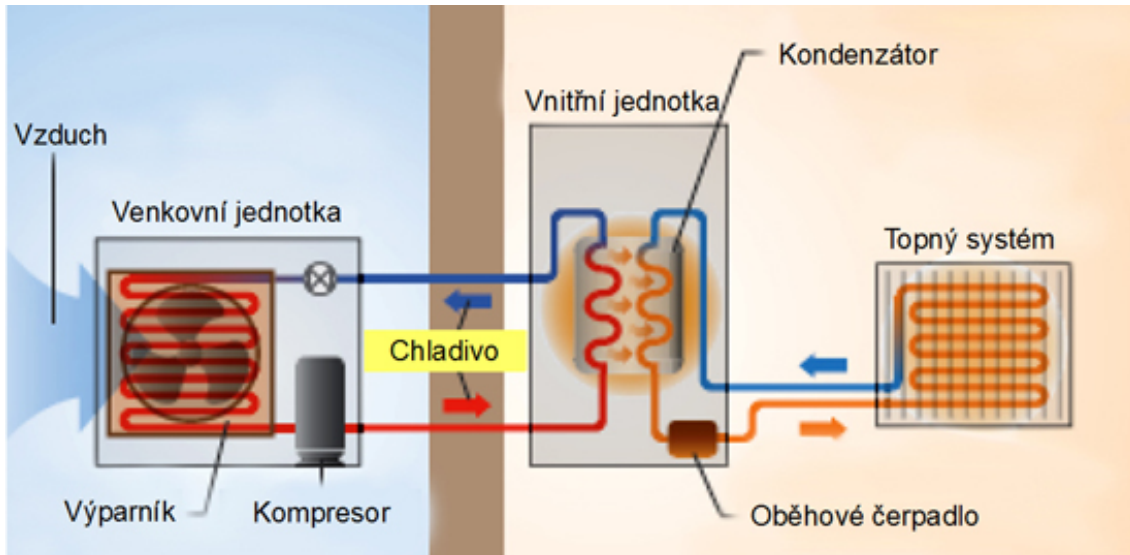
Systém rozdělení tepelných čerpadel vychází dle užitého zdroje, ze kterého energii odebíráme a látky, které získanou energii předáváme. Jako dostupný zdroj nízkopotenciální energie uvažujeme vodu, vzduch a zemi. Výstupní tepelnou energii pak můžeme předávat vodě nebo vzduchu. Celkové rozdělení tepelných čerpadel dle užitého zdroje je na čerpadla země – voda, voda – voda, vzduch – voda a vzduch – vzduch. Široké rozdělení tepelných čerpadel umožňuje zákazníkům vybrat takové čerpadlo, které bude nejvíce vhodné pro daný objekt, neboť hlavním hlediskem při výběru je dostupnost požadovaného zdroje.

Nevýhodou čerpadel využívajících vodu je samotný výskyt tohoto zdroje jako takový. Přítomnost vody musí být v dostatečném množství a požadované kvalitě. Jelikož má tento typ stálé pracovní podmínky, můžeme dosáhnout příznivého topného faktoru. V případě povrchové vody je však potřebné povolení veřejné moci a návrh výměníku odebírajícího teplo z prostředí je nutno pečlivě provést s uvážením nebezpečí zmrznutí vody na teplosměnné ploše.

Systémy čerpadel se zdrojem země se dále dělí na čerpadla s horizontálním výměníkem v podobě zemního kolektoru a se svislým vrtem. V obou variantách nám stálost pracovních podmínek zajistí dobrý topný faktor. Tyto varianty jsou investičně nejnáročnější a je také potřeba dostatečné venkovní plochy k jejich instalaci.

2.4 Popis tepelného čerpadla vzduch - voda

Jelikož je práce zaměřena na tepelné čerpadlo vzduch – voda, věnuji mu podrobněji samostatnou kapitolu.



Obr. 2: Tepelné čerpadlo vzduch – voda , zdroj

<http://www.immergas.cz/kotel/57/magis-combo-5>

Mezi největší výhody tepelných čerpadel vzduch – voda patří investiční náklady, které jsou ze všech typů nejnižší. Nízké počáteční investiční náklady nám také zajistí rychlejší návratnost pořizovacích prostředků. Další významnou výhodou těchto čerpadel je neomezenost vzduchu jako zdroje, možnost libovolného umístění tohoto zařízení, rychlá a snadná montáž bez nutnosti tvorby zemního vrtu nebo zemního kolektoru.

Největší nevýhodou jsou nestálé pracovní podmínky. Nestálost teploty vzduchu na ročním období zhoršuje oproti ostatním tepelným čerpadlům topný faktor. Je zde patrný rozdíl velikosti výkonu v letních a zimních měsících. Zimní měsíce jsou pro chod čerpadla nejnepříznivější, protože s poklesem teploty vzduchu topný faktor klesá kvůli velkému rozdílu teplot mezi vzduchem a požadovanou teplotou vody. Abychom vykompenzovali při nepříznivých teplotách nižší topný faktor, a tak i nižší topný výkon, přidáváme obvykle k čerpadlům záložní zdroj v podobě elektrokotle nebo kotle na tuhá

paliva, která pak pracují dohromady s čerpadlem. Další nevýhodou tohoto typu čerpadel je jejich hlučnost.

2.5 Způsoby provozu tepelných čerpadel

Jak již bylo zmíněno, velikost topného faktoru a tím vyprodukovaný výkon, je závislý na teplotě zdroje nízkopotenciální energie, která se u čerpadel odebírající energii ze vzduchu výrazně v průběhu roku mění. Abychom docílili optimálních provozních parametrů během chodu tepelného čerpadla, rozlišujeme následující provozní stavy.

Monovalentní provoz je základním provozním stavem. Tepelné čerpadlo je v tomto chodu jediným pracujícím zařízením, které musí být schopno zajistit spolehlivě požadované vytápění, a to po celou dobu topné sezóny. Z tohoto provozního stavu vycházejí i ostatní provozní stavy. Aby se vytápění optimalizovalo, pracuje tepelné čerpadlo monovalentně jen do určité teploty, tzv. mez bivalence. Jakmile je tato teplota překročena, čerpadla pracují se záložním zařízením v následujících stavech.

Monoenergetický provoz – po překročení teploty mezi bivalence čerpadlo pracuje společně se záložním zdrojem, který je stejně jako čerpadlo poháněn elektrickou energií.

Paralelně bivalentní provoz - je v principu stejný jako předchozí monoenergetický chod s tím rozdílem, že dodaná energie ze záložního zdroje nemusí být elektrická, ale například můžeme použít kotel na tuhá paliva.

Alternativně bivalentní provoz – v tomto provozním stavu se po překročení mezní teploty tepelné čerpadlo vypne a veškerou práci přebírá záložní zdroj.

2.6 Tepelné ztráty budov, jejich význam a výpočet podle norem

Tepelné ztráty jsou vlastností všech budov. Znalost výpočtu tepelných ztrát nám umožní dimenzovat otopnou soustavu a určit potřebnou energii pro vytápění objektu. Postup výpočtu tepelných ztrát je stanoven normou a v České republice můžeme nalézt normy dvě. První norma ČSN 06 0210, nese název Výpočet tepelných ztrát budov při ústředním vytápění

a přišla v účinnost 1.6. 1994, její platnost byla ukončena 1.9. 2008. Druhou normou je ČSN EN 12831 s názvem Tepelné soustavy v budovách - Výpočet tepelného výkonu. Účinnost normy byla od 1.4. 2005 a platila do 1.3. 2018. Důvodem zavedení této normy byla nutnost sjednocení výpočetního postupu po vstupu České republiky do Evropské unie. Aktuální norma je ČSN EN 12831-1 a nabyla účinnosti 1.3. 2018. Obě normy se zabývají výpočtem tepelných ztrát budov, a tak i výpočetní postup v těchto normách je v principu podobný, neboť se snažíme vypočítat tepelné ztráty budovy z charakteristických dílčích ztrát. Ovšem způsob, kterým počítáme tyto dílčí ztráty se výrazně liší. Jednotlivé metody výpočtu těchto norem rozeberu podrobně v následujících kapitolách.

2.7 Celkové tepelné ztráty a druhy tepelných ztrát

2.7.1 Celkové tepelné ztráty

Celkové tepelné ztráty jsou dány sumou všech dílčích tepelných ztrát objektu. Jmenovitě se jedná o tepelné ztráty prostupem, tepelné ztráty větráním a jiné tepelné ztráty nebo tepelné zisky. V této kapitole používáme značení ze zdroje zejména [1] a [4].

2.7.2 Ztráty prostupem

Ztráty prostupem vyjadřují tepelný tok energie, který prochází skrz konstrukci budovy z vytápěných vnitřních místností objektu do exteriéru, z důvodu rozdílu teplot. Konstrukcí objektu se rozumí veškeré obvodové zdivo, podlaha, okna a ostatní stavební prvky. Velikost ztrát prostupem jsou závislé na rozdílu teplot mezi interiérem a exteriérem, na ploše stavebních konstrukcí, skrz které prochází tepelný tok, a také na teplotním součiniteli prostupu tepla stavebních konstrukcí.

2.7.3 Ztráty větráním

Ztráty větráním vznikají výměnou vzduchu mezi interiérem a vnějším prostředím. Výměnou vzduchu se zbavujeme škodlivých látek přítomných v místnostech, a proto je větrání nutné z hlediska hygieny. V České republice existují i předpisy, které stanovují minimální objemový průtok vzduchu, dle typu místnosti. Ztráty větráním bychom mohli dále rozdělit na přirozené a nucené.

Přirozené větrání

Proces výměny vzduchu se během přirozeného větrání děje samovolně. Tepelné ztráty jsou způsobeny nedokonalostmi ve stavebních konstrukcích, především u oken a dveří. Abychom mohli tyto ztráty snížit, musíme provést náležitá opatření v podobě dodatečných těsnění, či použití jiných materiálů, které omezí průchod vzduchu skrz konstrukce. Ačkoli je přirozené větrání nepřípustné z hlediska vzniku tepelných ztrát, má však i své pozitivum. Jejich velkým kladem je právě onen potřebný efekt výměny vzduchu v místnostech, který zajišťuje hygienu a také zabraňuje tvorbě plísní.

Nucené větrání

Na rozdíl od předchozího procesu nucené větrání probíhá cíleně, za účelem splnění daných hygienických předpisů. S tímto typem větrání se setkáme u komerčních a veřejných staveb, které musí být opatřeny příslušnou vzduchotechnikou, která zajistí potřebnou výměnu vzduchu. V současnosti je nucené větrání méně časté, zejména proto, že je investičně náročnější.

2.7.4 Tepelně technické veličiny

Než se pustíme do výkladu norem, musíme si uvést a vysvětlit základní tepelně technické veličiny, se kterými pracujeme při výpočtu tepelných ztrát budov.

Jako první bych uvedl již zmíněný součinitel prostupu tepla U , a dále s tím související tepelné odpory R . Dle definice (zdroj XXX) (viz. tzb info <https://stavba.tzb-info.cz/prostup-tepla-stavebni-konstrukci/315-soucinitel-prostupu-tepla>) součinitel prostupu tepla vyjadřuje, kolik tepla unikne konstrukcí o ploše 1 m^2 při rozdílu teplot jejích povrchů 1 K . Jeho jednotkou je $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ a platí příslušný vztah:

$$U_T = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}} = \frac{1}{R_T}$$

U_T ... součinitel prostupu tepla [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]

R_{si} ... odpor při přestupu na vnitřní straně [$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$]

R_{se} ... odpor při přestupu na vnější straně [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$]

R ... tepelný odpor konstrukce [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$]

R_T ... odpor konstrukce při prostupu tepla (z prostředí do prostředí) [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$]

Z předchozí rovnice plyne, že odpor konstrukce při prostupu tepla R_T , je převrácenou hodnotou součinitele prostupu tepla U . Obě tyto veličiny vyjadřují prostup celou konstrukcí. Odpor R_T je tak celkovým tepelným odporem, který brání výměně tepla mezi prostředími obklopující stavební konstrukci a je dán součtem tepelného odporu konstrukce R a odporů přestupu tepla na vnitřní a vnější straně konstrukce R_{si} R_{se} . R_T je tedy definováno:

$$R_T = R_{si} + R + R_{se}$$

Tepelný odpor konstrukce R charakterizuje tepelně izolační vlastnosti materiálu konstrukce, ze kterého byl vyroben. Říká nám kdy dojde na povrchu konstrukce k přenosu 1 wattu, tj. přenosu 1 J za 1 sekundu, při příslušné ploše konstrukce a rozdílu teplot. Pro jeho výpočet musíme znát součinitel tepelné vodivosti vrstvy materiálu λ , která se liší dle použitého materiálu a vyjadřuje schopnost daného materiálu vést teplo. Čím je vyšší součinitel tepelné vodivosti, tím je teplo v materiálu vedeno lépe. Požadavek na velikost tohoto součinitele z hlediska vytápění je, aby byl co možná nejmenší, a tak materiál dokázal teplo příliš nepropouštět. Známe-li i tloušťku dané konstrukce d , můžeme pro tepelný odpor konstrukce R psát:

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

R ... tepelný odpor konstrukce [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$]

d ... tloušťka [m]

λ ... součinitel tepelné vodivosti [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

Reálná konstrukce budovy je tvořena z více vrstev jako je nosná cihlová konstrukce, tepelná izolace a fasáda, přičemž má každá vrstva různou tloušťku a také součinitel tepelné vodivosti. Proto je výsledný odpor R dán sumou všech tepelných odporů těchto konstrukcí, $R = \sum R_j$. R_j je tepelný odpor j -té vrstvy pro jehož vtaň platí:

$$R_j = \frac{d_j}{\lambda_j}$$

R_j ... tepelný odpor konstrukce j-té vrstvy [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$]

d_j ... tloušťka j-té vrstvy [m]

λ_j ... součinitel tepelné vodivosti j-té vrstvy [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

Dále pro výpočet odporu konstrukce při prostupu tepla R_T potřebujeme znát odpory přestupu tepla na vnitřní a vnější straně konstrukce. Odpor přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce je definován:

$$R_{si} = \frac{1}{\alpha_i}$$

R_{si} ... je odpor přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce

α_i ... součinitel přestupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

A odpor přestupu tepla na vnější straně konstrukce je:

$$R_{se} = \frac{1}{\alpha_e}$$

R_{se} ... je odpor přestupu tepla na vnější straně konstrukce

α_e ... součinitel přestupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

Ze znalosti všech rovnic můžeme vztah pro součinitel prostupu tepla přepsat do výsledné podoby:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_e}}$$

2.8 Výpočet tepelných ztrát podle normy ČSN 06 0210

2.8.1 Výpočet celkových ztrát

Celková tepelná ztráta je dána součtem všech tepelných ztrát v objektu, tj. ztrát prostupem, ztrát větráním a tepelných ziscích. Podíl na tepelných ziscích má pobyt osob v objektu, tepelné zisky ze slunečního záření a také elektronické spotřebiče.

$$Q_c = Q_p + Q_v + Q_z$$

Q_c ... celková tepelná ztráta [W]

Q_p ... tepelná ztráta prostupem tepla [W]

Q_v ... tepelná ztráta větráním [W]

Q_z ... tepelné zisky [W]

Výpočet tepelných ztrát prostupem Q_p

Pro výpočet tepelné ztráty prostupem vycházíme z tzv. základní tepelné ztráty prostupem Q_o . Tepelná ztráta ale určuje ztráty prostupem tepla mezi konstrukcemi pouze pro vnější prostředí s nižší teplotou než je teplota vytápěné místnosti. V opačném případě by se nejednalo o tepelnou ztrátu, ale zisk, který tepelnou ztrátu snižuje. Základní tepelná ztráta prostupem je definovaná:

$$Q_o = \sum_{j=1}^{j=n} U_j S_j (\theta_i - \theta_{ej})$$

Q_o ... základní tepelná ztráta prostupem tepla [W]

U_j ... součinitel prostupu tepla [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

S_j ... ochlazovaná plocha konstrukce [m^2]

θ_i ... výpočtová vnitřní teplota [$^{\circ}C$]

θ_{ej} ... teplota na vnější straně konstrukce [$^{\circ}C$]

Výsledná tepelná ztráta prostupem Q_p se vypočte ze základní tepelné ztráty Q_o , která je navýšena o případné přírážky.

$$Q_p = Q_o(1 + p_1 + p_2 + p_3)$$

Schematicky můžeme také prostup tepla vyjádřit sériově řazenými odpory jednotlivých vrstev konstrukce.

Přirážky k základní tepelné ztrátě

Přirážka na vyrovnání vlivu chladných konstrukcí p_1

Přirážka umožňuje vyrovnat rozdílnost vlivu nižší účinné povrchové teploty u místností s větším počtem ochlazovaných ploch a zachovat požadovanou vnitřní teplotu. Velikost přirážky se vypočte z průměrného součinitele tepla všech konstrukcí U_c :

$$U_c = \frac{Q_o}{\sum S (\theta_i - \theta_e)}$$

U_c ... průměrný součinitel prostupu tepla konstrukcemi místnosti [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

S ... plocha konstrukcí ohraničujících vytápěnou místnost [m^2]

θ_i ... vnitřní teplota [$^{\circ}C$]

θ_e ... teplota na vnější straně konstrukce [$^{\circ}C$]

Samotná přirážka p_1 :

$$p_1 = 0,15 U_c$$

Přirážka na urychlení zátoku p_2

Uvažujeme pouze v případě přerušovaného způsobu vytápění.

Přirážka na světovou stranu p₃

Velikost přirážky na světovou stranu je ovlivňována polohou nejvíce ochlazované polohy konstrukce.

Výpočet tepelných ztrát větráním Q_v

Ztrátu větráním vypočteme podle vztahu:

$$Q_v = c_p \dot{V}_v (\theta_i - \theta_e)$$

Q_v ... tepelná ztráta větráním [W]

\dot{V}_v ... objemový tok větracího vzduchu [m³.s⁻¹]

θ_i ... vnitřní teplota [°C]

θ_e ... teplota na vnější straně konstrukce [°C]

c_p ... měrná tepelná kapacita vzduchu při teplotě 0 °C [J.m³.K⁻¹]

Výpočet objemového toku lze provést dvěma způsoby, přičemž pro výpočet tepelných ztrát dosazujeme vždy ten větší z vypočtených objemových toků. První způsob výpočtu zohledňuje hygienické požadavky pro výměnu vzduchu v dané místnosti:

$$\dot{V}_n = \frac{n * V}{3600}$$

\dot{V}_n ... objemový průtok vzduchu [m³.s⁻¹]

n ... intenzita výměny vzduchu [h⁻¹]

V ... objem místnosti [m³]

Druhým způsobem je výpočet skutečného průtoku vzduchu přirozeným větráním:

$$\dot{V}_{VP} = \sum (i.l) B M$$

\dot{V}_{VP} ... skutečný průtok vzduchu [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

i ... součinitel spárové průvzdušnosti [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-0,67}$]

l ... délka spár otevíratelných částí oken a venkovních dveří [m]

B ... charakteristické číslo budovy [$\text{Pa}^{-0,67}$]

M ... charakteristické číslo místnosti [-]

2.9 Výpočet tepelných ztrát podle normy ČSN EN 12831

2.9.1 Celková návrhová tepelná ztráta vytápěného prostoru

U této normy nás zajímá celková návrhová ztráta vytápěného prostoru, která je dána součtem tepelných ztrát, a to návrhové tepelné ztráty prostupem tepla a návrhové tepelné ztráty větráním.

$$\Phi_i = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i}$$

Φ_i ... celková návrhová ztráta vytápěného prostoru [W]

$\Phi_{T,i}$... návrhová tepelná ztráta prostupem tepla vytápěného prostoru [W]

$\Phi_{V,i}$... návrhová tepelná ztráta větráním vytápěného prostoru [W]

Návrhová tepelná ztráta prostupem tepla vytápěného prostoru

Návrhové tepelné ztráty prostupem se započítává, jak tepelná ztráta z vytápěné místnosti do exteriéru, ale také uvažuje tepelné toky, které prochází mezi místnostmi interiéru. Vztah pro tuto ztrátu:

$$\Phi_{T,i} = (H_{T,ie} + H_{T,iue} + H_{T,ig} + H_{T,ij}) (\theta_{int,i} - \theta_e)$$

$\Phi_{T,i}$... návrhová tepelná ztráta prostupem tepla vytápěného prostoru [W]

$H_{T,ie}$... součinitel tepelné ztráty prostupem z vytápěného prostoru do venkovního prostředí pláštěm budovy [$\text{W} \cdot \text{K}^{-1}$]

$H_{T,iue}$... součinitel tepelné ztráty prostupem z vytápěného prostoru do venkovního prostředí nevytápěným prostorem [$\text{W} \cdot \text{K}^{-1}$]

$H_{T,ig}$... součinitel tepelné ztráty prostupem z vytápěného prostoru do zeminy v ustáleném stavu [$W.K^{-1}$]

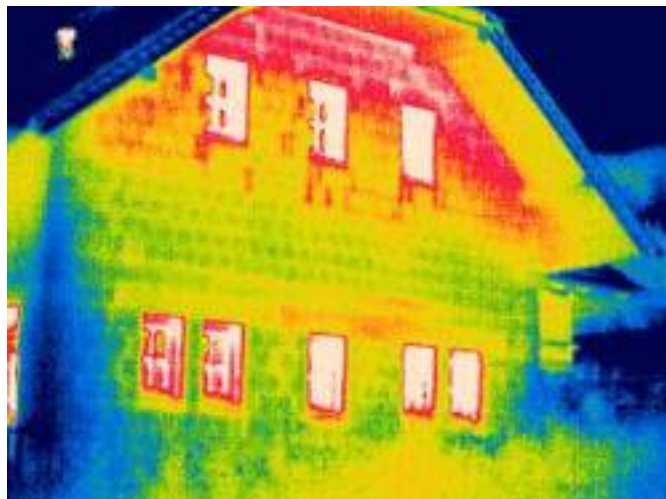
$H_{T,ij}$... součinitel tepelné ztráty z vytápěného prostoru do sousedního prostoru vytápěného na výrazně jinou teplotu [$W.K^{-1}$]

$\theta_{int,i}$... výpočtová vnitřní teplota vytápěného prostoru [$^{\circ}C$]

θ_e ... výpočtová venkovní teplota [$^{\circ}C$]

Součinitel tepelné ztráty prostupem z vytápěného prostoru do venkovního prostředí pláštěm budovy

Tepelná ztráta z vytápěného prostoru do exteriéru vzniká v důsledku tepelné vodivosti stavebních konstrukcí a lineárních tepelných mostů, které oddělují vytápěné prostory od exteriéru. Tepelný most je místo v konstrukci, ve kterém dochází k většímu tepelnému toku, než v ostatních částech této konstrukce (zdroj: XXX tzb nebo dp). Tímto místem tak ztrácíme teplo z vytápěné místnosti, které uniká do exteriéru. Tento jev můžeme zachytit termokamerou, jak ukazuje následující obrázek. V praxi se tepelný most projevuje tak, že ve vnitřní části vytápěné místnosti má místo, kde se nachází tepelný most studený povrch a na opačné straně v exteriéru je teplý.



Obr. 3: Snímek budovy pomocí termokamery, zdroj [1]

Tepelné mosty v budovách zvyšují tepelné ztráty a mají tak negativní vliv na energetickou bilanci stavby. Tepelné mosty jsou lineární nebo bodové. Bodový lineární most je například kotevní hmoždinka zateplovacího systému s kovovým trnem a lineárním tepelným mostem je třeba místo osazení okna do stěny.

Tento jev se začal více projevovat až v moderních budovách, kde mají tepelné mosty významný podíl na tepelné ztráty, než tomu bylo v budovách starých. V předchozí normě ČSN 06 0210 se přímo s tepelnými mosty nepočítá. Pouze je tento vliv zahrnut do přírážky k součiniteli prostupu tepla.

Vztah pro součinitel tepelné ztráty prostupem z vytápěného prostoru do venkovního prostředí pláštěm budovy:

$$H_{T,ie} = \sum_k A_k U_k e_k + \sum_l \psi_l l_l e_l$$

$H_{T,ie}$... součinitel tepelné ztráty prostupem z vytápěného prostoru

A_k ... plocha stavební části [m^2]

U_k ... součinitel prostupu tepla stavební části [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

$e_k e_l$... korekční činitel vystavení povětrnostním vlivům při uvažování klimatických vlivů jako je různé oslunění, pohlcování vlhkosti stavebními díly, rychlost větru a teplota, pokud tyto vlivy nebyly uvažovány při stanovení hodnot součinitele prostupu tepla [-]

ψ_l ... činitel lineárního prostupu tepla lineárního tepelného mostu [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

l_l ... délka lineárního mostu [m]

Součinitel tepelné ztráty prostupem z vytápěného prostoru do nevytápěného prostoru

Sousedí-li vytápěná místnost s nevytápěnou místností, která je vedle exteriéru, použijeme součinitel:

$$H_{T,iue} = \sum_k A_k U_k b_u + \sum_l \psi_l l_l b_u$$

b_u ... teplotní redukční faktor, který vychází z rozdílu mezi teplotou nevytápěného prostoru a venkovní výpočtovou teplotou [-]

Teplotní redukční faktor se vyjádří podle rovnice:

$$b_u = \frac{\theta_{int,i} - \theta_u}{\theta_{int,i} - \theta_e}$$

θ_u ... teplota nevytápěného prostoru [°C]

Součinitel tepelné ztráty prostupem z vytápěného prostoru do zeminy

Jedná se o tepelné ztráty, které vznikají prostupem tepla z podlahy nebo stěn suterénu do zeminy. Její velikost je ovlivněna řadou faktorů jako je geometrie podlahy, hloubka suterénu pod úrovní terénu a tepelně technické vlastnosti samotné půdy.

$$H_{T,ig} = f_{g1} + f_{g2} \left(\sum_k A_k U_{equiv,k} \right) G_w$$

f_{g1} ... korekční činitel zohledňující vliv ročních změn venkovní teploty [-]

f_{g2} ... teplotní redukční činitel zohledňující rozdíl mezi roční průměrnou teplotou a výpočtovou venkovní teplotou [-]

$U_{equiv,k}$... ekvivalentní součinitel prostupu tepla stavební části [W.m⁻².K⁻¹]

G_w ... korekční činitel zohledňující vliv spodní vody [-]

Hodnota korekčního faktoru f_{g1} je stanovena normou ČSN EN 12831 na 1,45. Korekční faktor f_{g2} se vypočte ze vztahu:

$$f_{g2} = \frac{\theta_{int,i} - \theta_{m,e}}{\theta_{int,i} - \theta_e}$$

$\theta_{m,e}$... průměrná roční venkovní teplota [°C]

Ekvivalentní součinitel prostupu tepla stavební částí závisí na teplotním součiniteli stavební konstrukce a na charakteristickém rozměru, přičemž musíme rozlišit, zda je podlaha umístěna na úrovni terénu nebo pod ním. Charakteristický rozměr:

$$B = \frac{A_g}{0,5 P}$$

B ... charakteristický rozměr [m]

A_g ... plocha podlahy [m²]

P ... obvod podlahy [m]

Součinitel tepelné ztráty prostupem z vytápěného prostoru do sousedního prostoru vytápěného na jinou teplotu

Pro tento součinitel platí vztah:

$$H_{T,ij} = \sum_k f_{ij} A_k U_k$$

$f_{i,j}$... redukční teplotní činitel

Redukční teplotní činitel zohledňuje rozdíl mezi teplotou sousedícího prostoru a venkovní výpočtovou teplotu:

$$f_{i,j} = \frac{\theta_{int,i} - \theta_{vyt.sous.prostoru}}{\theta_{int,i} - \theta_e}$$

$\theta_{vyt.sous.prostoru}$... teplota sousedního vytápěného prostoru [°C]

Návrhová tepelná ztráta větráním

Výpočet návrhové tepelné ztráty je podle vzorce:

$$\Phi_{V,i} = H_{V,i}(\theta_{int,i} - \theta_e)$$

$\Phi_{V,i}$... návrhová tepelná ztráta větráním [W]

$H_{V,i}$... součinitel návrhové tepelné ztráty [W.K⁻¹]

Velikost součinitele návrhové tepelné ztráty je přímo úměrná objemovému toku vzduchu:

$$H_{V,i} = \dot{V}_i \rho c_p$$

\dot{V}_i ... vyměňovaný objemový tok vzduchu [m³.s⁻¹]

ρ ... hustota vzduchu [kg.m⁻³]

c_p ... měrná tepelná kapacita vzduchu při konstantním tlaku [kJ.kg⁻¹.K⁻¹]

Přirozené větrání

Jelikož je během přirozeného větrání do objektu přiváděn vzduch samovolně, jeho teplotní charakteristika je tak stejná jako u venkovního vzduchu. Z toho pro tepelné ztráty vyplývá, že jsou přímo úměrné rozdílu mezi vnitřní a venkovní teplotou.

Na objemový tok reprezentující výměnu vzduchu ve vytápěném prostoru se můžeme dívat dvěma způsoby, a to z pohledu hygienických požadavků na minimální výměnu vzduchu, a nebo z množství výměny infiltrovaného množství vzduchu. Po jejich výpočtu pak bereme vždy ten větší:

$$\dot{V}_i = \max(\dot{V}_{inf,i}, \dot{V}_{min,i})$$

$\dot{V}_{inf,i}$... vzduch infiltrací [m³.h⁻¹]

$\dot{V}_{min,i}$... požadovaná výměna vzduchu z hygienických důvodů [m³.h⁻¹]

Kde pro minimální objemový tok požadovaný z hygienických důvodů platí:

$$\dot{V}_{min,i} = n_{min} V_i$$

n_{min} ... minimální intenzita výměny vzduchu za hodinu, která se liší dle příslušné místnosti a její hodnota se stanoví normou ČSN EN 12831 [$1 \cdot h^{-1}$]

V_i ... objem vytápěného prostoru [m^3]

A pro velikost infiltrovaného množství vzduchu infiltrací platí:

$$\dot{V}_{inf,i} = 2 V_i n_{50} e_i \varepsilon_i$$

n_{50} ... intenzita výměny vzduchu mezi vnitřkem a vnějškem při rozdílu tlaků 50 Pa

e_i ... stínící součinitel

ε_i ... výškový korekční činitel

Nucené větrání

$$\dot{V}_i = \dot{V}_{inf,i} + \dot{V}_{su,i} f_{v,i} + \dot{V}_{mech,inf,i}$$

$\dot{V}_{su,i}$... přiváděný vzduch, určí projektant [$m^3 \cdot h^{-1}$]

$f_{v,i}$... redukční teplotní činitel [$m^3 \cdot h^{-1}$]

$\dot{V}_{mech,inf,i}$... rozdíl mezi množstvím odváděného vzduchu soustavou a množstvím přiváděného vzduchu soustavou [$m^3 \cdot h^{-1}$]

$\dot{V}_{inf,i}$... množství vzduchu infiltrací, výpočet stejný jako u přirozeného větrání [$m^3 \cdot h^{-1}$]

Redukční teplotní činitel:

$$f_{v,i} = \frac{\theta_{int,i} - \theta_{su,i}}{\theta_{int,i} - \theta_e}$$

$\theta_{su,i}$... teplota přiváděného vzduchu [$^{\circ}C$]

Pro bilanci množství vzduchu celé budovy $\dot{V}_{mech,inf,i}$ pak platí:

$$\dot{V}_{mech,inf,i} = \max(\dot{V}_{ex} - \dot{V}_{su}, 0)$$

\dot{V}_{ex} ... odváděný vzduch pro celou budovu [$m^3 \cdot h^{-1}$]

\dot{V}_{su} ... přiváděný vzduch pro celou budovu [$m^3 \cdot h^{-1}$]

2.9.2 Tepelný zátopový výkon

U objektů, které jsou vytápěny přerušovaným způsobem se do návrhového tepelného výkonu přičítá i zátopový výkon, který závisí na době zátopu a teplotním poklesu vnitřní teploty.

$$\Phi_{RH,i} = A_i f_{RH}$$

$\Phi_{R,H}$... zátopový tepelný výkon [W]

A_i ... plocha podlahy vytápěného prostoru [m^2]

f_{RH} ... korekční činitel

2.9.3 Návrhový tepelný výkon

Nyní máme již všechny potřebné hodnoty pro stanovení návrhového tepelného výkonu, který je dán součtem celkových tepelných ztrát a zátopových výkonů, respektive součtu tepelných ztrát prostupem, větráním a zátopových výkonů. Pro vytápěný prostor platí:

$$\Phi_{HL,i} = \Phi_i + \Phi_{RH,i} = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i} + \Phi_{RH,i}$$

A dále pak pro budovu jako:

$$\Phi_{HL} = \sum \Phi_{T,i} + \sum \Phi_{V,i} + \sum \Phi_{RH,i}$$

$\Phi_{T,i}$... návrhová tepelná ztráta prostupem tepla vytápěného prostoru [W]

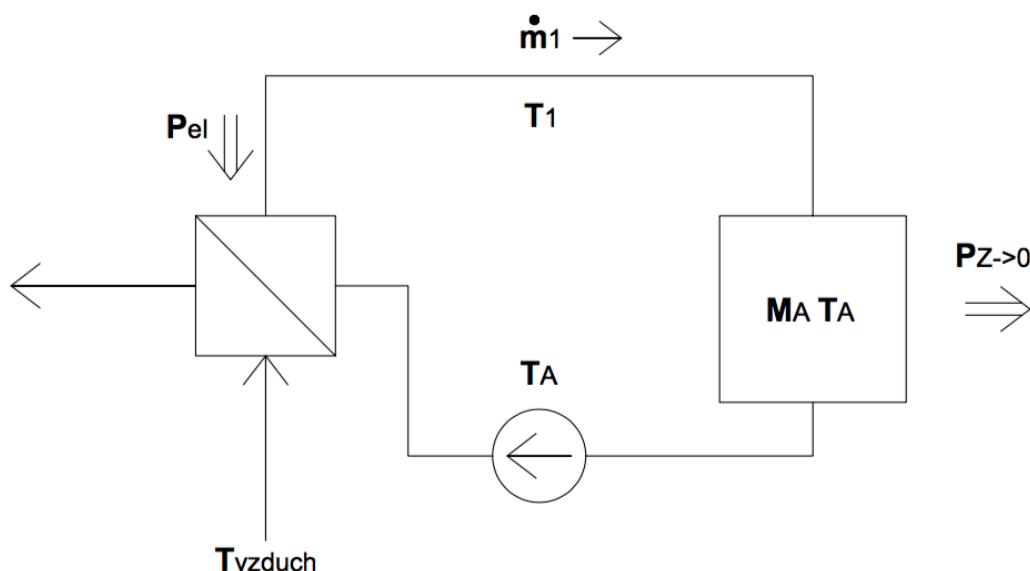
$\Phi_{V,i}$... návrhová tepelná ztráta větráním [W]

$\Phi_{RH,i}$... zátopový tepelný výkon při přerušovaném vytápění [W]

3. Příprava teplé vody

Kromě vytápění objektů je další oblastí využití tepelných čerpadel příprava teplé užitkové vody. Během vytápění je tepelné čerpadlo v chodu pouze po dobu otopné sezóny. Teplou vodu (dříve „teplou užitkovou vodu“, v dalším pro snazší orientaci pro teplou vodu použijeme zkratku TUV) ale potřebujeme připravovat po celý rok, a tak tepelné čerpadlo pracuje celoročně. Pro přípravu teplé užitkové vody využíváme zásobníku, ve kterém se akumuluje teplá voda. Pochopitelně ekonomicky vycházejí pouze varianty s poměrně velkou spotřebou teplé vody (například nemocnice, hotely, domovy důchodců a podobně). Také uvažujeme o přípravě TUV TČ pouze v případech, kdy není k dispozici lacinější zdroj tepla, dnes zejména plyn nebo centrální zásobování teplem.

Tepelné schéma pro ohřev teplé užitkové vody zachycuje následující obrázek. Jelikož uvažujeme relativně velký objem akumulační nádrže, můžeme v našem modelu zanedbat ztráty do okolí (s velikostí nádrže se zmenšuje poměr povrch / objem a navíc moderní izolační materiály mají nízkou tepelnou vodivost):



Obr. 4: Tepelné schéma přípravy teplé vody

Vysvětlivky:

- T_{vzduch} – venkovní teplota [°C]
- T_1 – teploty vody v daném místě soustavy [°C]
- T_A – teplota vody v nádrži [°C]
- P_{el} – elektrický příkon tepelného čerpadla [W]
- \dot{m}_1 – hmotnostní průtok ohřívané vody [kg.s-1]
- m_A – hmotnost vody v nádrži [kg]
- c – měrná tepelná kapacita vody [J.kg-1.K-1]
- P_Z – ztrátový výkon, v dalším uvažujeme nulový [W]

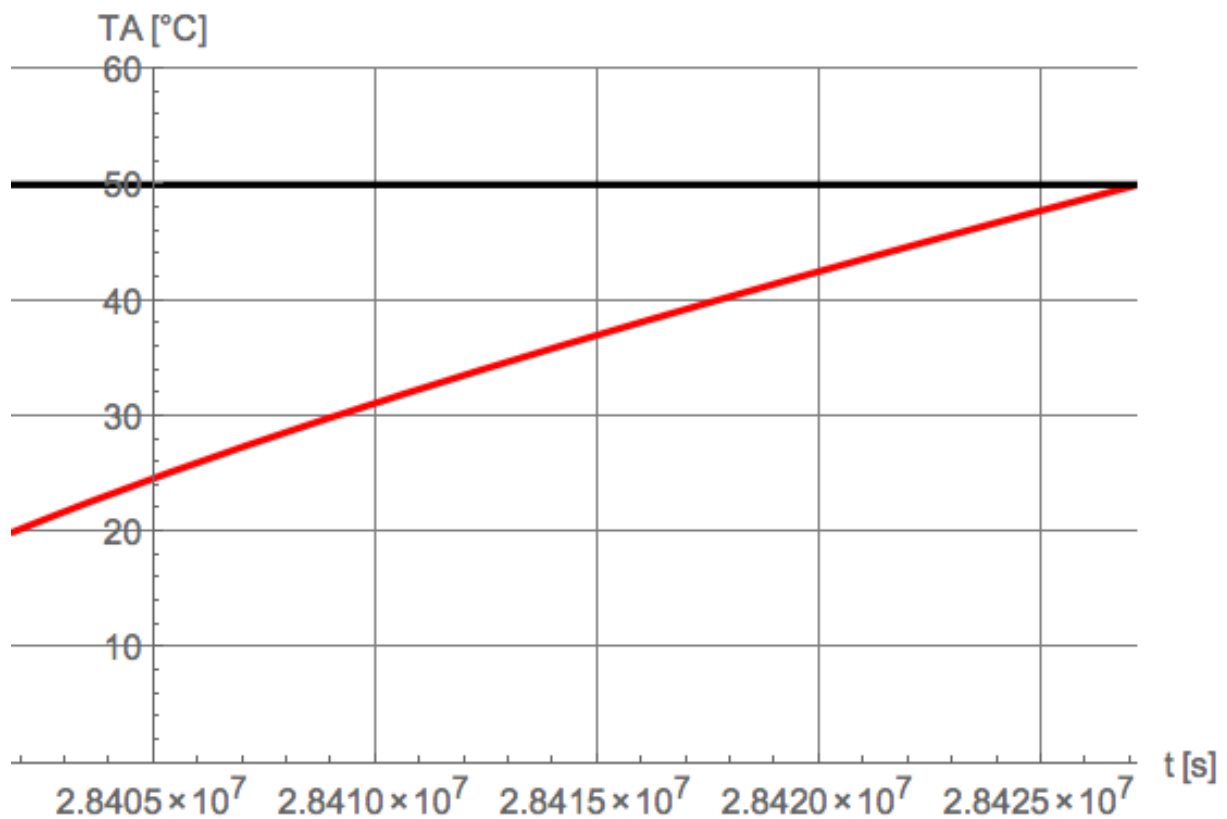
Systém popisuje tato soustava rovnic:

$$P_{topny} = P_{el} COP(T_{vzduch}, T_1)$$

$$P_{topny} = \dot{m}_1 c (T_1 - T_A)$$

$$m_A c \frac{dT_A}{dt} = P_{topny}$$

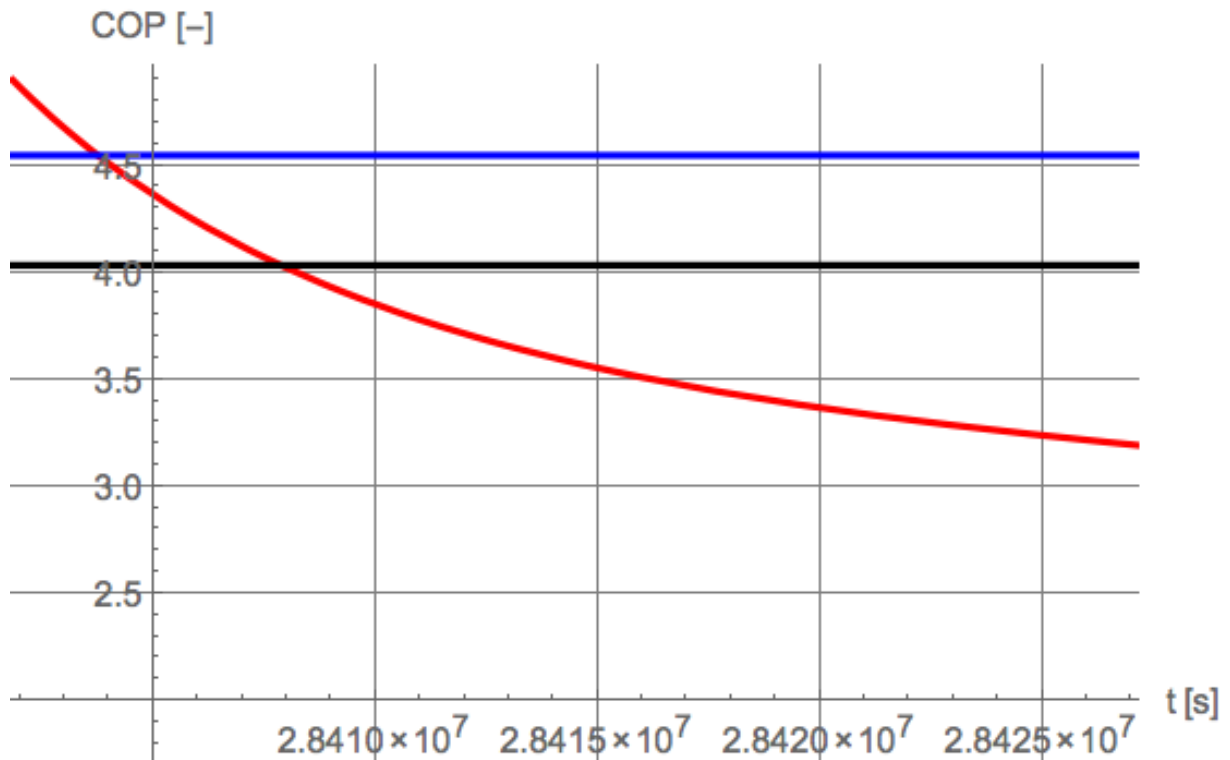
Stejně jako v případě vytápění nás zajímá, jak se bude měnit COP v závislosti na použité vstupní simulované teplotě – skutečná teplota, denní průměrná teplota, průměrná teplota za příslušné období, ve kterém jsme ohřívali vodu. Vstupními parametry pro výpočet jsou hmotnostní průtok, objem nádrže, počáteční teplota vody v nádrži, požadovaná teplota v nádrži, čas začátku topení a elektrický příkon čerpadla. Ohřev vody v nádrži probíhá vždy na předem stanovenou teplotu, jak zachycuje tento graf:



Obr. 5: Ohřev na stanovenou teplotu

Ohřev na stanovenou teplotu v programu realizujeme tak, že počítáme ohřev po delší dobu (jakoby probíhal celý den) a řešením rovnice najdeme čas, ve kterém dosáhne teplota vody v nádrži požadované hodnoty. Mezi začátkem ohřevu a tímto časem odečteme hodnoty energií a získáme velikost spotřebované elektrické energie.

Následující graf zobrazuje průběh skutečného COP – červená , COP z denního průměru teploty-modrá a COP z průměrné teploty za dobu ohřívání dobu ohřívání – černá. Můžeme si všimnout, jak COP klesá za dobu ohřevu nádrže, díky růstu teploty vody v nádrži TA.



Obr. 5: Průběh příslušných COP

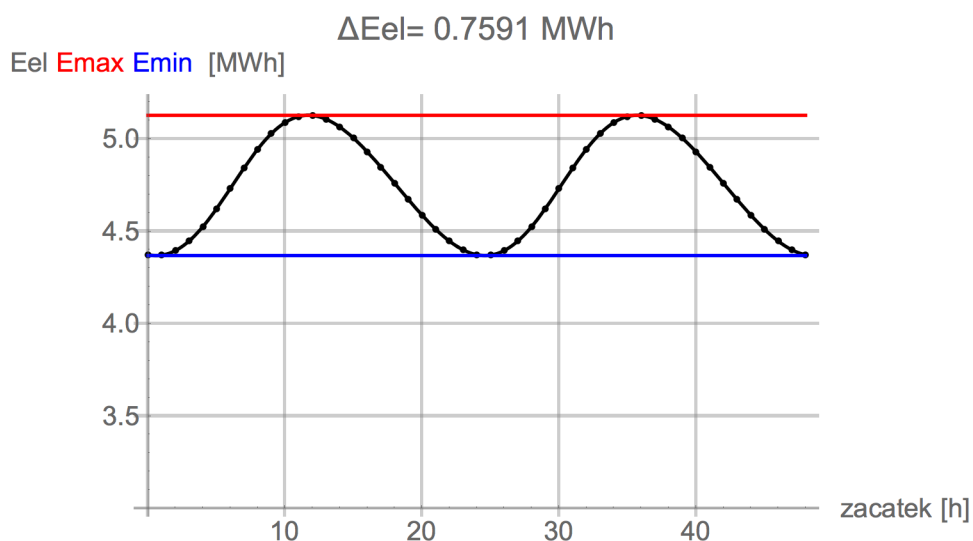
Vyhodnocení:

E_{meanEL} [MJ]	E_{realEL} [MJ]	E_{topna} [MJ]	COP_{Tprum} [-]	COP_{Real} [-]	$COP_{PrumDenni}$ [-]	Chyba E_{meanEL} [%]	Chyba $E_{meanELDenni}$ [%]
46,8	50,8	188,4	4,03	3,72	4,55	7,83	18,24

Tab. 1: Vyhodnocení energií a COP

V programu příloha5.nb je vyčíslena chyba způsobená uvažováním denní průměrné teploty a průměrné teploty za dobu ohřevu. V obou případech při použití průměrných teplot vzduchu je také v COP použita průměrná teplota vody v nádrži. Pro praxi je zajímavá chyba výsledku při použití denní průměrné teploty a průměrné hodnoty vody v nádrži: tyto hodnoty by použil při výpočtu ten, kdo nemá k dispozici programové prostředí umožňující použití skutečných průběhu teplot. Ve všech případech uvažujeme tepelné čerpadlo s carnotskou hodnotou COP a systém bez doplňkového ohřevu. Zájemce si může snadno upravit použitý kód pro parametry konkrétního tepelného čerpadla.

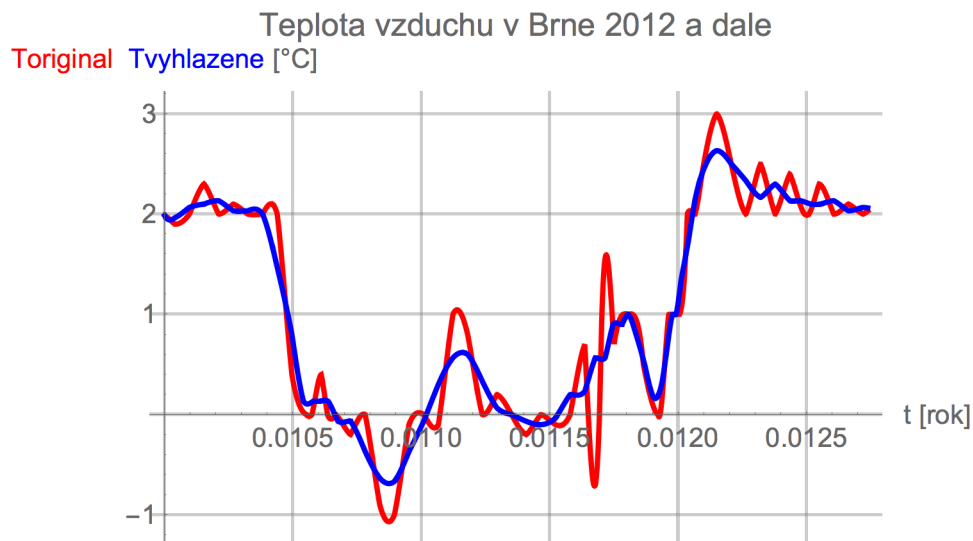
Ve výpočtech jsme uvažovali spouštění tepelného čerpadla podle denního rozvrhu potřeby teplé vody, a to bez ohledu na teplotu okolního vzduchu. Kdybychom například měli dvě shodné nádrže, můžeme jednu ohřívat tepelným čerpadlem podle minima spotřeby (například známe-li předpověď počasí) a druhou vybijeme podle potřeby teplé vody. Investičně je tato varianta dražší a tepelné ztráty jsou větší. Na druhou stranu u dobře zaizolované nádoby ve srovnání s potřebou tepla na ohřev vody jsou ztráty zanedbatelné. Výhodou je, že nemusíme řešit promíchávání teplé a studené vody v jedné nádobě při současném vytápění. Vytápěná nádoba pracuje v režimu, při kterém je „dokonale míchána“, a vybijená nádrž je jako běžný boiler. V dalších výpočtech budeme simulovat posuny začátku nikoli podle předpokládaného počasí, ale po hodině: simulovaná teplota má roční a denní periodicitu, a tak posun v čase znamená posun k větším či menším teplotám.



Obr. 6: Energetická náročnost přípravy TUV jako funkce počátku ohřevu – simulovaný chod teploty

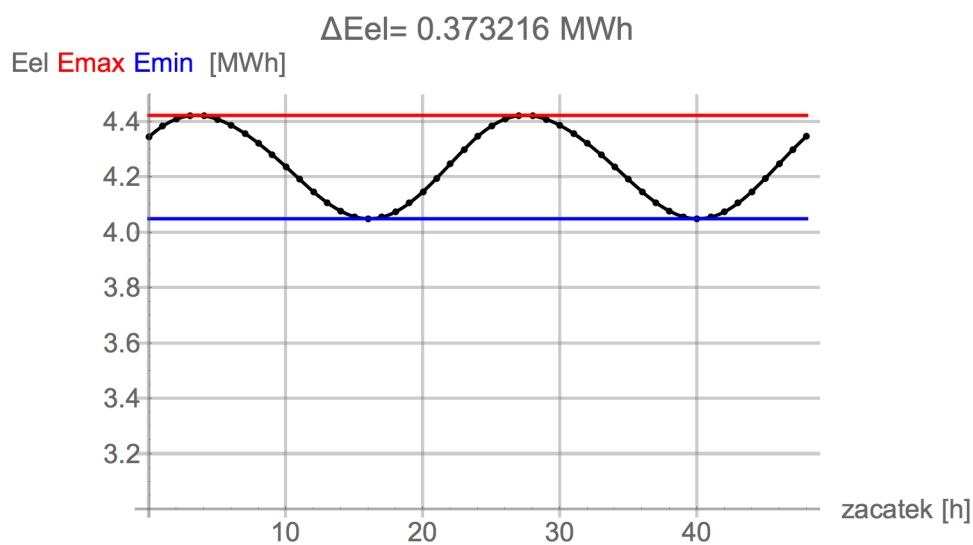
Výsledky jsou zajímavé. Finanční úspora je na úrovni nízkého napětí podle tarifu cca dva až tři tisíce korun ročně. Naskytá se nyní otázka, jaké výsledky bychom získali optimalizací podle předpokládané teploty okolního vzduchu a podle tarifu. Podle sdělení vedoucího diplomové práce by se otázka mohla zkoumat v rámci bakalářské práce s využitím naprogramovaných kódů, nejlépe s implementací parametrů reálných tepelných čerpadel. Při výpočtech bylo použito opět Carnotské tepelné čerpadlo. Důvodem je podstatně rychlejší běh programu. I tak vyčíslení úhrnných energií s použitím Carnotského čerpadla pro posuny začátku vytápění trvalo řádově minuty. Oba topné faktory jsou poměrně dobré, což je dáno tím, že voda v nádrži má teplotu v průměru jako například podlahové vytápění a navíc jsou uvažovány i letní měsíce. Poznamenejme, že spouštění tepelného čerpadla pro přípravu teplé vody je v podstatě úloha řízení, pro zvolený systém (který ovšem spouštění tepelného čerpadla podle zvolených kritérií umožňuje, což je především investičně dáno dostatečným akumulacním objemem zásobníku teplé vody) tedy úloha SW a lze předpokládat s rozvojem smart řešení a internetu, že bude i používána. Systém samo sebou může být „inteligentnější“, pro omezený prostor pro tuto problematiku, je v diplomové práci uvažovaná konstantní potřeba teplé vody každý den, což není vždy pravda. Rozšíření může být o znalost stavu nabití

zásobníku teplé vody a implementace předpovědi počasí atd., což je jistě zajímavým tématem dalších zkoumání.

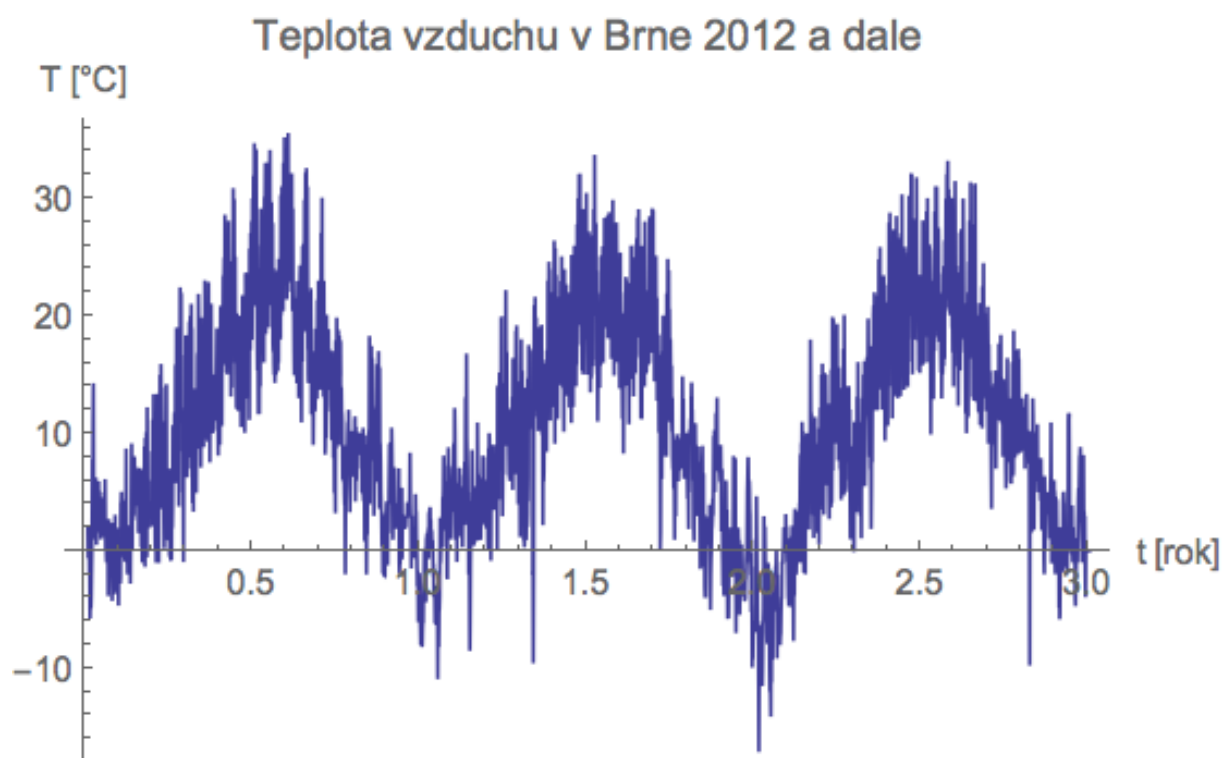


Obr. 7: Teplota vzduchu s krokem čtvrt hodina a hodina

Vidíme, že použití postupného průměru nevede k výraznému snížení výpočetního času. Důvodem je pravděpodobně, že čas není až tak prodloužen z důvodu, že příkaz NDSolve pro „méně hladké“ teploty používá kratší krok, ale že déle trvá vyčíslení teploty jako funkce času. Objekt InterpolatingFunction tedy vrací při datech velikosti řádu MB teplotu podstatně pomaleji, než simulovaný „dvojsinusový“ časový průběh teploty. Podle sdělení vedoucího by možno podstatně zrychlit kód použitím vlastní naprogramované numerické metody, nicméně ne natolik, aby bylo možno prozkoumat podstatně více případů. Dále tedy bude počítáno s teplotami, jak byly získány.



Obr. 8: Energetická náročnost přípravy TUV jako funkce počátku ohřevu – pro reálný chod teplot



Obr. 9: Použitá časová závislost teploty venkovního vzduchu

4. Problematika potřebného topného výkonu v čase

Simulovat kompletní chování reálné budovy s reálným otopným systémem a reálným tepelným čerpadlem kompletně, například metodou konečných prvků, je v současnosti velice obtížné a časově náročné. Abychom se v konečném čase dobrali výsledků, musíme použít zjednodušený model chování budovy. Přijmeme tedy následující zjednodušení:

Při výpočtu výkonu potřebného na krytí ztrát větráním budeme uvažovat okamžité hodnoty vnější teploty, tedy tak jak se mění rozdíl mezi vnitřní teplotou okolního vzduchu, tak se mění okamžité i potřebný výkon. Budovu budeme uvažovat jako jeden objem s jednou a to konstantní teplotou vzduchu. Tento požadavek by byl velmi dobře splněn v budovách s nuceným oběhem vzduchu a pravděpodobně dobře splněn i v ostatních případech.

V případě oken a dveří zanedbáme jejich tepelnou kapacitu, která je podstatně menší než kapacita zdí. Navíc rychlost přechodných dějů popsaných FK rovnicí klesá s druhou mocninou velikosti objektu. Jsou-li dveře například 20 krát tenčí než obvodová zeď a měly-li by stejné látkové vlastnosti, bude se teplotní profil v nich měnit cca 400 krát rychleji, odpovídající výkon bude tedy téměř sledovat změny teploty okolního vzduchu.

Solární zisky uvažujeme nulové. Stejně jako vnitřní zdroje tepla. Přiznáváme, že toto je nejvíce diskutabilní zjednodušení. Nicméně sluneční zisky jsou podstatně hůře předpověditelné, než průběhy teplot. Když pro výpočet tepelných ztrát využíváme průměrné teploty za například dobu dlouhou 50 let a budeme uvažovat 50 letou dobu života budovy při daném způsobu užívání, statistika nám dává značnou pravděpodobnost, že úhrnná spotřeba energie bude odpovídat skutečnosti. Pro oslunění nemáme podrobné mapy s průběhy oslunění a navíc do hry vstupuje oblačnost atd. Z těchto důvodů nemáme lepší metodu pro zahrnutí solárních zisků než obvyklý výpočetní způsob. Pro zájemce doporučujeme analýzu ing. Richarda Najmana (odkaz disertační práce). Navíc vytvořené programy umožňují zadání časového průběhu potřebného topného výkonu jako funkci času. Zájemce tedy může pro konkrétní období, pokud by měl znalost solárních zisků například ze záznamu o výkonech FV el v dané oblasti, program snadno upravit a použít. Co se týče vnitřních zdrojů tepla, například

z osob, živočichů, el. spotřebičů, atd., by se dal zahrnout naprosto stejným způsobem. Naše modelová budova je ve tvaru krychle vždy zastíněná s udržovanou konstantní vnitřní teplotou a téměř neobydlená.

Výkon na krytí ztrát podlahou uvažujeme konstantní. Jelikož je budova poměrně velká, oproti vrstvě zeminy, pod kterou jsou již změny teploty dané ročním chodem zanedbatelné (všichni známe pojem nezámrazná hloubka), lze považovat tento předpoklad za oprávněný.

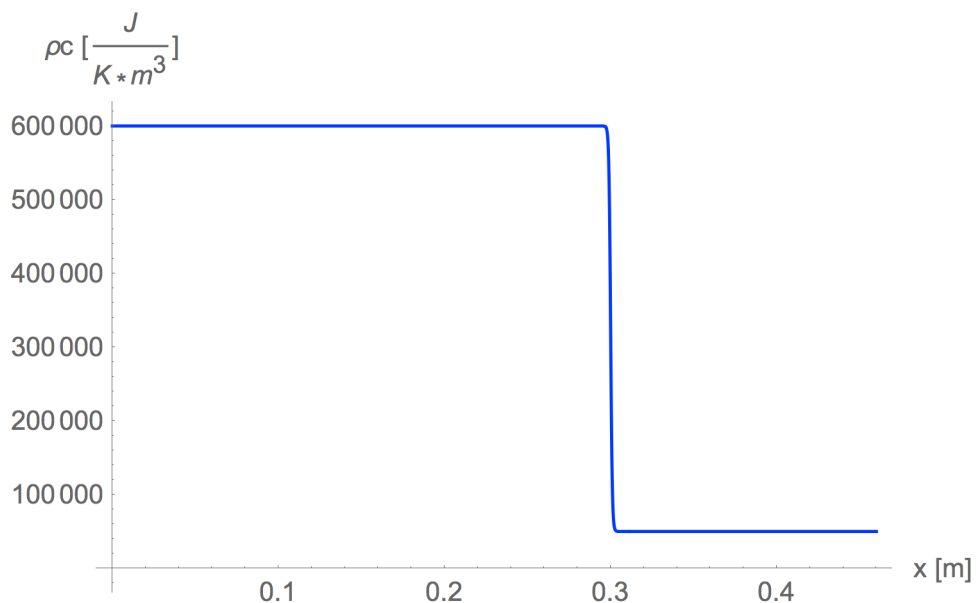
Výkon potřebný na krytí ztrát zdi a střechou je složitější a bude pojednán podrobněji. Výpočet výše uvedených výkonů může snadno provést i nepříliš poučený uživatel systému excel.

4.1 Problematika průchodu tepla zdí

Zdí rozumíme rovinnou stěnu o materiálových vlastnostech a geometrii popsaných v programu. Zeď je tvořena dvěma vrstvami, cihlovou zdí směrem dovnitř interiéru a tepelnou izolací směrem do exteriéru. Výpočty provádíme pro jeden metr čtvereční povrchu stěny. Vliv toho že u hran a rohů uvažované není teplotní pole 2D ale 3D zanedbáváme stejně tak jako tepelné mosty a tepelné vazby. Za počáteční podmínku FK rovnice bereme konstantní hodnotu po řezu zdí rovnou průměrné denní teplotě v daném čase. Jelikož počáteční podmínka se v disipativním systémech „zapomíná“ a my provedeme výpočet pro několik dnů a vezmeme jen hodnoty z konce časového intervalu, toto zjednodušení nevádí. Okrajové podmínky volíme konvektivního typu pro konstantní běžně používaného součinitele prostupu tepla na vnitřním a vnějším povrchu stěny. Bez znalosti časového průběhu rychlosti větru na vnějším povrchu budovy není ostatně jiný způsob možný. Toto zjednodušení navíc nevádí, protože uvažujeme moderní dobře zaizolovanou metodu, kde dominantní část konstrukce tvoří tepelný odpor vnější izolace, je vnější součinitel přestupu tepla na vnější obálce zanedbatelný. Co se týče součinitele prostupu tepla na vnitřní straně, tak obvykle používaná hodnota je $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ bývá v literatuře zahrnutím sáláním do úhrnného součinitele přestupu tepla. Tento postup lze považovat za chybný. Sálání se v průteplivém prostředí, jakým je neznečištěný vzduch, realizuje mezi povrchy těles. V našem modelu je ovšem v každém bodě vnitřního povrchu stěny teplota stejná, o málo nižší než teplota vzduchu v interiéru. Celkový

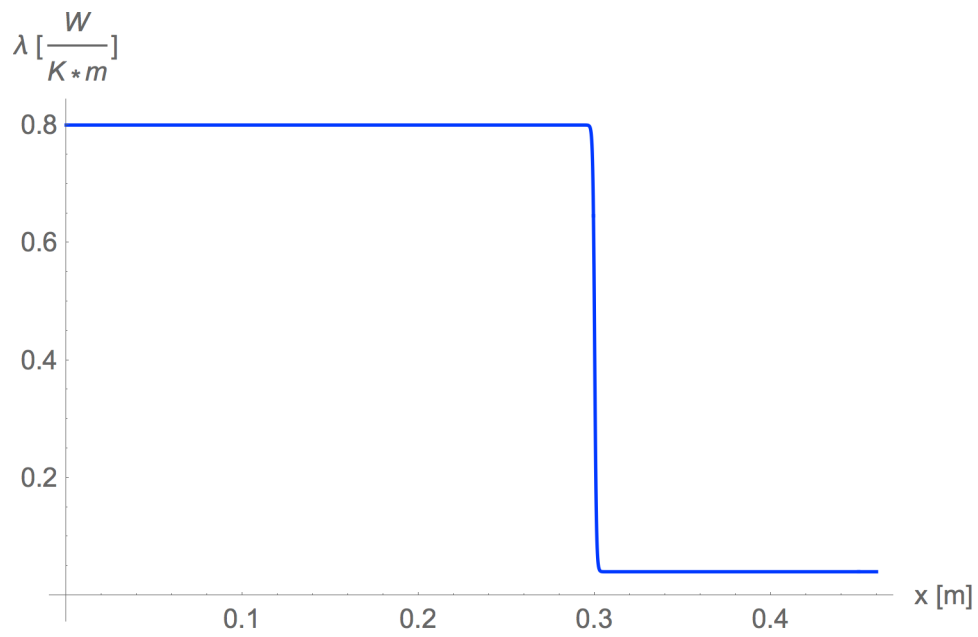
sálavý výkon je tedy nulový. Nicméně hodnota kolem jednoho wattu na metr čtvereční a kelvin vycházející z výpočtu samovolné konvekce je skutečně příliš nízká a neodpovídá pozorovaným hodnot teplot. Vysvětlení je pravděpodobně jiné: v reálných budovách je prakticky vždy i nenulová rychlost vynuceného proudění, například způsobená pohybem osob atd. Přesný výpočet součinitele přestupu tepla na vnitřní straně zdi je tedy prakticky nemožný bez znalosti rozložení vzduchu proudění ve vnitřku budovy, bereme proto obvykle konstantní hodnotu. Materiál vrstev stěny je modelován prostorovou změnou látkových vlastností. Poznamenejme, že důvodem toho je, že se nepodařilo jiný způsob ve zvoleném SW naprogramovat a při tomto přístupu platíme za jednoduchost programování, zvýšenou dobou výpočtu, protože je nutno pečlivě nastavit časový a prostorový krok tak, aby řešení odpovídalo realitě a solver „nepřehlédl“ prostorovou změnu látkových vlastností. Postupujeme zejména podle [8].

Uvažovaná závislost součinu hustoty a měrné tepelné kapacity:



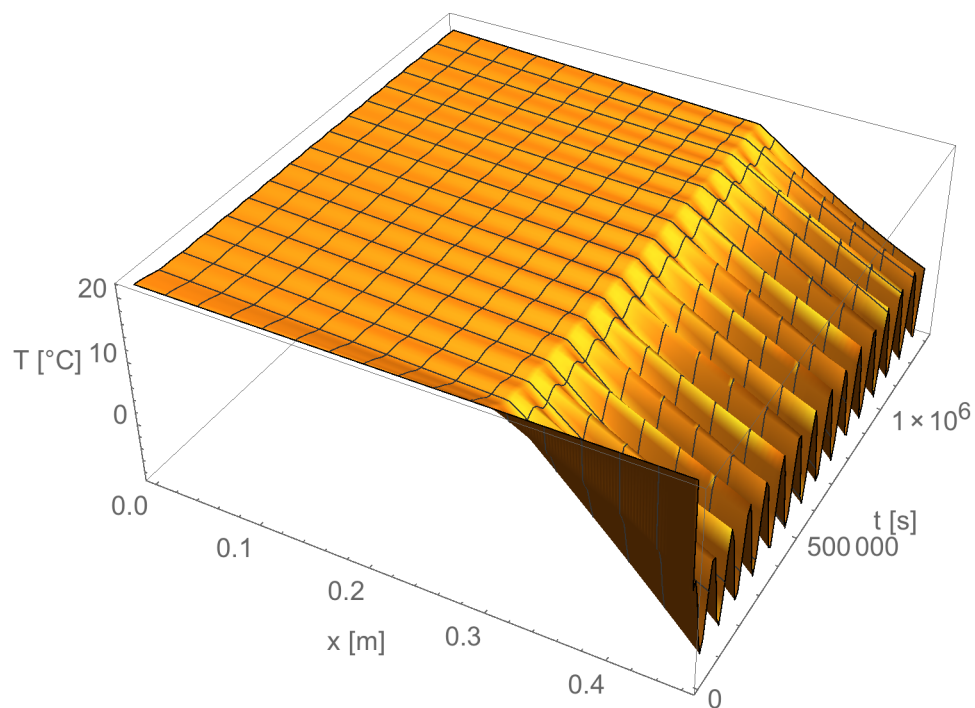
Obr. 10: Uvažovaná závislost součinu hustoty a měrné tepelné kapacity

Uvažovaná závislost součinitele tepelné vodivosti:



Obr. 11: Uvažovaná závislost součinitele tepelné vodivosti

Ukázka teplotního pole ve zdi:



Obr. 12: 3D graf teplotního pole ve zdi

Troj rozměrný graf může lahodit oku, pro naše účely je však podstatný tepelný tok na vnitřním povrchu zdi. Vytvoříme si tedy následující funkce:

vykonZedReal – která pro daný okamžik z vypočteného časového intervalu vrací hodnotu výkonu z vnitřního prostředí do jednoho metru čtverečního vnitřního povrchu zdi. Tuto hodnotu budeme považovat za „správnou“.

vykonZedPrum – která vrací výkon odpovídající ustálenému vedení tepla ve zdi za situace, kdy je konstantní vnitřní teplota vzduchu a konstantní venkovní teplota, která je brána jako průměrná denní teplota v uvažovaném čase.

vykonZedFict – fiktivní výkon vedení tepla jedním metrem čtverečním vnitřního povrchu zdi při uvažování skutečného tepelného odporu zdi a nulové měrné tepelné kapacity. Tento výkon by odpovídal klasickému výpočtu tepelných ztrát průchodem zdí při uvažování časově proměnných teplot a vzorce odvozeného pro konstantní teploty v čase.

Proč zbylé dva výkony počítáme? výkonZedReal je nejobtížněji výpočetně dostupný a ani pokročilý uživatel SW excel by velmi pravděpodobně nedokázal bez použití VBA výpočet realizovat. Je samozřejmě možné použití free solveru typu Agros 2D, které ovšem neumožňují naprogramování rovnic obvodů s tepelnými čerpadly, takže by výsledky těchto řešičů musely být vstupem dalších programů. Výpočty, které by využívaly výkonu výkon zedPrum a výkon zedFict, by například v prostředí excel byly realizovatelné velice snadno. Protože autor vytvořil ve své bakalářské práci modely chování bivalentních tepelných soustav s reálnými parametry tepelných čerpadel, které mají implementovanou závislost potřebného tepelného výkonu jako statickou funkci okolní teploty, bylo by použití výkonu zedFict nejsnazší. Důvod je jednoduchý. Pokud je potřebný výkon statickou funkcí teploty (statickou holonomní) funkcí teploty, jejíž výpočet neobsahuje excipitae čas ani derivace podle času, je možný následující postup: bilanční rovnice tepelné soustavy s tepelným čerpadlem vyřešíme několikrát pro například pro okolní teploty od nejnižší možné v dané oblasti, po teploty při kterých se již zcela netopí, tedy například od -30 do +15 °C s krokem 0,5 K a vytvoříme si interpolační funkce odpovídající potřebným veličinám, například topného výkonu a COP. Tyto jednou pro dané parametry daného systému vypočtené funkce, pak při vyhodnocování chování systému při časově

proměnlivé venkovní teplotě pouze s minimální časovou náročností voláme. Vyhodnocení je pak programátorsky jednoduché a časově efektivní. Pokud by bylo nutno použít výkon `zedReal` je nutno celý systém vyřešit pro každou časovou hodnotu.

Pro vyhodnocení chyby daném použitím výkonů `zedFicz` a `zedPrum` vytvoříme následující výkony pro celkovou modelovou aktuální tepelnou ztrátu budovy:

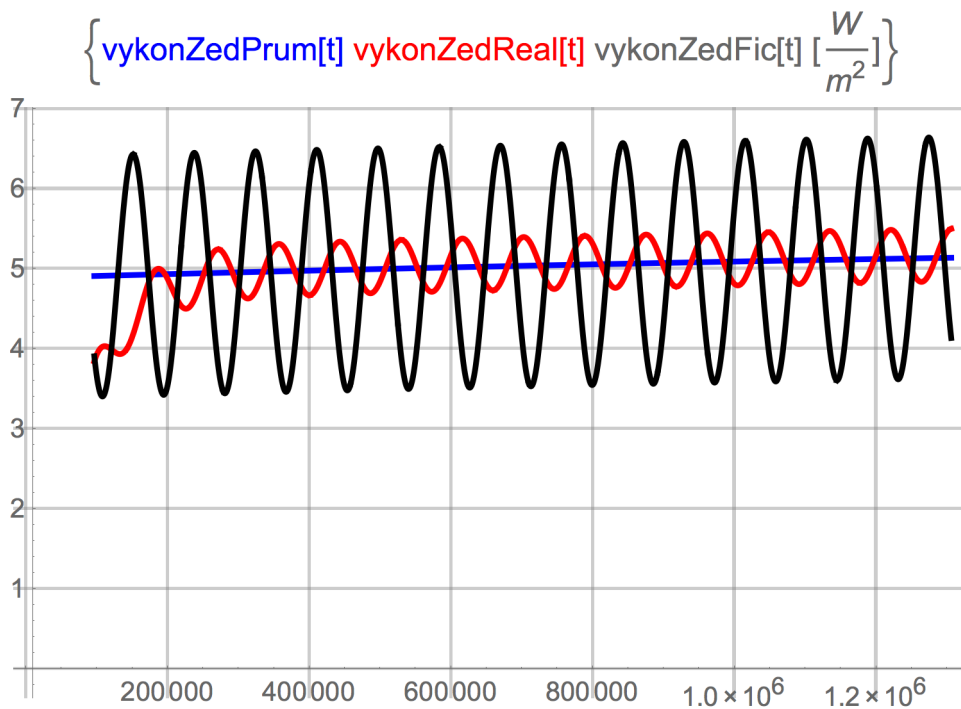
Označme `vykonOknaDverel`, `vykonVetrani`, `vykonZem`, potřebné výkony na krytí tepelných ztrát okny a dveřmi, větráním a tokem přes podlahu přízemí do zeminy.

Označme dále `vykonOstatniPrum` výkon který by vycházel při výpočtu výkonu na hrazení tepelné ztráty okny, dveřmi, větráním při použití statického výpočtu a průměrných denních vnějších teplot.

Označme dále (rovnice) $P_{Real} = \text{vykonZedReal} + \text{vykonOstatni}$, $P_{Prum} = \text{vykonZedPrum} + \text{vykonOstatni}$, $P_{fict} = \text{vykonZedFict} + \text{vykonOstatni}$, $P_{Konst} = \text{vykonZedPrum} + \text{vykonOstatniPrum}$.

Výkon P_{Konst} umožňuje úplně nejsnazší programovou implementaci výpočtů. Ale i použití P_{fict} i P_{Prum} umožňují využití předpočítaných interpolačních funkcí při řešení tepelných obvodů s tepelnými čerpadly. P_{Prum} ovšem při využití reálných dat vnějších teplot vyžaduje jeden krok navíc, je nutno vypočítat průměrné denní teploty v hodnoceném období.

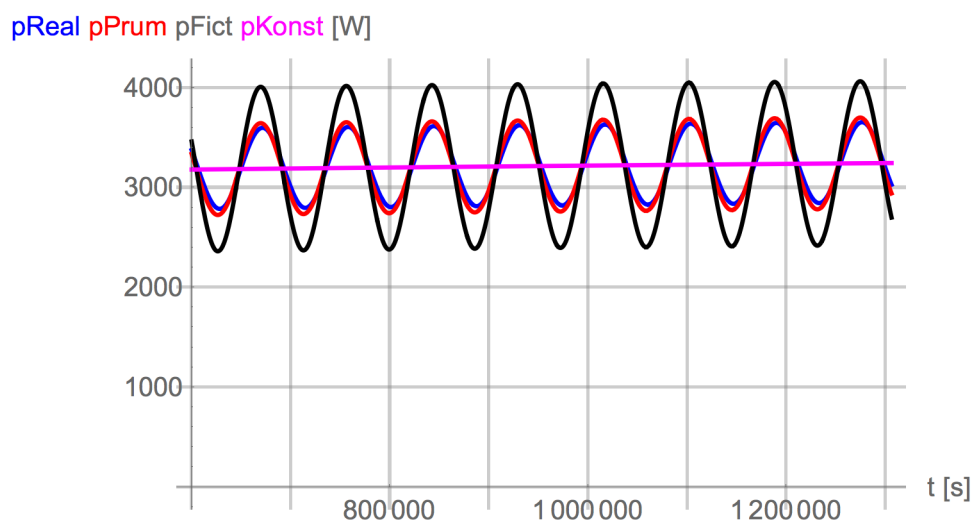
Pro jednu konkrétní situaci zobrazují vypočtené hodnoty následující grafy:



Obr. 13: Průběh vypočtených hodnot příslušných výkonů průchodem zdi

Vidíme poměrně značné rozdíly mezi vypočtenými tepelnými toky. Naštěstí průchod tepla zdi je u moderních dobře tepelně zaizolovaných budov často minoritní vůči tepelnému toku například okny a větráním. Mimochodem vytvořené programy umožňují zadat účinnost rekuperace tepla z větracího vzduchu. V programu je zvolená poměrně konzervativní tepla 60 %. Na grafu také vidíme doznívající přechodný děj daný neshodou zvolené počáteční podmínky s reálnou.

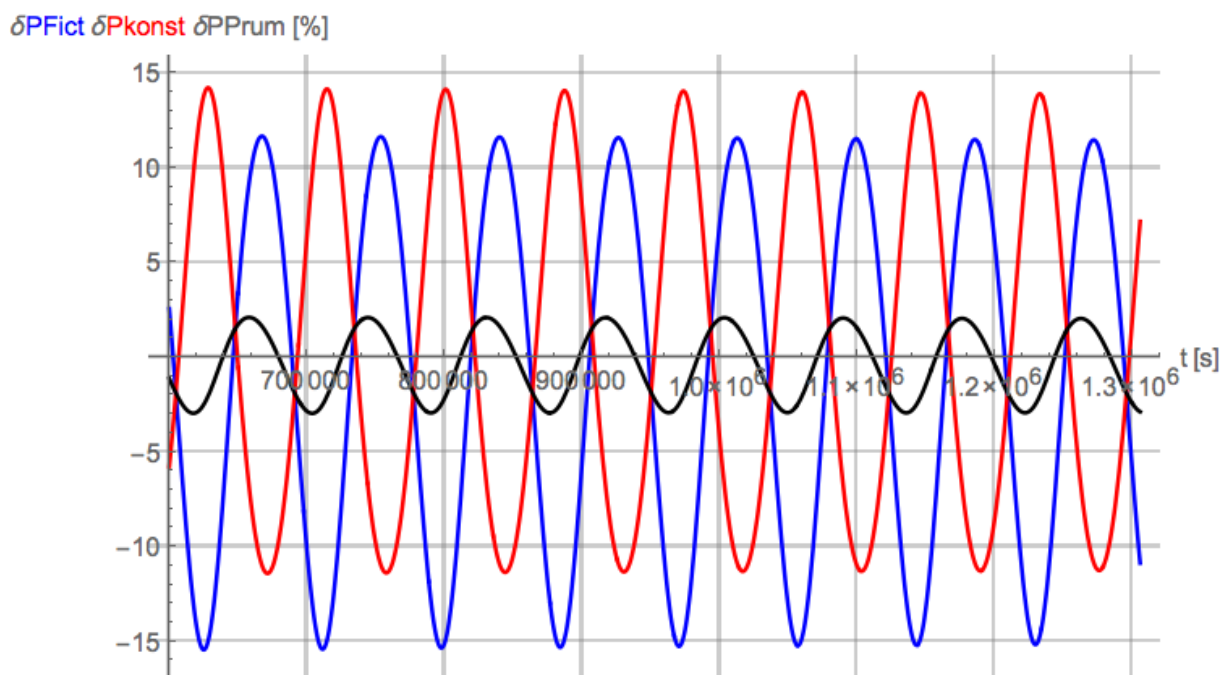
Pro další postup jsou podstatné hodnoty celkových výkonu, ve kterých je zahrnuta i geometrie obálky budovy. Výsledek pro časové období po odeznění počátečního přechodného děje:



Obr. 14: Průběh vypočtených hodnot příslušných výkonů

Zjišťujeme zajímavou skutečnost, že p_{Prum} a p_{Real} jsou téměř shodné. Už nyní vidíme, že náhrada p_{Real} hodnotou p_{Prum} musí být možná. Jelikož p_{Real} považujeme za „správnou“ a její náhrada hodnotou p_{Prum} nezanese do výsledku chybu pravděpodobně větší než přibližné znalosti látkových vlastností materiálu zdi a tepelně technických vlastností oken a dveří, máme svým způsobem vyhráno. Použití řešičů parciálních diferenciálních rovnic není nutné a výpočet je tak možný i v MS Excel bez větších programátorských znalostí.

Zobrazme si v následujícím grafu dále relativní chybu způsobenou použitím:



Obr. 15: Průběh chyb

Chyba použití PPrum je do 3% (vše pochopitelně za zvolených parametrů). To jsme předpokládali již z předchozích grafů. Chyba použití pFict je zhruba do 13% , pKonst do 15%. Zajímavé je, že podle výčtu se příliš chyba daná použitím pFict a pKonst příliš neliší. Při použití pKonst si můžeme představit, že chyba je dána tím, že pKonst kolísá „příliš málo“, nereflektuje změny dané denním kolísáním teploty. Na druhou stranu chyba daná použitím pFict je způsobená tím, že teplota kolísá „příliš mnoho“, nereflektuje tedy tepelnou a kapacitu a tepelnou setrvačnost zdi. Je pravděpodobné, že bude-li použitelná náhrada pomocí pFict, bude použitelná náhrada používající pKonst.

Na tomto místě je nutné zdůraznit, že uvedená chyba například 15% nepovede k chybě 15% určených výsledných ukazatelů. Důvodů jsou minimálně dva:

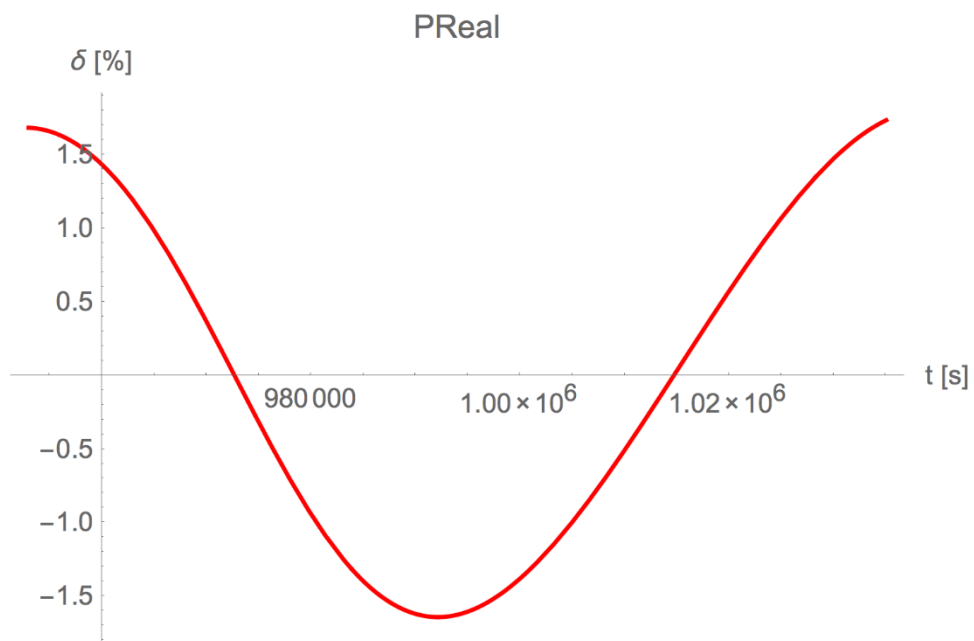
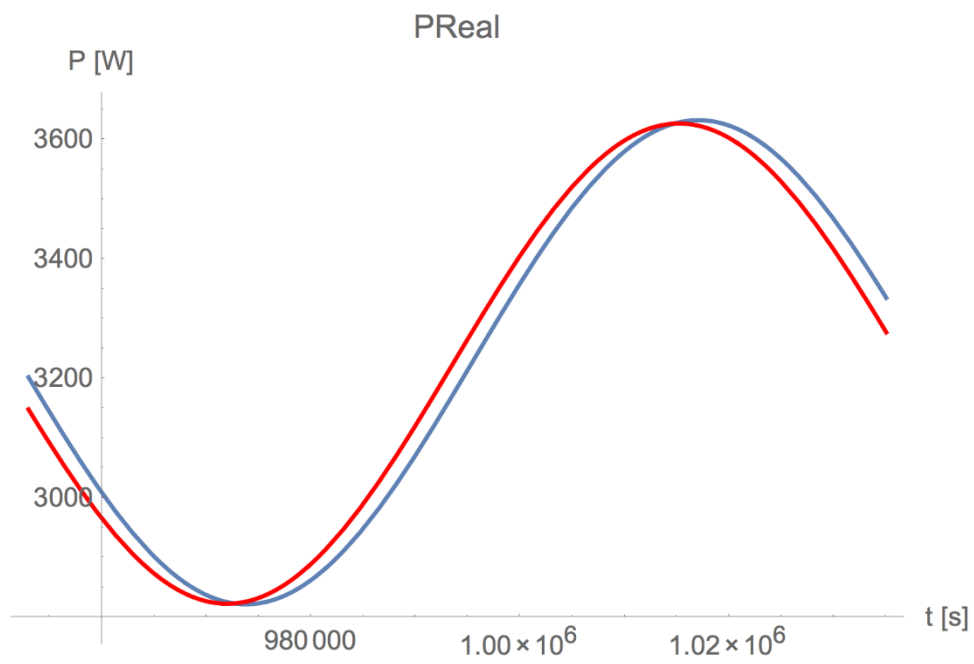
Odchylna 15% znamená horní závorku odchylky jako funkce času na zvoleném intervalu. Všimněme si, že všechny odchylky mají přes časový interval délky celočíselného násobku dnů nulovou střední hodnotu. Respektive tedy jejich použití znamená, že v jisté části dne výkon nadhodnocujeme a v jiné části podhodnocujeme. Kdybychom tedy vytápěli nějakým způsobem, jehož účinnost nezávisí na teplotě okolního vzduchu a teplotách vstupní

a výstupní vody v otopné soustavě (velmi dobře splněno například při použití elektrokotle, dobře splněno při použití moderních plynových kotlů, pokud jsou správně dimenzovány), tak použití p_{Konst} p_{Fict} p_{Prum} způsobí téměř nulovou chybu.

Z výše uvedeného plyne, že se chyba časového průběhu výkonu projeví přes chybu lokálního určení COP v daném čase. Je tedy značná naděje, že všechny náhrady budou použitelné a hlavní část chyby použitím průměrných časových hodnot na místo skutečných hodnot je způsobená chybou uvažované teploty venkovního vzduchu při výpočtu COP. Pokud toto bude platit, bude možno použít pro řešení otopných soustav statické metody využívajících interpolačních funkcí.

Kdybychom chtěli implementovat model otopné soustavy do programu `priloha2.nb`, kód by se stal poměrně nepřehledným. Proto si vytvoříme data z napočtených průběhů, která vyexportujeme na disk a simulaci systému s tepelnými čerpadly vytvoříme v dalším programu, který si tato data načte. Mimochodem tato data, kdyby se jen upravila do formátu csv, je možno použít v excelu.

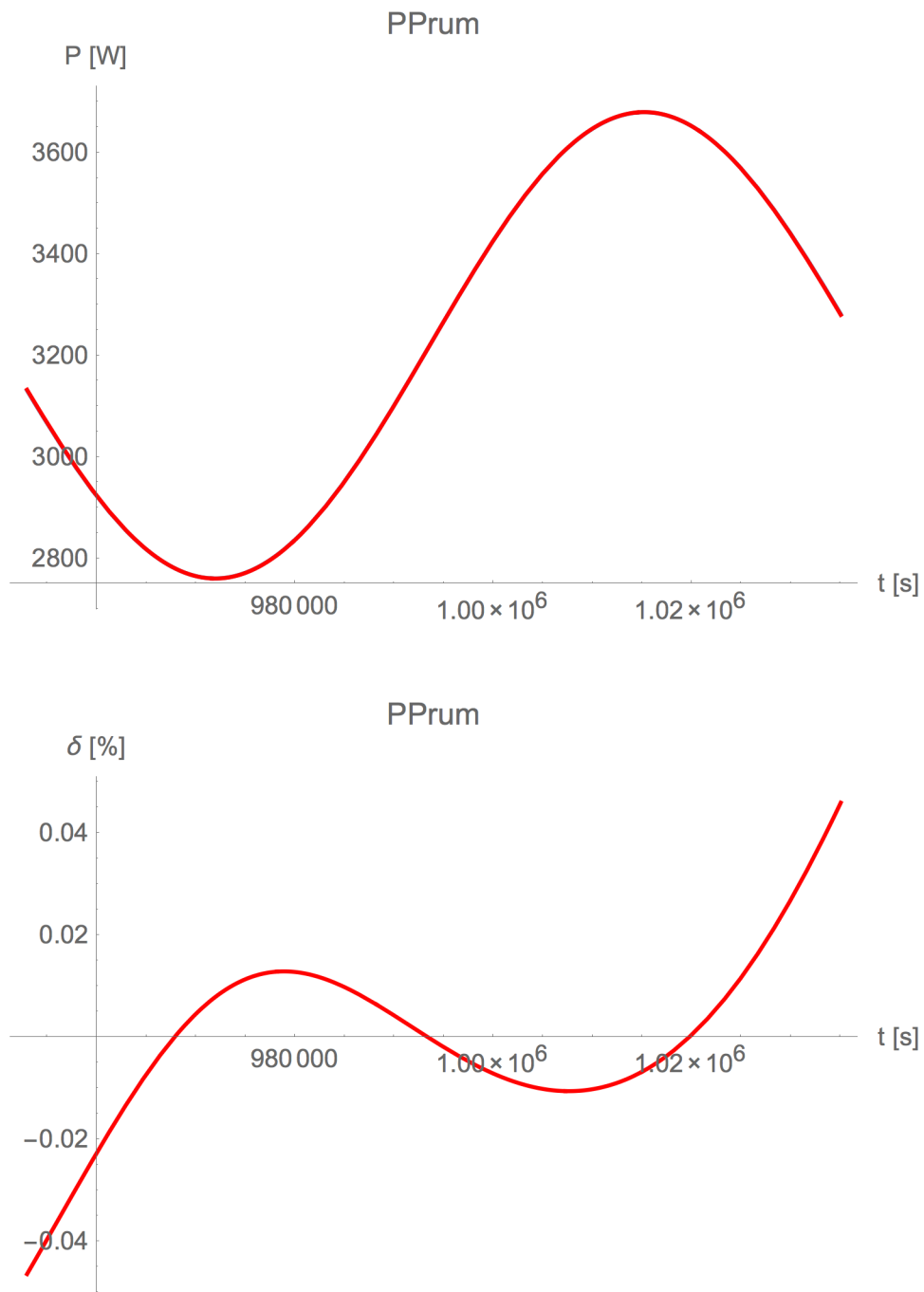
Další zpracování získaných dat je provedeno v souboru `priloha3.nb`. V předchozím bylo ukázáno, že se lze obejít bez řešení parciální diferenciálních rovnic. Klíčovou otázkou pro snadnou řešitelnost problému je, zda je možno najít lineární závislost mezi příslušným potřebným výkonem a uvažovanou okolní teplotou. Pokud by tomu tak bylo, stane se systém holonomním a je možné použít interpolační funkce, pro vyhodnocení chování systému. Byly provedeny následující numerické experimenty. Z napočtených dat ve tvaru časových závislostí teploty okolí a průměrné teploty okolí a příslušných výkonů byla vytvořena data $\{T_i, P_i\}$, a to pro časy z období o málo kratšího než jeden den (den uvažujeme jako periodu přirozeného kolísání teploty). Nalezené lineární proklady pak byly porovnány s původními časovými průběhy. Výsledky ukazují následující grafy:



Obr. 16 a Obr. 17: Srovnání a chyba při použití P_{Real}

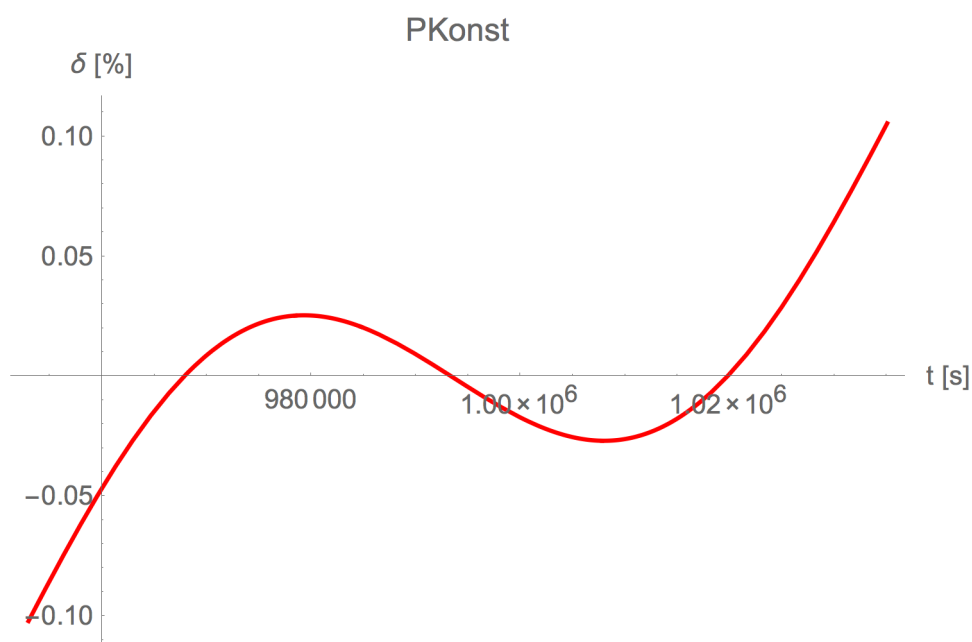
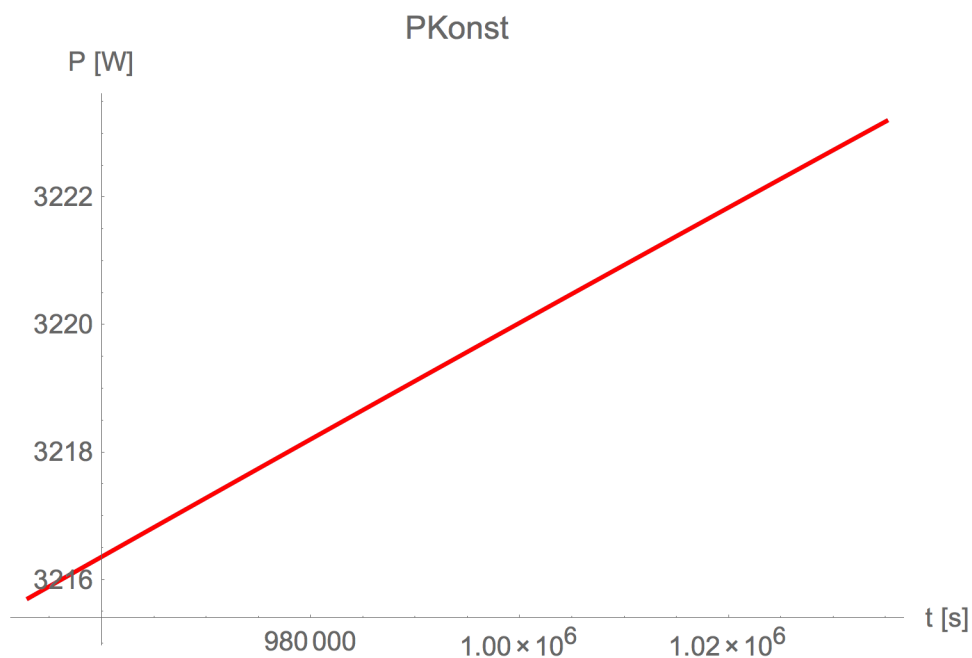
Na grafu vidíme (modrá čára) skutečný průběh vypočítaného potřebného topného výkonu uvažujícího řešení parciální diferenciální rovnice průchodu tepla zdí. (červená čára) výkon vzniklý tak, že uvažujeme lineární závislost tohoto výkonu na vnější teplotě a do této nalezené lineární závislosti dosazujeme skutečné vnější teploty. Pravý graf ukazuje odchylku,

respektive chybu, použití linearizované závislosti místo skutečného řešení. Vidíme, že tato odchylka nepřesahuje 2%. Dále vidíme, že jde zejména o časové zpoždění. Modrá čára je v podstatě stejného tvaru jako červená čára, jen posunutá doprava. A navíc střední hodnota odchylky je nulová, a tedy střední hodnota obou grafů stejná. Jelikož se vlastně jedná o to, že počítáme s časovým zpožděním v podstatě shodným výkonem, bude chyba vzniklá použitím lineárního prokladu podstatě menší, než zobrazená 2% tedy pro konečné závěry nepodstatná.



Obr. 18 a Obr. 19: Srovnání a chyba při použití PPrum

Modrou čáru, tedy původní časový průběh potřebného výkonu v situaci PPrum, nevidíme, neboť je zcela překryta červenou čarou odpovídající lineárnímu prokladu. Na pravé části vidíme, že chyba způsobena použitím linearizace nepřesahuje 0,05 % a tudíž se jí v podstatě nemusíme zabývat.



Obr. 18 a Obr. 19: Srovnání a chyba při použití PKonst

Pokud získáme proklad, tedy lineární závislost s použitím teplot odpovídající situaci PKonst, a aplikujeme jej na skutečný průběh venkovní teploty (červená čára) vidíme, že se průběhy takřka nepodobají, přesto použití této linearizace způsobí v hodnotě potřebného topného COP chybu menší než 0,15 %.

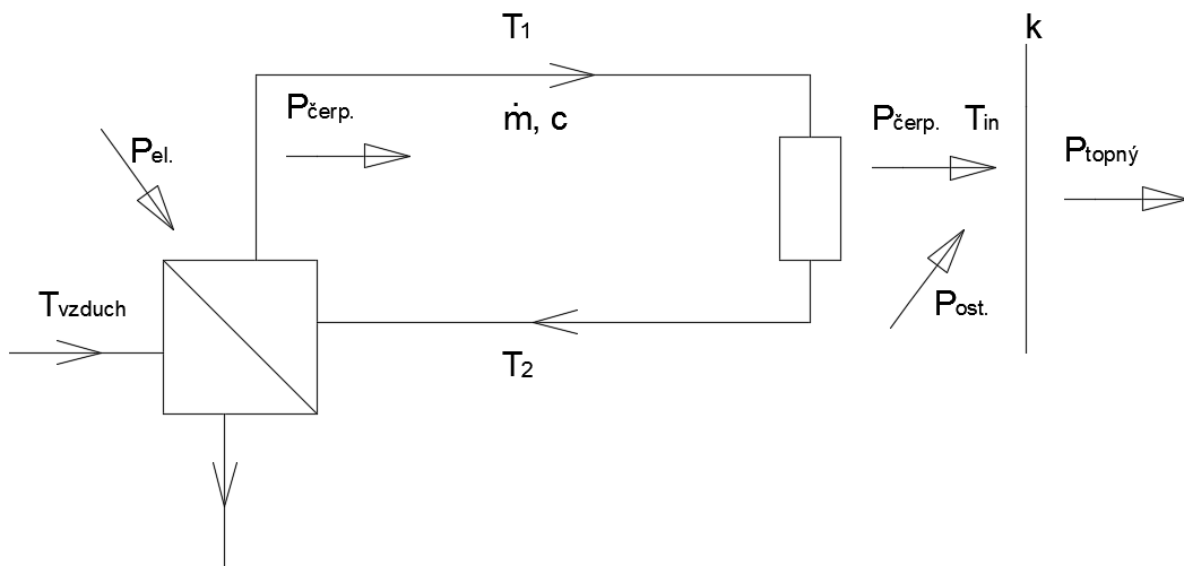
Výpočet chyby vzniklé použitím výše uvedených zjednodušení je realizován v notebooku priloha3.nb. Výpočet chyby pro 1 den s vnější teplotou simulovanou jako denní sinusové kolísání teploty okolo průměrné denní teploty, monovalentní provoz a carnotské tepelné čerpadlo ukázal, že chyba určení potřebné elektrické energie je asi -0,7 %, chyba celkové topné energie -0,5 % a chyba COP asi 0,15 %. V situaci, kdy použijeme linearizovaný průměr namísto řešení systému uvažujícího tepelnou setrvačnost zdi, je chyba naprosto zanedbatelná vůči nejistotám vstupních údajů. Chyby vzniklé použitím PFict - chyba potřebné elektrické energie je asi -1,7 %, chyba celkové topné energie -0,22 % a chyba COP asi 1,9 %. Je nutno přiznat, že pro nedostatek času nebylo provedeno více simulací pro stavy a jiné než carnotské čerpadlo. Pracovníci katedry elektroenergetiky se ale pokusí prozkoumat problematiku linearizovaných náhrad potřebného topného výkonu u systému s tepelnou setrvačností podrobněji a výsledky zúročí v publikaci. Nicméně výše uvedené chyby jsou skutečně zanedbatelné proti nejistotám vstupních údajů a použitých zjednodušení. Dále budeme pokračovat již s použitím linearizace potřebného topného výkonu. Za vytápěný objekt použijeme objekt použitý z bakalářské práce, který je v podstatě ve tvaru PFict.

5. Případová studie výpočtu bilančních energií bivalentního systému s reálným tepelným čerpadlem

Všechny numerické experimenty, které jsme prováděli v předchozích kapitolách, neuvažují ve svých výpočtech otopnou soustavu s tepelným čerpadlem. Abychom mohli získaná data využít k výpočtům s tepelnými čerpadly, musíme mít k dispozici následující model, který byl vytvořen v rámci bakalářské práce [3]. Pomocí matematického modelu soustavy jsme schopni získat potřebnou elektrickou energii pro provoz čerpadla, potřebnou tepelnou energii pro vytápění a COP. Výsledky jednotlivých variant porovnáme a stanovíme chybu výpočtu.

Model vždy popisuje tepelný obvod otopné soustavy s tepelným čerpadlem a příslušným bivalentním zdrojem, přičemž bivalentní zdroj, je-li potřeba, může pomáhat tepelnému čerpadlu ohřívat přímo vzduch interiéru.

Model otopné soustavy s tepelným čerpadlem a bivalentním zdrojem pracujícím do vzduchu



Obr. 20: Model otopné soustavy s tepelným čerpadlem, zdroj [3]

Vysvětlivky:

- T_{vzduch} – venkovní teplota [$^{\circ}\text{C}$]
- P_{el} – elektrický příkon tepelného čerpadla [W]
- $P_{\text{čerp.}}$ – výkon vyprodukovaný tepelným čerpadlem [W]
- \dot{m} – hmotnostní průtok vody v otopné soustavě [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$]
- c – měrná tepelná kapacita vody [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
- T_1, T_2 – teploty vody v daných místech otopné soustavy [$^{\circ}\text{C}$]
- P_{ost} – výkon dodaný ze dřeva [W]
- T_{in} [$^{\circ}\text{C}$]
- $P_{\text{topný}}$ – celkový topný výkon dodaný objektu [W]
- k – konstanta topení [-]

Dále vytvoříme soustavy rovnic, které popisují tento tepelný obvod v jednotlivých provozních stavech, a také rovnice pro získání potřebných parametrů.

První soustava rovnic je pro identifikaci známého stavu. Po jejím vyřešení získáme hodnotu hmotnostního průtoku \dot{m} a konstantu topení k . Vstupními parametry jsou: hodnota topného výkonu P_{top} , teploty v daném místě soustavy T_1 , teplotní spád ΔT , T_{in} a měrná tepelná kapacita vody c .

$$T_2 = T_1 + \Delta T$$

$$\dot{m}c(T_1 - T_2) = P_{top}$$

$$P_{top} = k\left(\frac{T_1 + T_2}{2} - T_{in}\right)$$

Provozní stav, ve kterém pracuje tepelné čerpadlo samostatně, popisuje tato soustava rovnic:

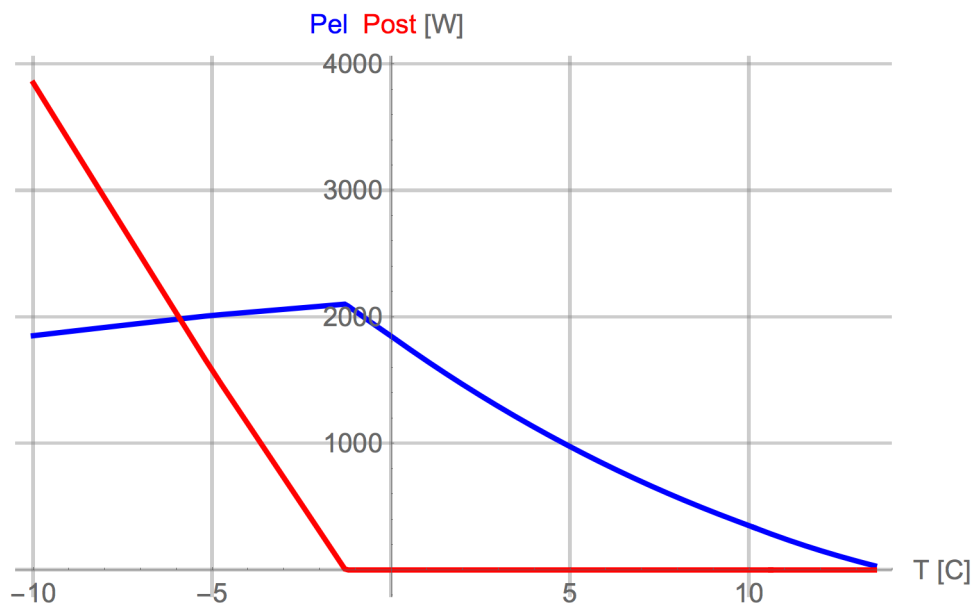
$$\dot{m}c(T_1 - T_2) = P_{top}$$

$$P_{top} = k\left(\frac{T_1 + T_2}{2} - T_{in}\right)$$

$$COP P_{el} = P_{top}$$

Výpočet je realizován v notebooku priloha4.nb. Zjednodušující předpoklady jsou kromě výše uvedených omezení použitého modelu (linearizovaný přestup tepla mezi otopnou soustavou a interiérem a následně exteriérem, statický model neuvažující tepelné kapacity prvků systému atd.) idealizovaný roční a denní chod teploty (lineární kombinace dvou sinusových průběhů jednoho s periodou rok a druhého s periodou den). Kód je ovšem vytvořen tak, že jedním ze vstupů je teplota jako funkce (času), takže je kód možno beze zbytku použít například pro interpolované minulé naměřené teploty atd. V programu je zjednodušeně vypočten začátek a konec otopné sezóny, kterou uvažujeme, kdy je průměrná denní teplota idealizovaného průměru teplot menší než 13 °C. Výpočet nejprve ze známého

stavu (zadaný topný výkon teplota vody vstupující do otopné soustavy a teplota interiéru) vypočte další parametry použitého modelu. Dále je vypočtena teplota hranice bivalence, tedy teplota, při které na 100 % svého výkonu běžící tepelné čerpadlo přesně pokryje potřebný výkon. Rovnice systému jsou řešeny pro dvě situace, tedy kdy pracuje pouze tepelné čerpadlo, a kdy doplňkový zdroj tepla dodává výkon do interiéru. Pro teploty mezi uvažovanou nejnižší a nejvyšší teplotou okolního vzduchu jsou s krokem 0,1 K vypočteny výkony Pel a Post. Z takto jednou vypočtených dat jsou vytvořeny interpolační funkce, které pro zadanou teplotu okolního vzduchu vracejí výkony Pel a Post.

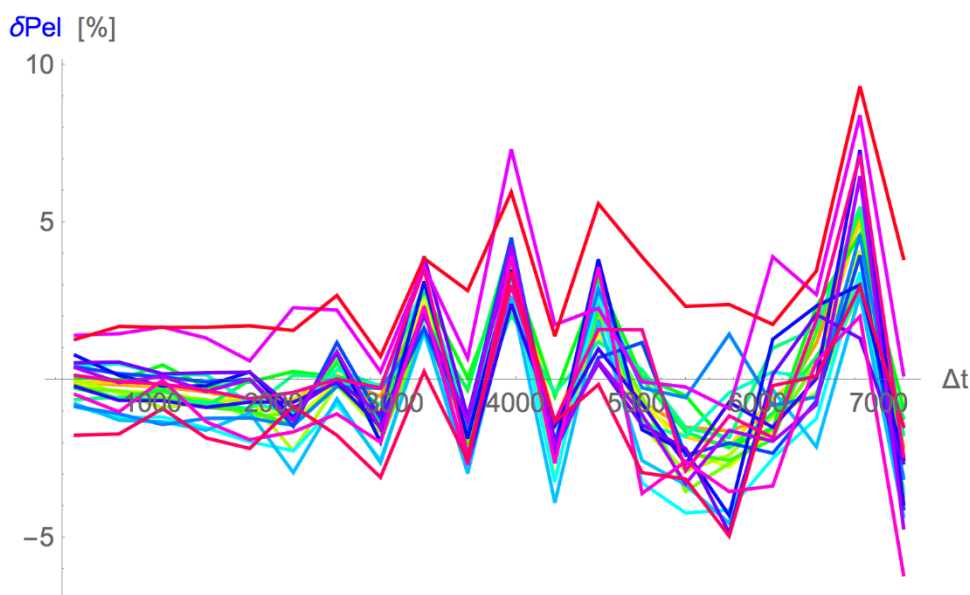
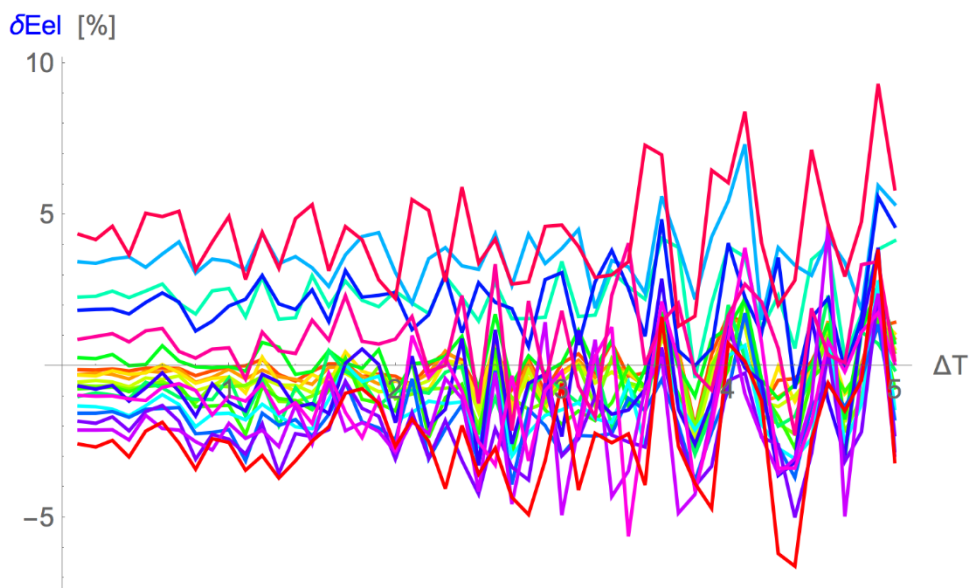


Obr. 21: Průběh Pel a Post v závislosti na venkovní teplotě

Tyto funkce jsou pak použity při řešení diferenciálních rovnic odpovídajících řešením určitých integrálů výkonu pro získání příslušných energií. Takto postupuji podle přednášek z předmětu IAP [8], protože SW Wolfram Mathematica umožňuje podstatně větší zásahy do řešení diferenciálních rovnic, než do numerické integrace (volba kroku, metody) a řešení je navíc výrazně rychlejší. Pro zadaný průběh vnější teploty, počátek a konec uvažovaného období, zadaný známý stav systému a z datasheetu načtené a interpolované parametry tepelného čerpadla vypočte bilanční hodnoty energií a průměrný topný faktor pro stav uvažující skutečné změny okolní teploty a uvažování průměrné okolní teploty za zadané období. Poznamenejme, že bylo použito starší neinvertorové tepelné čerpadlo typu WPL33, a to navíc ve fiktivní podobě, kdy je hodnota COP zachována a maximální topný výkon a elektrický výkon zmenšen na 30 % aby odpovídal požadavkům uvažované budovy. Důvod je

jednoduchý. Pro toto čerpadlo byly k dispozici v nejširším rozsahu katalogové teploty jako funkce okolní teploty a teploty T1. Obdobná problematika ovšem více z pohledu strojního inženýrství, než energetiky je běžně realizována podle [9]. Pro zajímavost a kontrolu byl naprogramován alternativní postup výpočtu bilančních hodnot uvažovaného systému s použitím „strojařské“ či „teplárenské“ metodiky. V elektroenergetice a elektrotechnice obecně je základní přístup uvažovat časovou proměnlivost uvažovaných veličin (napětí, úhlu, výkonu, energií, proudu, atd.). V teplárenství se vychází z původních grafických metod výpočtů uvažujících čáry trvání výkonů, případně čáry trvání teplot, případně četnosti teplot v jednotlivých teplotních intervalech. (tzv. intervalová metoda). Při výpočtu byly použity vytvořené interpolační funkce vracející pro zadanou okolní teplotu výkony Pel a Post. Příslušná funkce má za vstupní parametry: počátek uvažovaného období, konec uvažovaného období, krok v čase, krok v teplotě a okolní teplotu jako funkci času. Je-li například krok v čase jedna hodina vyčíslí se teploty s krokem jedna hodina v uvažovaném období. Je-li uvažovaný krok teploty například 2 K vypočítáme kolikrát byla vnější teplota v uvažovaném období mezi -30 a -28, -28 a -26 atd., až +11, +13. Pro každý z těchto intervalů pro výpočet Pel a Post uvažujeme jeho střed. Nakonec hodnoty energií vypočteme jako součin četností teploty v daném intervalu, krát redukovaný časový krok, krát příslušný výkon branný při teplotě ve středu intervalu. Redukovaný krok proto, že n kroků definuje n+1 hodnot teploty četnosti bereme z počtu teplot ovšem v tom případě, odpovídá jedné teplotě redukovaný časový krok, což je vstupní časový krok, krát počet teplot / počet teplot + 1. Takže například použití krok teplot 2K a kroku času 1 hodina způsobí v uvažovaném stavu chybu elektrické energie – 1,9 % a chybu ostatní energie 0,45 %. Ovšem například při kroku teplot 4 K a kroku času 2 hodiny byla chyba stavu chybu elektrické energie 0,8 % a chybu ostatní energie -15 %. Vidíme, že při rozumné volbě kroku času a kroku teploty dává v „teplárenský“ přístup velmi dobré výsledky. Například zvolíme-li krok času 1 hodina/60 a teplotní krok 0,5 chyby 0.0114 % a 0.349 %.

Bereme-li jako parametr jednotlivých křivek četnost snímání jednotlivých křivek četnost snímání jednotlivé teploty a na vodorovné ose zobrazíme krok teploty z intervalové metody zobrazuje chybu spotřebované el energie za jeden den následující graf:



Obr. 22 a Obr. 23: Závislost chyby na časovém a teplotním kroku

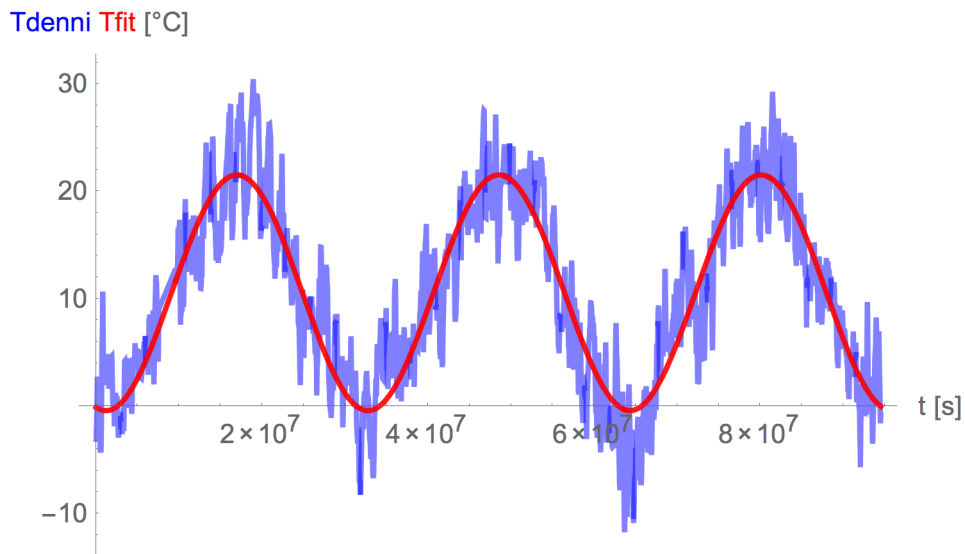
Podle předpokladu vede u malého kroku času malý krok v teplotě k menší chybě. Nicméně výsledné průběhy jsou zkreslené tím, při použití intervalové metody, že pokud je krok například jedna hodina předpokládáme, že jde o průměrnou teplotu v intervalu délky jedna hodina, jehož je konkrétní čas středem. Kdyžto v našem výpočtu uvažujeme samply teploty s odstupem jedna hodina, tedy skutečné okamžité hodnoty teplot, nikoli průměrné teploty nad intervalem jedna hodina. Použití intervalové metody s kroky v čase řádově hodiny a větších, ovšem pochopitelně menších než jeden den, pravděpodobně pro rozumnou přesnost

vyžaduje použití průměrných, nikoli aktuálních teplot. Další zkoumání by bylo pravděpodobně zajímavé, zcela jistě by však potvrdilo tento závěr a je nad rámec této práce.

Poznamenejme, že je to samozřejmé. V „teplárenské“ metodě jsme využili naše interpolační funkce a použití četností je vlastně alternativní metoda numerické integrace. Tak trochu jako když se na jednu plochu díváme ze směru osy x a ze směru osy y . Ovšem v „teplárenská“ metoda má stejnou programátorskou obtížnost jako námi zvolené řešení diferenciálních rovnic a nevyžaduje znalost vyšších programovacích jazyků. Lze konstatovat, že při použití obou metod a reálných průběhů okolních teplot (v případě našeho výpočtu) je granularita teploty dána vstupními daty (například měřenými teplotami) a krokem numerického řešení diferenciálních rovnic, v případě intervalové metody zvoleným krokem v teplotě a čase, jsou obě metody dostatečně přesné a vhodné. Jistě nám kolegové odborníci z oboru teplárenství odpustí, že přesto budeme uvažovat naší metodu výpočtu chování teplot v case za obecnější. Intervalová metoda je jednoduše implementovatelná pokud jsou výkony P_{el} a P_{ost} funkcí jedné veličiny, tedy okolní teploty. Což možné je, jak jsme ukázali v předchozích rozborech. Nicméně například při řešení ohřevu teplé vody tepelným čerpadlem tomu tak není. P_{el} je funkcí aktuální teploty ohříváné vody a teploty okolního prostředí. Intervalová metoda by tedy za předpokladu znalosti pokrytí uvažované 2 D oblasti těchto teplot měla předvypočítané potřebné elektrické výkony a znamenala by jakousi nepřiliš sofistikovanou numerickou metodou nad 2D oblastí.

5.1 Vyhodnocení práce reálného tepelného čerpadla pro jednu topnou sezonu v lokalitě Brno

Při analýze práce tepelného čerpadla pro ohřev teplé vody bylo zjištěno, že výpočet pro venkovní teplotu získanou z reálných dat trvá podstatně déle, než při použití simulovaného „dvoj sinusového“ průběhu. Proto byl nalezen příslušný „dvoj sinusový“ proklad pro naměřené teploty. Byl zvolen následující postup. Nejprve byly ze získaných čtvrt hodinových teplot vypočítány průměrné denní teploty. Tyto teploty pak byly proloženy lineární kombinací funkcí konstanta, sinusovka s periodou jeden rok a kosinusovka s periodou jeden rok. Na místo použití funkcí sinus a cosinus by bylo možno použít například jen sinus s fázovým posunem. Tento proklad však není možné získat spolehlivou lineární regresí pomocí příkazu Fit. Průběh průměrných denních teplot a jejich náhrady zobrazuje následující graf.



Obr. 24: Průběh skutečného a simulovaného chodu teploty

Z řešení rovnice kdy je tento proklad roven 13 °C (obvyklá hodnota počátku topné sezóny) byl nalezen začátek a konec topné sezóny. Pro časy spadající do topné sezóny byla nalezena pro každý den maximální a minimální teplota. Jejich rozdíl považujeme za odhad amplitudy denního kolísání teploty v konkrétním dni. Byly vypočteny amplitudy jednotlivých dní pro celé topné období a jejich průměr byl vzat jako amplituda denního kolísání. Poznamenejme, že ve zvolené konkrétní situaci vyšlo, že topná sezóna je dlouhá 209 dní. Jelikož podle zadání je třeba určit chybu vzniklou uvažováním průměrných měsíčních teplot a vedoucím práce bylo doporučeno použití průměrné délky jednoho měsíce 30 dnů, prodloužili jsme topnou sezónu o jeden den, neboť pak 210 dní vychází jako celých 7 měsíců, což umožní porovnání výsledku uvažováním dnů a měsíců. Výpočet byl prováděn tak, že obecná funkce v notebooku priloha1.nb byla použita na období jednoho dne nebo jednoho měsíce, a pak opakovaně 210, respektive 7 krát, použita na příslušné části topné sezóny. Pro každou část byly vyhodnoceny následující údaje:

Celková spotřebovaná energie doplňkového zdroje Eost a energie pro pohon TČ při uvažování skutečných časových průběhů a tyto energie získané s použitím průměrných teplot

přes zvolená období. Pro časovou náročnost výpočtu byl výpočet proveden jednou, uložen na disk a příslušně použit. Zajímavé bylo zjištění, že výpočet s použitím interpolace měřených skutečných venkovních teplot je jen cca o 10 až 20% časově náročnější než výpočet se simulovaným dvoj sinusovým průběhem, proto byl výpočet proveden i pro reálná data. Zajímavý fakt je ten, že použití reálných teplot prodlužovalo výpočet ohřevu teple vody až 20 násobně. Pravděpodobné je, že řešené diferenciální rovnice v případě teplé vody obsahují jednu netriviální diferenciální rovnici popisující časový vývoj teploty popisující teplotu vody v akumulčním zásobníku. Kdežto diferenciální rovnice tepelného čerpadla pro vytápění jsou pouze náhradou numerické integrace příslušných výkonů. Toto je ovšem jen názor a bylo by potřeba konzultovat s odborníky matematiky.

Nyní se podíváme na závěrečné vyhodnocení uvažovaných energií (elektrická energie pro pohon tepelného čerpadla a energie doplňkového zdroje) pro situaci jednoho dne a jednoho měsíce. Výsledky pro uvažovanou situaci jeden den:

EelReal [GJ]	EostReal [GJ]	EelRealFit [GJ]	EostRealFit [GJ]	Chyba el fit [%]	Chyba ost fit [%]
18,38	2,28	19,82	2,92	-7,83	-28,34

Tab. 2: Vyhodnocení energií a chyb pro jeden den

EelMean Real [GJ]	EostMean Real [GJ]	EelMean Fit [GJ]	EostMean Fit [GJ]	Chyba el mean real [%]	Chyba ost mean real [%]	Chyba el mean fit [%]	Chyba ost mean fit [%]
18	2,01	20,2	0	2,25	11,72	-10,2	100

Tab. 3: Vyhodnocení průměrných energií a chyb pro jeden den

Výsledky pro uvažovanou situaci jeden měsíc:

EelReal [GJ]	EostReal [GJ]	EelRealFit [GJ]	EostRealFit [GJ]	Chyba el fit [%]	Chyba ost fit [%]
18,38	2,28	0,15	0	99,2	100

Tab. 3: Vyhodnocení energií a chyb pro jeden měsíc

EelMean Real [GJ]	EostMea nReal [GJ]	EelMea nFit [GJ]	EostMe anFit [GJ]	Chyba el mean real [%]	Chyba ost mean real [%]	Chyba el mean fit [%]	Chyba ost mean fit [%]
18,2	0,108	0,075	0	0,74	95,3	99,6	100

Tab. 4: Vyhodnocení průměrných energií a chyb pro jeden měsíc

6. Závěr

Úkolem práce bylo zejména analyzovat chybu určení energie potřebné na vytápění v systémech s tepelnými čerpadly způsobenou uvažováním průměrných (denních případně měsíčních) namísto skutečných průběhů teplot.

V průběhu řešení se ukázalo, že je třeba ověřit použitelnost statického modelu tepelných ztrát objektu. Na jednom, ovšem typickém případě, bylo zjištěno, že chyba způsobená použitím statického modelu při simulovaném periodickém průběhu venkovní teploty činí nejvýše jednotky procent.

Oproti tomu chyba způsobená použitím průměrných denních (o měsíčních nemluvě) teplot činí i desítky procent a určovat potřebu energie bez uvažování denního kolísání je tedy nesprávné. Při bivalentním provozu může být chyba doplňkového zdroje i 100%, tedy že výpočet pomocí průměrných teplot vede k nulové spotřebě doplňkového zdroje, tedy že čerpadlo svým výkonem stačí hradit tepelné ztráty po celé topné období, zatímco při reálné situaci je doplňkový zdroj potřeba.

V práci byla na popud vedoucího také analyzována příprava teplé vody tepelným čerpadlem, kde se ukázalo, že přibližné řešení s uvažováním průměrné teploty ohřívání vody a průměrné denní teploty je cca 20%, uvažování průměrné teploty ohřívání vody a skutečných teplot okolního vzduchu vede pak k chybě cca 8%. Ukázala se také zajímavá možnost uspořít energii spínáním tepelného čerpadla ve vhodné části dne.

Závěrem musím konstatovat, že analyzovaná problematika se ukázala být tak rozsáhlá, že se mi ji nepodařilo zdaleka prozkoumat v celé její šíři. Napsané programy však umožňují snad snadnou implementaci parametrů jiných tepelných čerpadel, materiálů a geometrie budovy atd., že snad usnadní případným pokračovatelům další výzkum.

Seznam použité literatury

- [1] TZB-info - stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov (<http://tzb-info.cz/>)
- [2] NAJMAN, Richard, Energetický management chytrého domu. Praha 2015. Disertační práce. Fakulta elektrotechnická ČVUT.
- [3] RIMBALA, Jan, Ekonomické aspekty dimenzování otopného systému rodinného domu s tepelným čerpadlem. Praha 2016. Bakalářská práce. Fakulta elektrotechnická ČVUT.
- [4] BROŽ, Karel, Vytápění. Praha, skriptum ČVUT 1995
- [5] ČSN 06 0210, Výpočet tepelných ztrát budov při ústředním vytápění
- [6] ČSN EN 12831, Tepelné soustavy v budovách - Výpočet tepelného výkonu
- [7] WolframResearch. Mathematica [počítačový program]. Ver. 10.0.2.0 Wolfram Research, Inc.
- [8] PowerWiki Elektroenergetika. Dostupné z: <https://www.powerwiki.cz/>
- [9] MATUŠKA, Tomáš, Navrhování a bilancování tepelných čerpadel. Učební text ČVUT FS. Dostupné: http://users.fs.cvut.cz/tomas.matuska/wordpress/wp-content/uploads/2015/02/AZE-P6-tepelna_cerpadla_navrhovani_bilancovani.pdf
- [10] Tepelná čerpadla NIBE. Dostupné z: <http://www.nibe.cz/cs>
- [11] Stiebel eltron, Svět tepelných čerpadel. Dostupné z: <http://www.tepelna-cerpadla.cz/>

```
Quiet@Remove["Global`*"];
$HistoryLength = 2;
Off[FindRoot::lstol]
SetDirectory[NotebookDirectory[]];
c = 4186.;
hodina = 3600.;
den = hodina * 24.;
rok = 365.25 * den;
dosStav = {Ptop → 6000., T1 → 45, ΔT → 5., Tin → 20};
parsDosStav = #[[2]] & /@dosStav;
Ptopny[T_] = << "Ptopny";
Tmez = Tt /. Solve[Ptopny[Tt] == 0][[1]];
```

```

{data3, denniData} = N[<< "teploty"];
intTBrno = Interpolation[data3];
intPrumBrno = Interpolation[denniData];
{ta, tb} = intPrumBrno[[1, 1]];

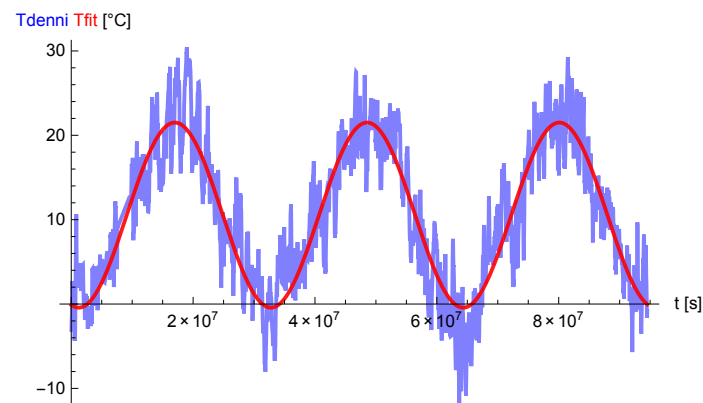
ClearAll[nahr1]
nahr1[t_] = Fit[denniData, {1, Sin[2 * Pi *  $\frac{t}{rok}$ ], Cos[2 * Pi *  $\frac{t}{rok}$ ]}, t]
Plot[{intPrumBrno[t], nahr1[t]}, {t, ta, tb},
  PlotStyle → {{Blue, Thick, Opacity[0.5]}, {Red, Thick, Opacity[0.9]}},
  AxesLabel → {"t [s]", " \!\(\backslash*
StyleBox[\ "Tdenni\ ", \nFontColor->RGBColor[0, 0, 1]\)\ \!\(\backslash*
StyleBox[\ "Tfit\ ", \nFontColor->RGBColor[1, 0, 0]\)\ [°C]"}]

Ttopime = 13.;
{t1, t2} =
  tTopim /. FindRoot[nahr1[tTopim] == Ttopime, {tTopim, # * rok}] & /@ {0.7, 1.4};
Plot[{intPrumBrno[t], nahr1[t]}, {t, t1, t2},
  PlotStyle → {{Blue, Thick, Opacity[0.5]}, {Red, Thick, Opacity[0.9]}},
  AxesLabel → {"t [s]", " Tdenni Tfit [°C]"}];
nDni = Round[ $\frac{t2 - t1}{den}$ ] + 1;
Print["topna sezona trva: ", nDni, " dni"]

ClearAll[dejAmplitudu];
dejAmplitudu[indexDne_] := Module[{dataDen, Δt = 15 * 60, amplituda},
  dataDen = intTBrno /@ Range[(indexDne - 1) * den, indexDne * den - Δt, Δt];
  amplituda = 0.5 * (Max[dataDen] - Min[dataDen])
];
amplitudaDen = Mean[dejAmplitudu /@ Range[nDni]];
Ttrial[t_] := amplitudaDen * Sin[2. * Pi *  $\frac{t}{den}$ ] + nahr1[t];
Plot[{intTBrno[t], Ttrial[t]}, {t, t1, t2},
  PlotStyle → {{Blue, Thick, Opacity[0.5]}, {Red, Thick, Opacity[0.9]}},
  AxesLabel → {"t [s]", " Tdenni Tfit [°C]"}];

```

$$10.5407 - 10.6483 \cos[1.99102 \times 10^{-7} t] - 2.6293 \sin[1.99102 \times 10^{-7} t]$$



topna sezona trva: 210 dni

```

kPower = 0.3;
{PelHP[Tvzduch_, Tvoda_], PtopHP[Tvzduch_, Tvoda_], COP[Tvzduch_, Tvoda_]} =
  {kPower, kPower, 1} * << "struct";

{{Tamin, Tamax}, {Tlmin, Tlmax}} = PelHP[a, b][[2, 0, 1]];

ClearAll[identifikaceStav];
identifikaceStav[{Ptop_, T1_, ΔT_, Tin_}] :=
  Module[{rceZnamyStav, T2 = T1 - ΔT},
    rceZnamyStav = {m * c * (T1 - T2) == Ptop, Ptop == k *  $\left(\frac{T1 + T2}{2} - Tin\right)}$ ;
    Solve[rceZnamyStav][[1]]
  ];
identifikaceStav[parsDosStav];

ClearAll[vydej2];
vydej2[{znamyStav : {Ptop_, Tlznamy_, ΔT_, Tin_}, {tStart_, tEnd_},
  {Texterni_, Ptopny_}] := Module[{krokCasu = 0.5 * hodina, krokTeploty = 1.5,
  dosZnamyStav = identifikaceStav[znamyStav], rce, Tvzduch, dos, rn,
  dosss, datPel, Tmin = -30., Tmax, intPel, fpom, plP, pltl2, sole, ple,
  Tmean, EmeanEl, ErealEl, Etopna, Pftopny, COPTpum, COPReal, rceHranice,
  poc, resHranice, TmezBivalence, rceCerpadlo100, res100, rceBivalenti,
  resBival, res, Pelektricky, Post, Pelint, datPost, Postint, Pcelkint,
  PfelTC, Ppost, Pfcelk, Eost, Ecelk, EostMean, dilciVysl, teploty},
  Tmax = T /. Solve[Ptopny[T] == 0, T][[1]];
  rceHranice[Tvzduch_] =
    {m * c * (T1 - T2) == Ptopny[Tvzduch], Ptopny[Tvzduch] == k *  $\left(\frac{T1 + T2}{2} - Tin\right)}$ ,
    COP[Tvzduch, T1] * Pel == Ptopny[Tvzduch],
    Ptopny[Tvzduch] == PtopHP[Tvzduch, T1]} /. dosZnamyStav;
  poc = {{Pel, 6000}, {T1, 45}, {T2, 40}, {Tvzduch, -5}};
  resHranice = FindRoot[rceHranice[Tvzduch], poc];
  TmezBivalence = Tvzduch /. resHranice;
  (*Print["hranice bivalence je ", TmezBivalence, " °C"]*)
  rceCerpadlo100[Tvzduch_] =
    {m * c * (T1 - T2) == Ptopny[Tvzduch], Ptopny[Tvzduch] == k *  $\left(\frac{T1 + T2}{2} - Tin\right)}$ ,
    COP[Tvzduch, T1] * Pel == Ptopny[Tvzduch]} /. dosZnamyStav;

  res100[Tvzduch_] := Union[FindRoot[rceCerpadlo100[Tvzduch],
    {{Pel, 6000}, {T1, 45}, {T2, 40}}], {PtopOstatni -> 0}];
  (*res100[TmezBivalence]*)
  rceBivalenti[Tvzduch_] =
    {m * c * (T1 - T2) == PtopHP[Tvzduch, T1], PtopHP[Tvzduch, T1] == k *  $\left(\frac{T1 + T2}{2} - Tin\right)}$ ,
    COP[Tvzduch, T1] * Pel == PtopHP[Tvzduch, T1],
    PtopOstatni + PtopHP[Tvzduch, T1] == Ptopny[Tvzduch]} /. dosZnamyStav;
  resBival[Tvzduch_] := FindRoot[rceBivalenti[Tvzduch],
    {{Pel, 6000}, {T1, 45}, {T2, 40}, {PtopOstatni, 1000}}];
  (*resBival[TmezBivalence]*)
  res[Tvzduch_] := Quiet@res100[Tvzduch] /; Tvzduch ≥ TmezBivalence;
  res[Tvzduch_] := Quiet@resBival[Tvzduch] /; Tvzduch < TmezBivalence;
  Pelektricky[Tvzduch_] := Pel /. res[Tvzduch];
  Post[Tvzduch_] := PtopOstatni /. res[Tvzduch];
  datPel = {#, Pelektricky[#]} & /@ Range[Tmin, Tmax + 10, 0.1];
  Pelint = Interpolation[datPel, InterpolationOrder -> 1];
  (*Plot[Pelint[T], {T, -10, 14}]*)

```

```

datPost = {#, Post[#]} & /@ Range[Tmin, Tmax + 10, 0.1];
Postint = Interpolation[datPost, InterpolationOrder → 1];
(*Plot[Postint[T], {T, -10, 14}]*);
Pcelkint := Pelint[#] + Postint[#] &;
(*Plot[Pcelkint[T], {T, -10, 14}]*);
Pftopny[t_] := If[Ptopny[Texterni[t]] ≥ 0, Ptopny[Texterni[t]], 0.];
PfelTC[t_] := If[Ptopny[Texterni[t]] ≥ 0, Pelint[Texterni[t]], 0.];
Pfost[t_] := If[Ptopny[Texterni[t]] ≥ 0, Postint[Texterni[t]], 0.];
Pfcelk[t_] := If[Ptopny[Texterni[t]] ≥ 0, Pcelkint[Texterni[t]], 0.];

sole = NDSolve[{e[tStart] == 0, e'[t] == PfelTC[t], TforMean[tStart] == 0,
  TforMean'[t] == Texterni[t], eTopna[tStart] == 0, eTopna'[t] == Pftopny[t],
  eOst[tStart] == 0, eOst'[t] == Pfost[t], eCelk[tStart] == 0,
  eCelk'[t] == Pfcelk[t]}, {e, TforMean, eTopna, eOst, eCelk},
  {t, tStart, tEnd}, MaxSteps → 106, MaxStepSize → 0.1 * hodina][[1]];

ple = Plot[e[t] /. sole / 106, {t, tStart, tEnd},
  AxesLabel → {"t [s]", "E [MJ]"}, PlotStyle → {Black, Thick},
  GridLines → Automatic, AxesOrigin → {tStart, 0}];
(*Plot[#][t], {t, tStart, tEnd} & /@ {Pftopny, PfelTC, Pfost, Pfcelk}*)
Tmean = (TforMean[tEnd] - TforMean[tStart]) / (tEnd - tStart) /. sole;
EmeanEl = If[Ptopny[Tmean] ≥ 0, Pelint[Tmean] * (tEnd - tStart), 0.];
ErealEl = (e[tEnd] - e[tStart]) /. sole;
Etopna = (eTopna[tEnd] - eTopna[tStart]) /. sole;
Eost = (eOst[tEnd] - eOst[tStart]) /. sole;
Ecelk = (eCelk[tEnd] - eCelk[tStart]) /. sole;
EostMean = If[Ptopny[Tmean] ≥ 0, Postint[Tmean] * (tEnd - tStart), 0.];
dilciVysl = {Ecelk, Eost, ErealEl, EmeanEl, EostMean, Etopna};
{{tStart, tEnd}, dilciVysl, {Pelint, Postint}} =
vydej2[{parsDosStav, {0.5 * (t1 + t2), 0.5 * (t1 + t2) + 1 * den}, {Ttrial, Ptopny}}]

{{3.27735 × 107, 3.28599 × 107},
{1.91695 × 108, 4.71526 × 107, 1.44542 × 108, 1.66855 × 108, 0., 4.17228 × 108},
{InterpolatingFunction[{{-30., 23.9}}, <>],
InterpolatingFunction[{{-30., 23.9}}, <>]}]

ClearAll[denFit, denReal];
(*{Ecelk, Eost, ErealEl, EmeanEl, EostMean, Etopna}*)
denFit[indexDne_] := vydej2[{parsDosStav,
  {t1 + (indexDne - 1) * den, t1 + indexDne * den}, {Ttrial, Ptopny}}][[2]];
denReal[indexDne_] := vydej2[{parsDosStav, {t1 + (indexDne - 1) * den,
  t1 + indexDne * den}, {intTBrno, Ptopny}}][[2]];

(*dataFitDen=denFit/@Range[1, nDni, 1];
dataFitDen>>"dataFitDen";
dataRealDen=denReal/@Range[1, nDni, 1];
dataRealDen>>"dataRealDen";*)

mesicFit[indexMesice_] := vydej2[{parsDosStav,
  {t1 + (indexMesice - 1) * den, t1 + indexMesice * den}, {Ttrial, Ptopny}}][[2]];
mesicReal[indexMesice_] := vydej2[{parsDosStav, {t1 + (indexMesice - 1) * den * 30,
  t1 + indexMesice * den * 30}, {intTBrno, Ptopny}}][[2]];

```

```

nMesicu =  $\frac{nDni}{30}$ ;
(*dataFitMesic=mesticFit/@Range[1,nMesicu,1];
dataFitMesic>>"dataFitMesic";
dataRealMesic=mesticReal/@Range[1,nMesicu,1];
dataRealMesic>>"dataRealMesic";*)

dataRealDen = << "dataRealDen";
dataFitDen = << "dataFitDen";
dataRealMesic = << "dataRealMesic";
dataFitMesic = << "dataFitMesic";

{EcelkRD, EostRD, ErealElRD, EmeanElRD, EostMeanRD, EtopnaRD} =
  celkRealDen = Plus @@ dataRealDen;
{EcelkFD, EostFD, ErealElFD, EmeanElFD, EostMeanFD, EtopnaFD} =
  celkFitDen = Plus @@ dataFitDen;

{EcelkRM, EostRM, ErealElRM, EmeanElRM, EostMeanRM, EtopnaRM} =
  celkRealMesic = Plus @@ dataRealMesic;
{EcelkFM, EostFM, ErealElFM, EmeanElFM, EostMeanFM, EtopnaFM} =
  celkRealMesic = Plus @@ dataFitMesic;

Print["EelReal= ", ErealElRD,
      " EostReal= ", EostRD, " EtopnaRD= ", EtopnaRD, " J"]
Print["EelRealFit= ", ErealElFD, " EostFit= ",
      EostFD, " EtopnaFit= ", EtopnaFD, " J"]

EelReal=  $1.83798 \times 10^{10}$  EostReal=  $1.83798 \times 10^{10}$  EtopnaRD=  $5.42731 \times 10^{10}$  J
EelRealFit=  $1.98199 \times 10^{10}$  EostFit=  $1.83798 \times 10^{10}$  EtopnaFit=  $5.75185 \times 10^{10}$  J

Print["EelReal= ", ErealElRM, " EostReal= ",
      ErealElRM, " EtopnaRD= ", EtopnaRM, " J"]
Print["EelRealFit= ", ErealElFM, " EostFit= ",
      ErealElRM, " EtopnaFit= ", EtopnaFM, " J"]

EelReal=  $1.83798 \times 10^{10}$  EostReal=  $1.83798 \times 10^{10}$  EtopnaRD=  $5.42731 \times 10^{10}$  J
EelRealFit=  $1.46753 \times 10^8$  EostFit=  $1.83798 \times 10^{10}$  EtopnaFit=  $5.26346 \times 10^8$  J

Print["EelMean= ", EmeanElRD, " EostMean= ",
      EmeanElRD, " EtopnaRD= ", EtopnaRD, " J"]
Print["EelMeanFit= ", EmeanElRD, " EostFit= ",
      EmeanElRD, " EtopnaFit= ", EtopnaRD, " J"]

EelMean=  $1.79662 \times 10^{10}$  EostMean=  $1.79662 \times 10^{10}$  EtopnaRD=  $5.42731 \times 10^{10}$  J
EelMeanFit=  $1.79662 \times 10^{10}$  EostFit=  $1.79662 \times 10^{10}$  EtopnaFit=  $5.42731 \times 10^{10}$  J

Print["EelMean= ", ErealElRM, " EostMean= ", ErealElRM]
Print["EelMeanFit= ", ErealElFM, " EostMeanFit= ", EmeanElFM]

EelMean=  $1.83798 \times 10^{10}$  EostMean=  $1.83798 \times 10^{10}$ 
EelMeanFit=  $1.46753 \times 10^8$  EostMeanFit=  $7.46003 \times 10^7$ 

Print["Chyba EelRealFit= ",  $\frac{ErealElRD - ErealElFD}{ErealElRD} * 100,$ 
      " Chyba EostFit= ",  $\frac{EostRD - EostFD}{EostRD} * 100$ ]

Chyba EelRealFit= -7.83493 Chyba EostFit= -28.3417

```

```
Print["Chyba EelRealFit= ",  $\frac{\text{ErealElRD} - \text{ErealElFD}}{\text{ErealElRD}} * 100,$   
      " Chyba EostFit= ",  $\frac{\text{EostRD} - \text{EostFD}}{\text{EostRD}} * 100]$ 
```

```

Quiet@Remove["Global`*"];
$HistoryLength = 2;
SetDirectory[NotebookDirectory[]];

(*Upozorneni: prilia mnoho parametru jde volit,
tedy nejde v ramci diplomove prace prostor moznosti "prozkoumat"
zamerne je pro rozumnou nemodelovatelnost opominuto osluneni
budovy (projevilo by se v okrajove podmince a v solernich ziscich),
take tepelne zisky uvnitr atd. Tedy v podstate
simulujeme prazdnou budovu za zamracenych dni... *)
Ampl = 7;
hodina = 3600.
den = hodina * 24.;
TemperatureData = {{1, -1.4}, {2, -.2}, {3, 3.7}, {4, 8.9}, {5, 13.8}, {6, 17.2},
{7, 19}, {8, 18.5}, {9, 14.8}, {10, 9.1}, {11, 4.1}, {12, .3}, {13, -1.4}};
pomfce = Interpolation[TemperatureData];
Temperature[m_] := pomfce[m] /; 1 ≤ m < 13;
Temperature[m_] := Temperature[m - 12] /; m ≥ 13;
Temperature[m_] := Temperature[m + 12] /; m < 1;
secondsInMonth = 365. * 24 * 3600 / 12;

teplsecpom[t_] := Temperature[ $\frac{t}{\text{secondsInMonth}}$ ];
year = 12 * secondsInMonth;
meanValueOfTemperature =  $\frac{1}{\text{year}}$  * Quiet@NIntegrate[teplsecpom[t], {t, 0, year}];
desiredMeanValue = 7.5;
teplsec[t_] := teplsecpom[t] - meanValueOfTemperature + desiredMeanValue;
teplDenni[t_] := Ampl * Sin[2 * Pi *  $\frac{t}{\text{den}}$ ] + teplsec[t];
Plot[teplsec[t], {t, 0, 12 * secondsInMonth}];

cm = 0.01;
dCihly = 30 cm;
dIzol = 16 cm;
dmax = dCihly + dIzol;
λCihly = 0.8;
λIzol = 0.04;
rocCihly = 3000 * 200;
rocIzol = 50 * 1000;
αin = 5;
αext = 15;

U =  $\frac{1}{\frac{1}{\alpha_{in}} + \frac{1}{\alpha_{ext}} + \frac{d_{Cihly}}{\lambda_{Cihly}} + \frac{d_{Izol}}{\lambda_{Izol}}}$ ;
ClearAll[prechod];
prechod[vlevo_, vpravo_] :=
Module[{res, a, b}, res = Solve[{a - b == vlevo, a + b == vpravo}];
a + b * Tanh[ $\frac{x - d_{Cihly}}{0.1 \text{ cm}}$ ] /. res[[1]]];
roc = prechod[rocCihly, rocIzol];
λ = prechod[λCihly, λIzol];
pl[co_, popis_] :=
Plot[co /. x → xx, {xx, 0, dmax}, PlotRange → All, AxesLabel → {"x [m]", popis},
AxesOrigin → {0, 0}, PlotStyle → {Hue[0.63], Thickness[0.004]}];
plRoc = pl[roc, " $\rho c$  [ $\frac{J}{K * m^3}$ ]"];
plLambda = pl[λ, " $\lambda$  [ $\frac{W}{K * m}$ ]"];

```



```

Tin = 21.5;
ClearAll[vydej];
vydej[{tStart_, nDni_}] := Module[{nabeh, rce, poc, okrVlevo, okrVpravo,
  tmax, res, tokTprum, tokZed, pltok, plDelta, pltokAll, toky, naDisk},
  nabeh = Tanh[t - tStart];
  rce = {roc * D[T[x, t], t] == D[λ * D[T[x, t], x], x]};
  poc = {T[x, tStart] == Tin};
  okrVlevo = {-λ * D[T[x, t], x] == αin * (Tin - T[x, t]) * nabeh} /. x -> 0;
  okrVpravo =
    {-λ * D[T[x, t], x] == αext * (T[x, t] - teplDenni[t]) * nabeh} /. x -> dmax;
  tmax = tStart + nDni * den;
  res = NDSolve[Union[rce, poc, okrVlevo, okrVlevo, okrVpravo], {T},
    {x, 0, dmax}, {t, tStart, tmax}, MaxStepSize -> {.05 cm, 0.1 * den}][[1]];
  plot3D = Plot3D[T[x, t] /. res, {x, 0, dmax}, {t, tStart, tmax},
    AxesLabel -> {"x [m]", "t [s]", "T [°C]"}, PlotPoints -> 100];
  tokTprum[t_] := U * (Tin - teplsec[t]);
  tokZed[t_] = (αin * (Tin - T[x, t] /. res)) /. x -> 0;
  pltok = Plot[{tokTprum[t], tokZed[t]}, {t, tmax - (nDni - 1) * den, tmax},
    AxesOrigin -> {tStart, 0}, PlotStyle -> {{Blue, Thick}, {Red, Thick}},
    AxesLabel -> {"t [s]", "pstr p[t] [ $\frac{W}{m^2}$ ]"}, GridLines -> Automatic];
  plDelta = pltok = Plot[ $\frac{\text{tokZed}[t] - \text{tokTprum}[t]}{\text{tokTprum}[t]} * 100$ , {t, tmax - (nDni - 1) * den,
    tmax}, AxesOrigin -> {tStart, 0}, PlotStyle -> {Blue, Thickness[0.006]},
    AxesLabel -> {"t [s]", "δp [%]"}, GridLines -> Automatic];
  pltokAll = Plot[{tokTprum[t], tokZed[t], U * (Tin - teplDenni[t])},
    {t, tmax - (nDni - 1) * den, tmax}, AxesOrigin -> {tStart, 0},
    PlotStyle -> {{Blue, Thickness[0.006]},
    {Red, Thickness[0.006]}, {Black, Thickness[0.006]}}},
    PlotLabel -> {"vykonZedPrum[t] vykonZedReal[t] vykonZedFic[t] [ $\frac{W}{m^2}$ ]"},
    GridLines -> Automatic];
  toky[t_] := {tokTprum[t], tokZed[t], U * (Tin - teplDenni[t])};
  naDisk = Table[{t, toky[t]}, {t, tStart, tmax, 0.1 * hodina}];
  naDisk >> "datToky";
  {pltokAll, plDelta, plot3D}
];
pom = vydej[{10 000, 15}] // Quiet

```

```

(*abychom odhadli vliv sertvacnosti zdi,
vytvorime si fiktivni dum s rozumnym vetranim, pomerem ploch zdi,
oken a dveri atd... Samosebou pouzivame obalkovou metodu.
dum je krychle o strane a*)
a = 7.5;
nOken = 16;
Slokno = 1.5 * 1.5;
Sldvere = 2.1 * 1;
nDveri = 2;
Sdveri = nDveri * nDveri;
Soken = nOken * Slokno;
Szed = 5 * a2 - Sdveri - Soken;
Szem = a2;
Objem = (a - 2 * dmax)3;

(*o vetrani*)
ucinnostRekuperace = 0.6;
casVymenyVzduchu = 4 * hodina;
cp = 1000.;
hustotaVzduchu =  $\frac{349.}{T_{in} + 273}$ ;
vykonVetrani[t_] := (1 - ucinnostRekuperace) *
  (Tin - teplDenni[t]) * hustotaVzduchu * cp *  $\frac{Objem}{casVymenyVzduchu}$ ;
vykonVetraniPrum[t_] := (1 - ucinnostRekuperace) *
  (Tin - teplsec[t]) * hustotaVzduchu * cp *  $\frac{Objem}{casVymenyVzduchu}$ ;

(*o dverich a oknech a podlaze*)
Uokno = 1.5;
Udvere = 0.5;
vykonOknaDvere[t_] := (Tin - teplDenni[t]) * (Udvere * Sdveri + Uokno * Soken);
vykonOknaDverePrum[t_] := (Tin - teplsec[t]) * (Udvere * Sdveri + Uokno * Soken);
dIzolPodlaha = 10 cm;
Upodlaha =  $\frac{1}{\frac{1}{\alpha_{in}} + \frac{dIzolPodlaha}{\lambda_{Izol}}}$ ;
Tzem = 0;
vykonZem = (Tin - Tzem) * Szem * Upodlaha;

(*vyuzijeme reseni DFourier-Kirchhoffovy rovnice*)
datToky = << "datToky";
toklmkvTprum =
  Interpolation[datToky /. {t_, {Prum_, Preal_, Pfict_}} => {t, Prum}];
toklmkvTreal = Interpolation[
  datToky /. {t_, {Prum_, Preal_, Pfict_}} => {t, Preal}];
toklmkvFict = Interpolation[datToky /. {t_, {Prum_, Preal_, Pfict_}} => {t, Pfict}];
{tapom, tb} = toklmkvTreal[[1, 1]];
Plot[toklmkvTreal[t], {t, tapom, tb}];
(*slouzi pro zvoleni ta tak, abychom byli za prechodnym dejem*)
ta = 6 * 105;
Plot[toklmkvTreal[t], {t, ta, tb}];
vykonZedReal[t_] := Szed * toklmkvTreal[t];
vykonZedFict[t_] := Szed * toklmkvFict[t];
vykonZedPrum[t_] := Szed * toklmkvTprum[t];

```

```

(*ted vyvorime tri celkove toky odpovidajici situaci s uvazovanim
prumerne teploty pro prostup zdi (situace "Prum"), situaci s uvazovanim
skutecneho toku zdi podle reseni FKR (situace "Real") a situaci,
kdy zed povazujeme za tepelny odpor bez tepelne kapacity (situace "Fict"),
v techto pripadech je uvazovano skutecne vetrani a prostup okny,
dalsi situaci znacime "Konst",
kde bereme prumerne denni teploty i pro vetrani a prostup dvermi a okny*)
vykonOstatni[t_] := vykonOknaDvere[t] + vykonVetrani[t] + vykonZem;
vykonOstatniPrum[t_] := vykonOknaDverePrum[t] + vykonVetraniPrum[t] + vykonZem;
PReal[t_] := vykonZedReal[t] + vykonOstatni[t];
PPrum[t_] := vykonZedPrum[t] + vykonOstatni[t];
PFict[t_] := vykonZedFict[t] + vykonOstatni[t];
PKonst[t_] := vykonZedPrum[t] + vykonOstatniPrum[t];
pltokAll =
Plot[{PReal[t], PPrum[t], PFict[t], PKonst[t]}, {t, ta, tb}, AxesOrigin -> {ta, 0},
PlotStyle -> {{Blue, Thickness[0.006]}, {Red, Thickness[0.006]},
{Black, Thickness[0.006]}, {Magenta, Thickness[0.006]}},
AxesLabel -> {"t [s]", "pReal pPrum pFict pKonst [W]"}, GridLines -> Automatic]

(*pro prehlednost si radeji vytvorime data a ulozone na disk*)
Δt = 0.1 * hodina;
dPrum = Table[{t, PPrum[t]}, {t, ta, tb, Δt}];
dFict = Table[{t, PFict[t]}, {t, ta, tb, Δt}];
dReal = Table[{t, PReal[t]}, {t, ta, tb, Δt}];
dKonst = Table[{t, PKonst[t]}, {t, ta, tb, Δt}];
dTReal = Table[{t, teplDenni[t]}, {t, ta, tb, Δt}];
dTPrum = Table[{t, teplsec[t]}, {t, ta, tb, Δt}];
{dPrum, dFict, dReal, dKonst, dTReal, dTPrum} >> "dataZed"

(*{dPrum,dFict,dReal,dKonst,dTReal,dTPrum}=<<"dataZed";*)

Quiet@Remove["Global`*"];
$HistoryLength = 2;
SetDirectory[NotebookDirectory[]];
hodina = 3600.;
den = hodina * 24.;
dataZed = {dPrum, dFict, dReal, dKonst, dTReal, dTPrum} = << "dataZed";
{PPrum, PFict, PReal, PKonst, TReal, TPrum} = Interpolation/@dataZed;
{ta, tb} = PReal[[1, 1]]
Plot[Evaluate@Through[{PPrum, PFict, PReal, PKonst, TReal, TPrum}[t]],
{t, ta, tb}];
{PPrum, PFict, PReal, PKonst, TReal, TPrum} >> "vykony"

```

```

Quiet@Remove["Global`*"];
$HistoryLength = 2;
Off[FindRoot::lstol]
SetDirectory[NotebookDirectory[]];
c = 4186.;
den = 3600 * 24.;
dosStav = {Ptop → 6000., T1 → 45, ΔT → 5., Tin → 20};
parsDosStav = #[[2]] & /@ dosStav;
Ptopny[T_] = << "Ptopny";
Tmez = Tt /. Solve[Ptopny[Tt] == 0][[1]];
COP[Tvzduch_, T1_] := 0.5 *  $\frac{T1 + 273}{T1 - Tvzduch}$ ;

ClearAll[identifikaceStav];
identifikaceStav[{Ptop_, T1_, ΔT_, Tin_}] :=
Module[{rceZnamyStav, T2 = T1 - ΔT},
rceZnamyStav = {m * c * (T1 - T2) == Ptop, Ptop == k *  $\left(\frac{T1 + T2}{2} - Tin\right)}$ ;
Solve[rceZnamyStav][[1]]
];
identifikaceStav[parsDosStav]

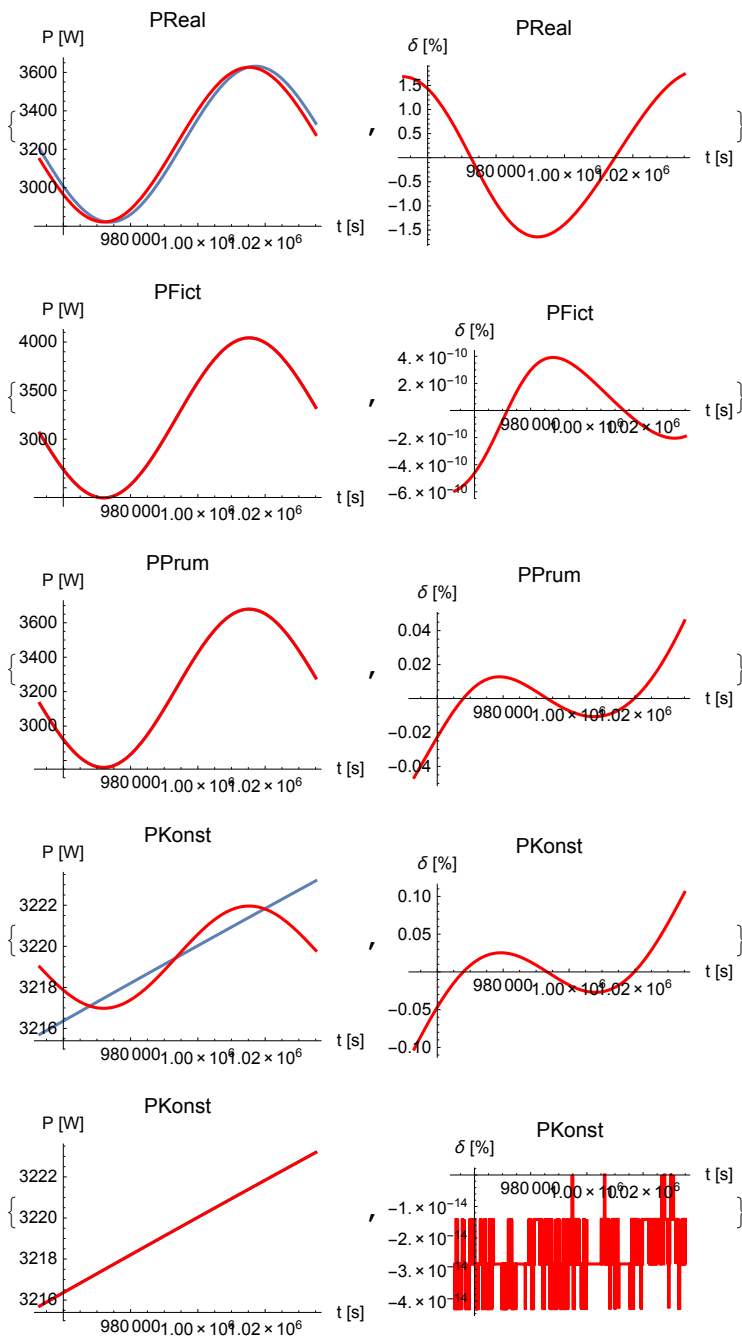
{k → 266.667, m → 0.28667}

{PPrum, PFict, PReal, PKonst, TReal, TPrum} = << "vykony";

ClearAll[zpracuj];
zpracuj[fceP_, fceT_, popis_] := Module[{data, ndat = 100,
Δt, ta, tb, tStart, interval, fit, pl1, pl2, ploty1, errPlot},
interval = 0.95 * den;
Δt = 0.95 *  $\frac{den}{ndat - 1}$ ;
{ta, tb} = fceP[[1, 1]];
tStart = 0.5 * (ta + tb);
data = {fceT[#], fceP[#]} & /@ Range[tStart, tStart + interval, Δt];
fit[T_] = Fit[data, {1, T}, T];
pl1 = Plot[fceP[t], {t, tStart, tStart + interval},
AxesLabel → {"t [s]", "P [W]"}, PlotLabel → popis];
pl2 = Plot[fit[fceT[t]], {t, tStart, tStart + interval},
AxesLabel → {"t [s]", "P [W]"}, PlotLabel → popis, PlotStyle → Red];
ploty1 = Show[pl1, pl2, PlotRange → All];
errPlot = Plot[ $\frac{fceP[t] - fit[fceT[t]]}{fceP[t]} * 100$ , {t, tStart, tStart + interval},
AxesLabel → {"t [s]", "δ [%]"}, PlotLabel → popis, PlotStyle → Red];
{ploty1, errPlot}
];

{ga, gb} = zpracuj[#, TReal, "PReal"] &@PReal
{gc, gd} = zpracuj[#, TReal, "PFict"] &@PFict
{ge, gf} = zpracuj[#, TReal, "PPrum"] &@PPrum
{gg, gh} = zpracuj[#, TReal, "PKonst"] &@PKonst
{gi, gk} = zpracuj[#, TPrum, "PKonst"] &@PKonst

```



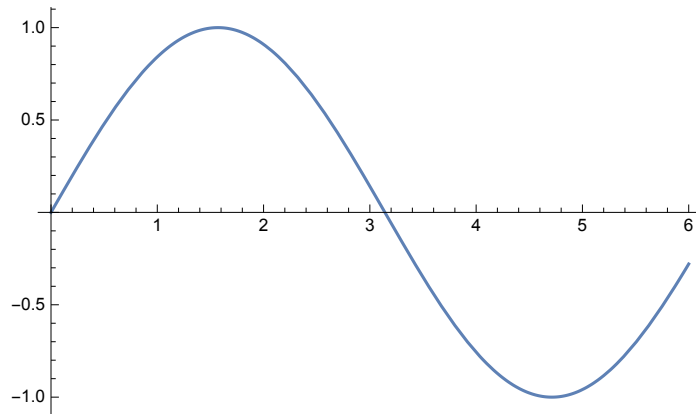
`exp[{ga, gb, gc, gd, ge, gf, gg, gh, gi, gk}]`

`{ga.png, gb.png, gc.png, gd.png, ge.png, gf.png, gg.png, gh.png, gi.png, gk.png}`

```

ClearAll[exp];
SetAttributes[exp, {HoldAll, Listable}];
exp[co_] := Module[{a, graf}, a = ToString[Unevaluated[co]];
  graf := Evaluate[co];
  Export[Evaluate[a <> ".png"], graf, ImageResolution -> 300];

```



graf.png

```

ClearAll[zpracuj1, T];
zpracuj1[fceP_, fceT_, popis_] := Module[{data, ndat = 100,
  Δt, ta, tb, tStart, interval, fit, pl1, pl2, ploty1, errPlot},
  interval = 0.95 * den;
  Δt = 0.95 *  $\frac{\text{den}}{\text{ndat} - 1}$ ;
  {ta, tb} = fceP[[1, 1]];
  tStart = 0.5 * (ta + tb);
  data = {fceT[#], fceP[#]} & /@ Range[tStart, tStart + interval, Δt];
  fit = Fit[data, {1, T}, T]
];
fitReal[T_] = zpracuj1[PReal, TReal, "PReal"]
fitFict[T_] = zpracuj1[PFict, TReal, "PFict"]
fitPrum[T_] = zpracuj1[PPrum, TReal, "PPrum"]
fitRealKonst[T_] = zpracuj1[PKonst, TReal, "PKonst"]
fitKonstKonst = zpracuj1[PKonst, TPrum, "PKonst"]

```

3103.04 - 57.3047 T

2971.01 - 117.353 T

3080.72 - 65.5353 T

3218.72 - 0.354877 T

2971.01 - 117.353 T

```

ClearAll[vydej2];
vydej2[{znamyStav : {Ptop_, T1znamy_, ΔT_, Tin_},
{tStart_, tEnd_}, {Texterni_, Ptopny_}] :=
Module[{dosZnamyStav = identifikaceStav[znamyStav], rce, Tvzduch, dos,
rn, dosss, datPel, Tmin = -30., Tmax = 45, intPel, fpom, plt1t2,
sole, ple, Tmean, EmeanEl, ErealEl, Etopna, Pftopny, COPTpum, COPReal},
rce[Ta_] := {m * c * (T1 - T2) == Ptopny[Ta], Ptopny[Ta] == k *  $\left(\frac{T1 + T2}{2} - Tin\right)$ ,
COP[Ta, T1] * Pel == Ptopny[Ta]} /. dosZnamyStav;
dos[Taa_] := Union[FindRoot[rce[Taa], {Pel, 1000}, {T2, 40}, {T1, 25}],
{Ta → Taa}] /; Taa ≤ Tmez;
dos[Taa_] := {Ta → Taa, Pel → 0} /; Taa > Tmez;
rn = Range[Tmin, Tmax, 0.3];
dosss = dos /@ rn;
fpom[{Ta_, Pel_}] := If[Ta ≤ Tmez, {Ta, Pel}, {Ta, 0.}];
datPel = fpom /@ ({Ta, Pel} /. dosss);
intPel = Interpolation[datPel, InterpolationOrder → 2];
plP = Plot[ $\frac{\text{intPel}[Ta]}{1000.}$ , {Ta, Tmin, Tmax}, AxesLabel → {"ta [°C]", "Pel [kW]"},
PlotStyle → {Red, Thick}, GridLines → Automatic];
plt1t2 = Plot[ $\frac{\text{intPel}[\text{Texterni}[t]]}{1000.}$ , {t, tStart, tEnd},
AxesLabel → {"ta [°C]", "Pel [kW]"}, PlotStyle → {Magenta, Thick},
GridLines → Automatic, AxesOrigin → {tStart, 0}];
Pftopny[t_] := If[Ptopny[Texterni[t]] ≥ 0, Ptopny[Texterni[t]], 0];
sole =
NDSolve[{e[tStart] == 0, e'[t] == intPel[Texterni[t]], TforMean[tStart] == 0,
TforMean'[t] == Texterni[t], eTopna[tStart] == 0, eTopna'[t] == Pftopny[t]},
{e, TforMean, eTopna}, {t, tStart, tEnd}, MaxSteps → 106][[1]];
ple = Plot[ $\frac{e[t]}{10^6}$ , {t, tStart, tEnd}, AxesLabel → {"t [s]", "E [MJ]"},
PlotStyle → {Black, Thick}, GridLines → Automatic,
AxesOrigin → {tStart, 0}];

Tmean = (TforMean[tEnd] - TforMean[tStart]) / (tEnd - tStart) /. sole;
EmeanEl = intPel[Tmean] * (tEnd - tStart);

ErealEl = (e[tEnd] - e[tStart]) /. sole;
Etopna = (eTopna[tEnd] - eTopna[tStart]) /. sole;
{COPTpum, COPReal} =  $\left\{\frac{\text{EmeanEl} + 1}{\text{Etopna}}, \frac{\text{ErealEl} + 1}{\text{Etopna}}\right\}^{-1}$ ;
{Tmean, {ErealEl, Etopna, COPReal}}
];

```

```

{ta, tb} = PReal[[1, 1]];
ClearAll[vydej3]; (*overeni pro Ptopny jako funkce casu*)
vydej3[{znameyStav : {Ptop_, T1znamey_, ΔT_, Tin_},
      {tStart_, tEnd_}, {Texterni_, Ptopny_}] :=
Module[{dosZnameyStav = identifikaceStav[znameyStav], rce, Tvzduch, dos,
      rn, dosss, datPel, Tmin = -30., Tmax = 45, fpom, plP, plt1t2, sole, ple,
      Tmean, EmeanEl, ErealEl, Etopna, Pftopny, COPTpum, COPReal, vykon},
  rce = {m * c * (T1 - T2) == Ptopfcet, Ptopfcet == k * (
     $\frac{T1 + T2}{2} - Tin$ ),
    COP[Ta, T1] * Pel == Ptopfcet} /. dosZnameyStav;
  vykon[t_] = (Pel /. Quiet@Solve[rce, {T1, T2, Pel}][[1]]) /.
    {Ta -> Texterni[t], Ptopfcet -> Ptopny[t]};

  sole = NDSolve[{e[tStart] == 0, e'[t] == vykon[t], TforMean[tStart] == 0,
    TforMean'[t] == Texterni[t], eTopna[tStart] == 0, eTopna'[t] == Ptopny[t]},
    {e, TforMean, eTopna}, {t, tStart, tEnd}, MaxSteps -> 106][[1]];
  ple = Plot[ $\frac{e[t]}{10^6}$ , {t, tStart, tEnd}, AxesLabel -> {"t [s]", "E [MJ]"},
    PlotStyle -> {Black, Thick}, GridLines -> Automatic,
    AxesOrigin -> {tStart, 0}];
  Tmean = (TforMean[tEnd] - TforMean[tStart]) / (tEnd - tStart) /. sole;
  ErealEl = (e[tEnd] - e[tStart]) /. sole;
  Etopna = (eTopna[tEnd] - eTopna[tStart]) /. sole;

  COPReal =  $\left(\frac{ErealEl}{Etopna}\right)^{-1}$ ;
  {Tmean, {ErealEl, Etopna, COPReal}}
];
shift = 0 * den;
aa = vydej3[{parsDosStav, {ta + shift, ta + den + shift}, {TReal, PReal}}]
cc = vydej2[{parsDosStav, {ta + shift, ta + den + shift}, {TReal, fitReal}}]
 $\frac{aa[[2]] - cc[[2]]}{aa[[2]]} * 100$  (*chyby v procentach*)
{-1.82339, {6.41799 × 107, 2.758 × 108, 4.2973}}
{-1.82339, {6.45843 × 107, 2.77131 × 108, 4.29099}}
{-0.63012, -0.482522, 0.146675}

dd = vydej3[{parsDosStav, {ta + shift, ta + den + shift}, {TReal, PReal}}]
bb = vydej2[{parsDosStav, {ta + shift, ta + den + shift}, {TReal, fitFict}}]
 $\frac{dd[[2]] - bb[[2]]}{dd[[2]]} * 100$  (*chyby v procentach*)
{-1.82339, {6.41799 × 107, 2.758 × 108, 4.2973}}
{-1.82339, {6.53026 × 107, 2.75183 × 108, 4.21397}}
{-1.74927, 0.223806, 1.93915}

 $\frac{aa[[2]] - bb[[2]]}{aa[[2]]} * 100$ 
{-1.74927, 0.223806, 1.93915}

```



```

Quiet@Remove["Global`*"];
$HistoryLength = 2;
Off[FindRoot::lstol]
SetDirectory[NotebookDirectory[]];
c = 4186.;
hodina = 3600.;
den = hodina * 24.;
rok = 365.25 * den;
dosStav = {Ptop → 6000., T1 → 45, ΔT → 5., Tin → 20};
parsDosStav = #[[2]] & /@ dosStav;
Ptopny[T_] = << "Ptopny";
Tmez = Tt /. Solve[Ptopny[Tt] == 0][[1]];

Adenni = 7.5;
Arocni = 8.1;
meanRocni = 8.2;

Trok[t_] := meanRocni + Arocni * Sin[2. * Pi *  $\frac{t}{rok} + 1.4 * Pi$ ];

Ttrial[t_] := Trok[t] + Adenni * Sin[2. * Pi *  $\frac{t}{den}$ ];

Ttopime = 13.;
{t1, t2} =
  tTopim /. FindRoot[Trok[tTopim] == Ttopime, {tTopim, # * rok}] & /@ {0.7, 1.4};
Plot[Trok[t], {t, t1, t2}];
Plot[Ttrial[t], {t, t1, t2}];
{{t1, t2}, Ttrial[t], Trok[t]} >> "oTeplote";

kPower = 0.3;
{PelHP[Tvzduch_, Tvoda_], PtopHP[Tvzduch_, Tvoda_], COP[Tvzduch_, Tvoda_]} =
  {kPower, kPower, 1} * << "struct";

{{Tamin, Tamax}, {Tlmin, Tlmax}} = PelHP[a, b][[2, 0, 1]];

ClearAll[identifikaceStav];
identifikaceStav[{Ptop_, T1_, ΔT_, Tin_}] :=
  Module[{rceZnamyStav, T2 = T1 - ΔT},
    rceZnamyStav = {m * c * (T1 - T2) == Ptop, Ptop == k *  $\left(\frac{T1 + T2}{2} - Tin\right)}$ ;
    Solve[rceZnamyStav][[1]]
  ];
identifikaceStav[parsDosStav];

ClearAll[vydej2];
vydej2[{znamyStav : {Ptop_, T1znamy_, ΔT_, Tin_}, {tStart_, tEnd_},
  {Texterni_, Ptopny_}] := Module[{krokCasu = 0.5 * hodina, krokTeploty = 1.5,
  dosZnamyStav = identifikaceStav[znamyStav], rce, Tvzduch, dos, rn,
  dosss, datPel, Tmin = -30., Tmax, intPel, fpom, plP, plt1t2, sole, ple,
  Tmean, EmeanEl, ErealEl, Etopna, Pftopny, COPTpum, COPReal, rceHranice,
  poc, resHranice, TmezBivalence, rceCerpadlo100, res100, rceBivalenti,
  resBival, res, Pelektricky, Post, Pelint, datPost, Postint, Pcelkint,
  PfelTC, Ppost, Pfcelk, Eost, Ecelk, EostMean, dilciVysl, teploty},
  Tmax = T /. Solve[Ptopny[T] == 0, T][[1]];
  rceHranice[Tvzduch_] =
    {m * c * (T1 - T2) == Ptopny[Tvzduch], Ptopny[Tvzduch] == k *  $\left(\frac{T1 + T2}{2} - Tin\right)}$ ,
    COP[Tvzduch, T1] * Pel == Ptopny[Tvzduch],

```

```

Ptopny[Tvzduch] == PtopHP[Tvzduch, T1] } /. dosZnamyStav;
poc = {{Pel, 6000}, {T1, 45}, {T2, 40}, {Tvzduch, -5}};
resHranice = FindRoot[rceHranice[Tvzduch], poc];
TmezBivalence = Tvzduch /. resHranice;
(*Print["hranice bivalence je ", TmezBivalence, " °C"]*)
rceCerpadlo100[Tvzduch_] =
  {m * c * (T1 - T2) == Ptopny[Tvzduch], Ptopny[Tvzduch] == k * (
     $\frac{T1 + T2}{2} - Tin$ ),
  COP[Tvzduch, T1] * Pel == Ptopny[Tvzduch] } /. dosZnamyStav;

res100[Tvzduch_] := Union[FindRoot[rceCerpadlo100[Tvzduch],
  {{Pel, 6000}, {T1, 45}, {T2, 40}}], {PtopOstatni -> 0}];
(*res100[TmezBivalence]*)
rceBivalenti[Tvzduch_] =
  {m * c * (T1 - T2) == PtopHP[Tvzduch, T1], PtopHP[Tvzduch, T1] == k * (
     $\frac{T1 + T2}{2} - Tin$ ),
  COP[Tvzduch, T1] * Pel == PtopHP[Tvzduch, T1],
  PtopOstatni + PtopHP[Tvzduch, T1] == Ptopny[Tvzduch] } /. dosZnamyStav;
resBival[Tvzduch_] := FindRoot[rceBivalenti[Tvzduch],
  {{Pel, 6000}, {T1, 45}, {T2, 40}, {PtopOstatni, 1000}}];
(*resBival[TmezBivalence]*)
res[Tvzduch_] := Quiet@res100[Tvzduch] /; Tvzduch ≥ TmezBivalence;
res[Tvzduch_] := Quiet@resBival[Tvzduch] /; Tvzduch < TmezBivalence;
Pelektricky[Tvzduch_] := Pel /. res[Tvzduch];
Post[Tvzduch_] := PtopOstatni /. res[Tvzduch];
datPel = {#, Pelektricky[#]} & /@ Range[Tmin, Tmax, 0.1];
Pelint = Interpolation[datPel, InterpolationOrder -> 1];
(*Plot[Pelint[T], {T, -10, 14}]*)
datPost = {#, Post[#]} & /@ Range[Tmin, Tmax, 0.1];
Postint = Interpolation[datPost, InterpolationOrder -> 1];
(*Plot[Postint[T], {T, -10, 14}]*)
Pcelkint := Pelint[#] + Postint[#] &;
(*Plot[Pcelkint[T], {T, -10, 14}]*)
Pftopny[t_] := If[Ptopny[Texterni[t]] ≥ 0, Ptopny[Texterni[t]], 0.];
PfelTC[t_] := If[Ptopny[Texterni[t]] ≥ 0, Pelint[Texterni[t]], 0.];
Pfost[t_] := If[Ptopny[Texterni[t]] ≥ 0, Postint[Texterni[t]], 0.];
Pfcelk[t_] := If[Ptopny[Texterni[t]] ≥ 0, Pcelkint[Texterni[t]], 0.];

sole = NDSolve[{e[tStart] == 0, e'[t] == PfelTC[t], TforMean[tStart] == 0,
  TforMean'[t] == Texterni[t], eTopna[tStart] == 0, eTopna'[t] == Pftopny[t],
  eOst[tStart] == 0, eOst'[t] == Pfost[t], eCelk[tStart] == 0,
  eCelk'[t] == Pfcelk[t]}, {e, TforMean, eTopna, eOst, eCelk},
  {t, tStart, tEnd}, MaxSteps -> 106, MaxStepSize -> 0.1 * hodina][[1]];

ple = Plot[ $\frac{e[t]}{10^6}$ , {t, tStart, tEnd},
  AxesLabel -> {"t [s]", "E [MJ]"}, PlotStyle -> {Black, Thick},
  GridLines -> Automatic, AxesOrigin -> {tStart, 0}];
(*Plot[# [t], {t, tStart, tEnd}] & /@ {Pftopny, PfelTC, Pfost, Pfcelk}*)
Tmean = (TforMean[tEnd] - TforMean[tStart]) / (tEnd - tStart) /. sole;
EmeanEl = If[Ptopny[Tmean] ≥ 0, Pelint[Tmean] * (tEnd - tStart), 0.];
ErealEl = (e[tEnd] - e[tStart]) /. sole;
Etopna = (eTopna[tEnd] - eTopna[tStart]) /. sole;
Eost = (eOst[tEnd] - eOst[tStart]) /. sole;
Ecelk = (eCelk[tEnd] - eCelk[tStart]) /. sole;
EostMean = If[Ptopny[Tmean] ≥ 0, Postint[Tmean] * (tEnd - tStart), 0.];
dilciVysl = {Ecelk, Eost, ErealEl, EmeanEl, EostMean, Etopna};
{{tStart, tEnd}, dilciVysl, {Pelint, Postint}}

```

```

];
{{tStart, tEnd}, dilciVys1, {Pelint, Postint}} =
  vydej2[{parsDosStav, {0.5 * (t1 + t2), 0.5 * (t1 + t2) + 1 * den}, {Ttrial, Ptopny}}];

ClearAll[teplarenskyVypocet];
teplarenskyVypocet[{krokT_, krokt_}, {Texterni_, Ptopny_}, {tStart_, tEnd_}] :=
  Module[{Tmax, znuluj, Pel, Post, teploty, obory, oborySCetnostmi},
    Tmax = T /. Solve[Ptopny[T] == 0, T][[1]];
    Pel[T_] := If[T < Tmax, Pelint[T], 0.];
    Post[T_] := If[T < Tmax, Postint[T], 0.];
    (*Plot[{Pel[T], Post[T]}, {T, -10, 20}]*)
    teploty = Texterni /@ Range[tStart, tEnd, krokt];
    obory = Partition[Range[-30, 20, krokt], 2, 1];
    oborySCetnostmi =
      obory /. {T1_, T2_} -> {{T1, T2}, Length[Select[teploty, T1 < # < T2 &]]];
    Plus@@Quiet[oborySCetnostmi /. {{T1_, T2_}, n_} -> n * krokt *
      
$$\frac{\text{Length[teploty]}}{\text{Length[teploty]} + 1} * \{Pelint[0.5 * (T1 + T2)], Postint[0.5 * (T1 + T2)]\}]
  ];

teplarenskyVypocet[{0.5, hodina / 60.},
  {Ttrial, Ptopny}, {0.5 * (t1 + t2), 0.5 * (t1 + t2) + 1 * den}];
pom = dilciVys1[[2 ;; 3]] // Reverse;

$$\frac{\% - \%}{\%} * 100;$$

ClearAll[vydej4];
vydej4[{krokT_, krokt_}] := Module[{zasrTepl, errs},
  zasrTepl = teplarenskyVypocet[{krokT, krokt},
    {Ttrial, Ptopny}, {0.5 * (t1 + t2), 0.5 * (t1 + t2) + 1 * den}];
  errs = 
$$\frac{\text{pom} - \text{zasrTepl}}{\text{zasrTepl}} * 100;$$

  errs
];

vydej4[{1.2, 0.6 * hodina}];
ClearAll[lajnaCasu];
maxdT = 5;
mindT = 0.5;
lajnaCasu[krokT_] := Module[{errs, dats, lplPel, lplPost},
  errs = {#, vydej4[{krokT, #}]} & /@ Range[0.1 * hodina, 2 * hodina, 0.1 * hodina];
  lplPel = ListPlot[errs /. {dt_, {Pel_, Post_}} -> {dt, Pel},
    PlotRange -> All, AxesLabel -> {"Δt", "δPel [%]"},
    PlotStyle -> {Thickness[0.004], Hue[ $\frac{\text{krokT}}{\text{maxdT}}$ ]}, Joined -> True];
  lplPost = ListPlot[errs /. {dt_, {Pel_, Post_}} -> {dt, Post},
    PlotRange -> All, AxesLabel -> {"Δt", "δPost [%]"},
    PlotStyle -> {Thickness[0.004], Hue[ $\frac{\text{krokT}}{\text{maxdT}}$ ]}, Joined -> True];
  {lplPel}
];

datsLajna = lajnaCasu /@ Range[0.5, 5, 0.2];
Show[Flatten[datsLajna], PlotRange -> All]$$

```

```

ClearAll[lajnaTeploty];
maxdt = 2 * hodina;
mindt = 0.1 * hodina;
lajnaTeploty[krokCasu_] := Module[{errs, dats, lplPel, lplPost},
  errs = {#, vydej4[{#, krokCasu]}] & /@ Range[0.1, maxdT, 0.1];
  lplPel = ListPlot[errs /. {dt_, {Pel_, Post_}} => {dt, Pel},
    PlotRange -> All, AxesLabel -> {"ΔT", "δEel [%]"},
    PlotStyle -> {Thickness[0.004], Hue[ $\frac{\text{krokCasu}}{\text{maxdt}}$ ]}, Joined -> True];
  lplPost = ListPlot[errs /. {dt_, {Pel_, Post_}} => {dt, Post},
    PlotRange -> All, AxesLabel -> {"ΔT", "δPost [%]"},
    PlotStyle -> {Thickness[0.004], Hue[ $\frac{\text{krokCasu}}{\text{maxdt}}$ ]}, Joined -> True];
  {lplPel}
];
datsLajnaT = lajnaTeploty /@ Range[mindt, maxdt, mindt];
Show[Flatten[datsLajnaT], PlotRange -> All]

Plot[{Pelint[T], Postint[T]},
  {T, -10, 13.5}, AxesLabel -> {"T [C]", "Pel Post [W] "},
  PlotStyle -> {{Thick, Blue}, {Thick, Red}}, GridLines -> Automatic];

```

```

Quiet@Remove["Global`*"];
$HistoryLength = 2;
SetDirectory[NotebookDirectory[]];
c = 4186.;
den = 3600 * 24.;
rok = 365.25 * den;
kPower = 1;
{PelHP[Tvzduch_, Tvoda_], PtopHP[Tvzduch_, Tvoda_], COP[Tvzduch_, Tvoda_]} =
  {kPower, kPower, 1} * << "struct";

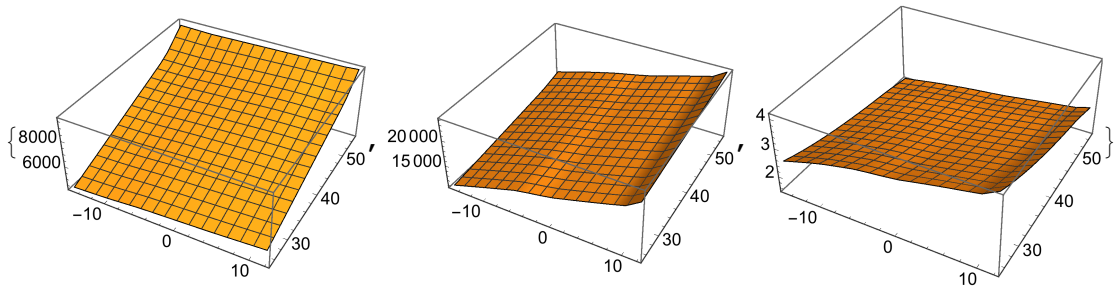
TprumDen = -10;
Ampl = 7;
teplota[t_] := TprumDen + Ampl * Sin[2 * Pi *  $\frac{t}{den}$ ];

TemperatureData = {{1, -1.4}, {2, -.2}, {3, 3.7}, {4, 8.9}, {5, 13.8}, {6, 17.2},
  {7, 19}, {8, 18.5}, {9, 14.8}, {10, 9.1}, {11, 4.1}, {12, .3}, {13, -1.4}};
pomfce = Interpolation[TemperatureData];
Temperature[m_] := pomfce[m] /; 1 ≤ m < 13;
Temperature[m_] := Temperature[m - 12] /; m ≥ 13;
Temperature[m_] := Temperature[m + 12] /; m < 1;
secondsInMonth = 365. * 24 * 3600 / 12;

teplsecpom[t_] := Temperature[ $\frac{t}{secondsInMonth}$ ];
year = 12 * secondsInMonth;
meanValueOfTemperature =  $\frac{1}{year}$  * Quiet@NIntegrate[teplsecpom[t], {t, 0, year}];
desiredMeanValue = 7.5;
teplsec[t_] := teplsecpom[t] - meanValueOfTemperature + desiredMeanValue;
teplDenni[t_] := Ampl * Sin[2 * Pi *  $\frac{t}{den}$ ] + teplsec[t];
Plot[teplsec[t], {t, 0, 12 * secondsInMonth}];

Quiet@Plot3D[# [Tvzduch, Tvoda], {Tvzduch, -15., 12.}, {Tvoda, 25., 55.}] & /@
  {PelHP, PtopHP, COP}

```



```

(*funkce "zpracuj" je vytvori z puvodnich interpolacnich funkci PelHP,
PtopHP a COP nove interpolacni funkce tak, aby byla interpolace prvnioho
radu. Pri vypoctech se totiz muzeme dostat mimo rozsah puvodnich
interpolacnich interpolacnich funkci a proklady vyssiho radu,
kdyz se dostaneme mimo rozsah, "utikaji" daleko*)
ClearAll[pehlp, ptophp, zpracuj, cop, Tvzduch, Tvoda];
zpracuj[fce_] := Module[{Tamin, Tamax, Tvmin, Tvmax, data, ΔT = 0.2},
  {{Tamin, Tamax}, {Tvmin, Tvmax}} = fce[T1, T2][[2, 0, 1]];
  data = Flatten[Table[{Ta, Tv, fce[Ta, Tv]},
    {Ta, Tamin, Tamax, ΔT}, {Tv, Tvmin, Tvmax, ΔT}], 1];
  Interpolation[data, InterpolationOrder → 1]
];
{pehlp, ptophp} = zpracuj /@ {PelHP, PtopHP};

cop[Tvzduch_, Tvoda_] := 
$$\frac{ptophp[Tvzduch, Tvoda]}{pehlp[Tvzduch, Tvoda]}$$
;
Quiet@Plot3D[#[Tvzduch, Tvoda],
  {Tvzduch, -20., 20.}, {Tvoda, 15., 70.}] & /@ {pehlp, ptophp, cop};

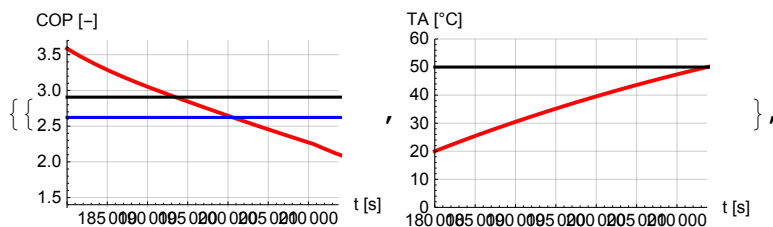
```

```

ClearAll[vydej];
vydej[{{Pel_, ml_, MA_, TStart_, Tzadana_}, {tStart_, Tvzduch_}}] :=
Module[{rce, tEnd, tmax, sol, c = 4186., ploty, Tmean,
  tEndpom, soltEnd, Tlmean, EmeanEl, ErealEl, COPTprum, COPReal,
  Etopna, TmeanDenni, EmeanElDenni, COPPrumDenni, Tnadrz},

rce =
{Ptopny[t] == Pel * cop[Tvzduch[t], Tl[t]], Ptopny[t] == ml * c (Tl[t] - TA[t]),
  MA * c * TA'[t] == Ptopny[t]
, TA[tStart] == TStart, e'[t] == Ptopny[t], e[tStart] == 0, eEl'[t] == Pel,
  eEl[tStart] == 0, TforMean'[t] == Tvzduch[t], TforMean[tStart] == 0};
tmax = tStart + 1 * den;
sol = Quiet@
  NDSolve[rce, {TA, Ptopny, e, eEl, Tl, TforMean}, {t, tStart, tmax}][[1]];
Tnadrz := TA /. sol;
soltEnd = FindRoot[Tnadrz[tEndpom] == Tzadana, {tEndpom, tStart + 0.05 * den}];
tEnd = tEndpom /. soltEnd;
Tmean = (TforMean[tEnd] - TforMean[tStart]) / (tEnd - tStart) /. sol;
TmeanDenni = (TforMean[tmax] - TforMean[tStart]) / (tEnd - tStart) /. sol;
Tlmean = 0.5 * (TStart + Tzadana);
ErealEl = (eEl[tEnd] - eEl[tStart]) /. sol;
Etopna = c * MA * (Tzadana - TStart);
EmeanEl = 
$$\frac{Etopna}{COP[Tmean, Tlmean]}$$
;
EmeanElDenni = 
$$\frac{Etopna}{COP[TmeanDenni, Tlmean]}$$
;
{COPTprum, COPReal, COPPrumDenni} =
{ $\frac{EmeanEl + 1}{Etopna}$ ,  $\frac{ErealEl + 1}{Etopna}$ ,  $\frac{EmeanElDenni + 1}{Etopna}$ }-1;
ploty = Quiet@{Plot[{COP[Tvzduch[t], Tl[t]] /. sol, COPTprum, COPPrumDenni},
  {t, tStart, tmax}, AxesLabel -> {"t [s]", "COP [-]"},
  PlotStyle -> {{Red, Thick}, Black, Blue},
  PlotRange -> {{tStart, tEnd}, Automatic}, GridLines -> Automatic},
  Plot[{TA[t] /. sol, Tzadana}, {t, tStart, tmax},
  AxesLabel -> {"t [s]", "TA [°C]"}, PlotStyle -> {{Red, Thick}, Black},
  PlotRange -> {{tStart, tEnd}, {0, Tzadana + 10}}, GridLines -> Automatic]
};
{ploty, {Tmean, {EmeanEl, ErealEl, Etopna, {COPTprum, COPReal},
  100. *  $\frac{ErealEl - EmeanEl}{ErealEl}$ , "% ", 100. *  $\frac{ErealEl - EmeanElDenni}{ErealEl}$ , "% "}}}
];
poom = vydej[{{2000, 0.5, 1500, 20, 50}, {180 000, teplDenni}}]

```



{3.8946, {6.48218 × 10⁷, 6.74872 × 10⁷, 1.8837 × 10⁸,
 {2.90596, 2.7912}, 3.94943, % , -6.4504, % }}}

```
gra = poom[[1, 1]];  
Export["gra.png", gra, ImageResolution -> 300]  
gra.png
```

```
grb = poom[[1, 2]];  
Export["grb.png", grb, ImageResolution -> 300]  
grb.png
```