ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

HODNOCENÍ PROVOZU TEPELNÉHO ČERPADLA V BYTOVÉM DOMĚ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Tomáš Bažant **č. 3-IB-2019**

ČVUT
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bažant** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **438305**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav techniky prostředí**

Studijní program: **Inteligentní budovy**

Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Hodnocení provozu tepelného čerpadla v bytovém domě

Název diplomové práce anglicky:

Evaluation of Heat Pump Operation in a Block of Flats

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte analýzu výpočtového hodnocení provozu tepelného čerpadla v daném bytovém domě. Porovnejte různé přístupy k výpočtu spotřeby elektrické energie navrženého tepelného čerpadla: zjednodušený v souladu s TNI 730331, s využitím intervalové metody v souladu s TNI 730351 (roční a měsíční rozlišení) a hodinovou simulaci provozního chování tepelného čerpadla.

Seznam doporučené literatury:

TNI 73 0331 Energetická náročnost budov - Typické hodnoty pro výpočet, UNMZ 2013
TNI 73 0351 Energetické hodnocení soustav s tepelnými čerpadly - Zjednodušený výpočtový postup, UNMZ 2014.
Podklady k přednáškám Alternativní zdroje energie, 2019.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Tomáš Matuška, Ph.D., ústav techniky prostředí FS

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

Datum zadání diplomové práce: **24.04.2019** Termín odevzdání diplomové práce: **24.06.2019**

Platnost zadání diplomové práce: _____

doc. Ing. Tomáš Matuška, Ph.D. podpis vedoucí(ho) práce	doc. Ing. Vladimír Zmrhal, Ph.D. podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	prof. Ing. Michael Valášek, DrSc. 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.

24.4.2019
Datum převzetí zadání

Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Souhrn

Tato diplomová práce se zabývá analýzou výpočtového hodnocení provozu tepelného čerpadla v bytovém domě. V práci jsou blíže popsána tepelná čerpadla a jednotlivé výpočtové metody. Pro daný bytový dům bylo navrženo tepelné čerpadlo, jehož provoz byl bilancován různými výpočtovými metodami. Cílem této práce bylo zjistit, jak se výsledky různých bilančních metod liší od podrobné hodinové simulace.

Summary

This diploma thesis deals with analysis of computational evaluation of heat pump operation in an apartment building. In this thesis are described types of heat pumps and individual calculation methods. A heat pump has been designed for a given apartment building, the operation of which has been balanced by various calculation methods. The aim of this thesis was to find out how the results of different balance methods differ from the detailed one-hour simulation.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Hodnocení provozu tepelného čerpadla v bytovém domě vypracoval samostatně dle pokynů vedoucího práce. Všechny použité zdroje jsem uvedl v závěru práce.

V Praze dne 24. 6. 2019 Bc. Tomáš Bažant

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce doc. Ing. Tomáši Matuškovi Ph.D. za vstřícnost, odborné vedení mé práce a cenné rady, které mi pomohly tuto práci dokončit. Děkuji také rodičům, sourozencům a přátelům za podporu po celou dobu studia.

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN

COP	[-]	Topný faktor
$COP_{gen,TV}$	[-]	Roční provozní topný faktor tepelného čerpadla pro přípravu teplé vody
$COP_{gen,VYT}$	[-]	Roční provozní topný faktor tepelného čerpadla pro vytápění.
COP_{TV}	[-]	Topný faktor tepelného čerpadla při přípravě teplé vody
COP_{VYT}	[-]	Topný faktor tepelného čerpadla při vytápění
E_{pom}	[kWh]	Potřeba pomocné elektrické energie
$E_{pom,TV}$	[kWh]	Potřeba pomocné energie pro přípravu teplé vody
$E_{pom,VYT}$	[kWh]	Potřeba pomocné energie pro vytápění
E_{sys}	[kWh]	Spotřeba elektrické energie celého systému
E_{TC}	[kWh]	Potřeba elektrické energie pro pohon tepelného čerpadla
$E_{TC,TV}$	[kWh]	Potřeba elektrické energie pro pohon TČ v režimu přípravy teplé vody
$E_{TC,VYT}$	[kWh]	Potřeba elektrické energie pro pohon TČ v režimu vytápění
E_{ZZ}	[kWh]	Potřeba elektrické energie záložního zdroje
$E_{ZZ,TV}$	[kWh]	Energie dodaná záložním zdrojem na přípravu teplé vody
$E_{ZZ,VYT}$	[kWh]	Energie dodaná záložním zdrojem na vytápění
H	[h]	Celková doba trvání potřeby tepla při přípravě teplé vody
H_j	[h]	Doba trvání intervalu j při přípravě teplé vody
n	[-]	Teplotní exponent
$P_{pom,TV}$	[kW]	Pomocná energie pro přípravu teplé vody
$P_{pom,VYT}$	[kW]	Pomocná energie pro vytápění
Q	[kWh]	Teplo dodané soustavou
$Q_{TC,dod}$	[kWh]	Energie dodaná tepelným čerpadlem

$Q_{TC,dod,TV}$	[kWh]	Energie dodaná za rok z tepelného čerpadla pro přípravu teplé vody
$Q_{TC,dod,VYT}$	[kWh]	Energie dodaná za rok z tepelného čerpadla pro vytápění
$Q_{TC,dis}$	[kWh]	Disponibilní energie z tepelného čerpadla
$Q_{TC,dis,TV}$	[kWh]	Disponibilní energie z tepelného čerpadla pro přípravu teplé vody
$Q_{TC,dis,VYT}$	[kWh]	Disponibilní energie z tepelného čerpadla pro vytápění
Q_{TV}	[kWh]	Potřeba tepla na přípravu teplé vody
Q_{VYT}	[kWh]	Potřeba tepla na přípravu teplé vody
$\dot{Q}_Z$	[kW]	Tepelná ztráta
Q_{ZZ}	[kWh]	Energie dodaná záložním zdrojem
SPF	[-]	Sezonní topný faktor
t_b	[°C]	Bod bivalence
t_e	[°C]	Venkovní teplota
$t_{e,N}$	[°C]	Výpočtová venkovní teplota
t_{em}	[°C]	Střední teplota venkovního vzduchu
$t_{em,j}$	[°C]	Střední teplota venkovního vzduchu v intervalu j
t_i	[°C]	Vnitřní teplota vzduchu
t_{k2}	[°C]	Teplota na výstupu z kondenzátoru
t_{TV}	[°C]	Teplota teplé vody
t_{v1}	[°C]	teplota na vstupu do výparníku
t_{w1}	[°C]	Ekvitermní teplota přívodní otopné vody
$t_{w1,N}$	[°C]	Jmenovitá teplota přívodní otopné vody
$t_{w2,N}$	[°C]	Jmenovitá teplota vratné otopné vody
$f_{H,COP}$	[-]	Součinitel ročního provozu tepelného čerpadla
$f_{H,COP,TV}$	[-]	Součinitel ročního provozu tepelného čerpadla při přípravě teplé vody
$f_{H,COP,VYT}$	[-]	Součinitel ročního provozu tepelného čerpadla při vytápění

$\phi_{TC,TV}$	[kW]	Tepelný výkon tepelného čerpadla při přípravě teplé vody
$\phi_{TC,VYT}$	[kW]	Tepelný výkon tepelného čerpadla při vytápění
τ_j	[h]	Doba trvání intervalu j
$\tau_{TC,TV}$	[h]	Doba chodu tepelného čerpadla při přípravě teplé vody
$\tau_{TC,VYT}$	[h]	Doba chodu tepelného čerpadla při vytápění
$t_{TC,TV,dis}$	[h]	Disponibilní doba provozu tepelného čerpadla při přípravě teplé vody
$t_{TC,VYT,dis}$	[h]	Disponibilní doba provozu tepelného čerpadla při vytápění
Δt_{TV}	[°C]	teplotní rozdíl zásobníku teplé vody při vytápění
Δt_w	[°C]	teplotní rozdíl zásobníku teplé vody při přípravě teplé vody

OBSAH

1. Úvod 9
2. Tepelná čerpadla 10
2.1 Princip funkce tepelného čerpadla 10
2.2 Druhy tepelných čerpadel 13
2.2.1 Typ země-voda 14
2.2.2 Typ vzduch-voda 15
2.2.3 Typ voda-voda 17
2.3 Parametry tepelných čerpadel 17
2.4 Soustavy s tepelnými čerpadly 19
2.5 Provoz tepelných čerpadel 20
3. Bilancování tepelného čerpadla 21
3.1 Obecné závislosti 21
3.1.1 Charakteristiky tepelných čerpadel 21
3.1.2 Provozní podmínky 23
3.2 Roční bilance podle TNI 730331 24
3.3 Měsíční bilance 26
3.4 Intervalová metoda 27
3.5 Hodinová bilance 33
4. Analýza v bytovém domě 34
4.1 Bytový dům 34
4.2 Návrh tepelného čerpadla pro bytový dům 37
4.3 Výsledky analýzy 39
4.3.1 Analýza roční bilance podle TNI 730331 41
4.3.2 Analýza měsíční bilance 42
4.3.3 Intervalová bilance 47
4.3.4 Hodinová bilance 54
4.4 Porovnání 59
5. Závěr 63
Seznam použitých zdrojů 65
Seznam obrázků 67
Seznam Tabulek 68
Seznam příloh 70

1. ÚVOD

Tepelná čerpadla patří mezi hojně zastoupené alternativní zdroje energie. Jejich použití v bytových domech není příliš rozšířené, přestože vhodně navržené tepelné čerpadlo muže snížit náklady na přípravu teplé vody a vytápění. Při hodnocení provozu tepelného čerpadla lze použít různé výpočtové metody. V této práci se pro bilancování tepelného čerpadla využívá hodinová simulace, měsíční zjednodušená metoda, měsíční intervalová metoda, roční intervalová metoda a roční metoda podle TNI 730331. Cílem této práce je zjištění, zda či o kolik se dané výpočtové metody od sebe liší a zda je ke správnému zhodnocení provozu tepelného čerpadla potřeba využívat podrobnou hodinovou simulaci, nebo stačí používat jiné výpočtově jednodušší metody.

V úvodní části této práce je vysvětlen princip funkce tepelných čerpadel, dále jsou zde popsány různé druhy tepelných čerpadel se zaměřením převážně na typ vzduch-voda, který je v současnosti nejvíce využívaný. Jsou zde popsány i základní parametry tepelných čerpadel jako je: topný výkon, topný faktor a sezonní topný faktor. Následuje popis základních soustav s využitím tepelných čerpadel pro přípravu teplé vody a vytápění a druhy provozních režimů.

Po teorii o tepelných čerpadlech následuje kapitola zaměřená na jejich provozní bilancování. Jsou v ní uvedené obecné závislosti, které platí pro většinu způsobů bilancování. Dále jsou zde popsány samotné metody bilancování i s obecným postupem výpočtu.

Přibližně od druhé poloviny této práce začíná samotná analýza. Pro zadaný bytový dům byla vybrána dvě tepelná čerpadla pro pokrytí potřeb tepla na vytápění a přípravu teplé vody. Tato tepelná čerpadla pak byla bilancována pomocí hodinové simulace, měsíční zjednodušené metody, měsíční intervalové metody, roční intervalové metody a roční metody podle TNI 730331. Následně byly výsledky těchto metod porovnány a vyhodnoceny. Závěr této práce je věnován celkovému zhodnocení výsledků analýzy.

2. TEPELNÁ ČERPADLA

Tepelná čerpadla jsou zařízení patřící k alternativním zdrojům energie. Umožňují čerpat tepelnou energii z prostředí o nízké teplotě a předávat ji do tepelných soustav o vyšší teplotě. Vzhledem k tomu, že mohou čerpat teplo z různých vnějších zdrojů jako například ze vzduchu, vody či země, tak významně snižují spotřebu energie v objektech, kde jsou umístěna. Dokážou využívat různé zdroje nízkopotenciálního tepla. Tyto zdroje rozdělujeme na dvě skupiny:

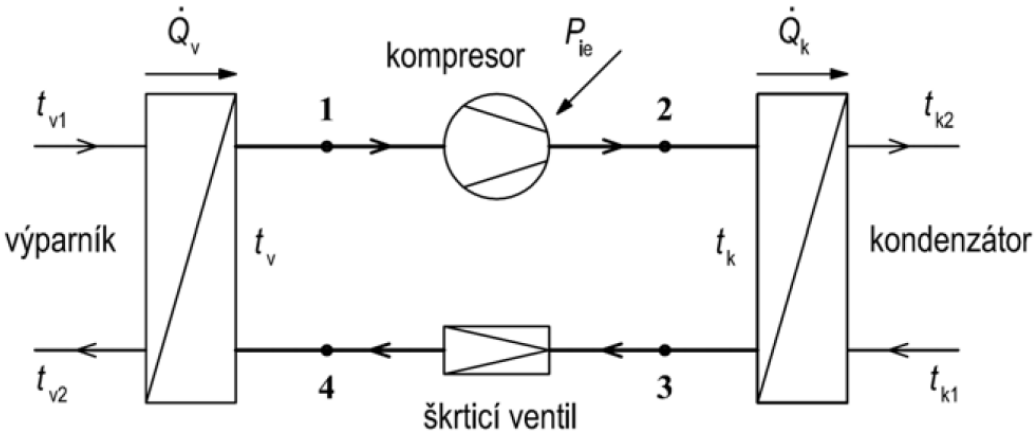
- **obnovitelné** – zde energie pochází z okolního prostředí. Například ze vzduchu, země či vody;
- **druhotné** – energie která může být i z neobnovitelných zdrojů. Například energie z odpadních vod či vzduchu.[1]

2.1 Princip funkce tepelného čerpadla

S myšlenkou principu tepelného čerpadla přišel v roce 1852 William Thomson Kelvin, ale poprvé ho sestrojil Robert C. Weber během svých pokusů s hlubokým zmrazováním. Princip spočívá ve využívání vlastností kapalin-chladiv, které se odpařují při nízkých teplotách a tlacích. Chladivo obíhá v uzavřeném okruhu. Z vnějšího prostředí odebírá teplo a předává ho ve výparníku. Zde chladivo mění při nízké tlaku a teplotě své skupenství z kapalného na plynné. Plynné chladivo se následně s využitím kompresoru stlačí, čímž se zvýší jeho teplota a tlak. Kompresor tak teplo z primárního zdroje převede na teplo o vyšším potenciálu (teplotě). Toto teplo je pak v kondenzátoru předáno otopné vodě. Předáním tepla se plynné chladivo ochladí a zkapalní. Expanzní ventil sníží tlak chladiva na původní hodnotu. Tento proces se pak neustále opakuje. Konstrukční uspořádání tepelného čerpadla je znázorněno na Obr. 1. Pro svoji funkčnost tepelné čerpadlo potřebuje elektrickou energii k napájení elektromotoru kompresoru a oběhových čerpadel primárního a sekundárního okruhu. Provoz tedy rozhodně není zadarmo. [1] [2]

Na stejném principu pracuje většina chladicích zařízení. Ta primárně využívají chladícího jevu, kde je teplo odebírané ochlazované látce a odpadní teplo je předáváno ohřívané látce. Takto fungují například lednice. Rozdíl mezi tepelným čerpadlem a chladicím zařízením není v principu fungování, ale v charakteru jejich využití. O tepelném čerpadle mluvíme tehdy, pokud se u daného zařízené účelně využívá především teplo předávané ohřívané látce. Přes zjevnou podobnost tepelných čerpadel

a chladicích zařízení nelze tyto stroje směšovat vzhledem k některým konstrukčním odlišnostem obou zařízení. [1] [2]



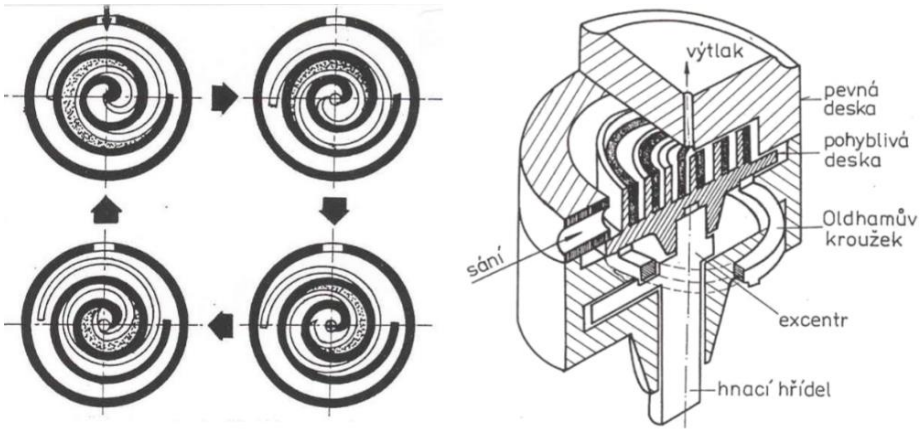
Obr. 1 Konstrukční uspořádání tepelného čerpadla [1]

Kompresor

Kompresor slouží k nasávání syté, nebo přehřáté páry při konstantním vypařovacím tlaku p_v a stlačování na vyšší kondenzační tlak p_k. Kompresor by měl splňovat kladené požadavky jako jsou například: dlouhá životnost, provozní spolehlivost, schopnost práce v požadovaném rozsahů teplot a tlaků či minimální potřeba údržby. Kompresor je nejčastěji poháněn elektrickým motorem. Konstrukce kompresorů lze rozdělit na dva základní typy:

pístové jde o nejstarší typ kde jsou páry chladiva nasávány sacím ventilem, pak píst tyto páry stlačí v pracovním válci. Po dosažení požadovaného tlaku par se výtlačný ventil otevře a páry jsou z kompresoru vytlačeny.

scroll tento typ kompresoru se u moderních tepelných čerpadel vyskytuje často. K sání a stlačování par totiž využívá pohybu pohyblivé spirály vůči statické spirále viz Obr. 2. Tím se plynule mění kompresní poměr a kompresor není tak hlučný. Díky této konstrukci má kompresor vyšší životnost, spolehlivost a účinnost díky eliminaci škodlivého prostoru. Nejsou zde potřeba žádné klikové mechanizmy a díky tomu je celkové množství pohyblivých částí znatelně menší. [3]



Obr. 2 Princip práce spirálového kompresoru a řez válcem spirálového kompresoru [3]

Výparník

Výparník je výměník tepla, který slouží k odebírání tepla nízkopotenciálnímu zdroji vypařováním chladiva. Výměník má primární a sekundární stranu. Na primární straně se teplonosná látka ochlazuje, zatímco na sekundární straně se za nízkého tlaku o teplotě nižší, než je výstupní teplota teplonosné látky se izobaricky odpařuje chladivo. U tepelných čerpadel se používá buď deskový nebo trubkový výměník. [1]

Kondenzátor

Kondenzátor je výměník tepla, který slouží pro předání tepla mezi chladivem a teplonosnou látkou, nejčastěji otopnou vodou. Přehřátá pára vstupující do kondenzátoru předává teplo otopné vodě. Výstupní teplota otopné vody je vždy o něco nižší, než je kondenzační teplota chladiva. U tepelných čerpadel se používají deskové výměníky. [1]

Expanzní ventil

Expanzní ventil je škrticím prvkem chladicího oběhu. Jeho účelem je udržovat tlakový rozdíl mezi nízkotlakou a vysokotlakou částí chladicího oběhu. Zároveň reguluje průtok chladiva z kondenzátoru do výparníku. Průchodem chladiva expanzním ventilem klesne tlak a část chladiva se vypaří. Do výparníku pak chladivo vstupuje ve stavu mokré páry.

U tepelných čerpadel pracujících v proměnlivých podmínkách se používají termostatické, nebo elektricky řízené expanzní ventily. Ty regulují průtok chladiva v závislosti na výstupní teplotě z výparníku. [1]

Chladivo

Chladivo je u tepelného čerpadla velmi podstatné, protože je pracovní látkou a nositelem energie. Chladiva mohou být různá, ale obecně je lze rozdělit na dvě základní skupiny, a to:

azeotropní jsou to taková, která se chovají jako čisté kapaliny. Během změny skupenství se složení par a kapaliny nemění. Mohou to být chladiva jednosložková, ale i vícesložková. Mezi azeotropní chladiva patří např. R22, R290 či azeotropní směs jako je např. R502 či R507. [1]

zeotropní jsou to směsi obvykle 2 až 4 druhů chladiv u kterých se mění složení během fázové přeměny. Pokud je rozdíl teplot nasycených par složek velmi malý, nazývají se blízce azeotropními. Mezi zeotropní chladiva patří např. R407a, zatímco R404a je směs blízce azeotropní. U zeotropních chladiv se udává tzv. teplotní skluz, což je rozdíl teplot varu i při stejném tlaku. [1]

Chladiva rozdělujeme podle chemického složení na tyto skupiny:

CFC jsou to plně halogenizované uhlovodíky a jejich směsi, tj. všechny atomy vodíku v molekule jsou nahrazeny atomy prvků ze skupiny halogenidů, tedy chlorem, fluorem, někdy i bromem. Někdy se nazývají „tvrdé freony“. Mezi tvrdé freony se řadí chladiva R11, R12, R13, R113, R114, R115, R502, R503 a další. [1]

HCFC jsou to chlorofluorované uhlovodíky, mají v molekule i atomy vodíku. Říká se jim „měkké freony“. Jsou to R21, R22, R141b, R142b, R123, R124. [1]

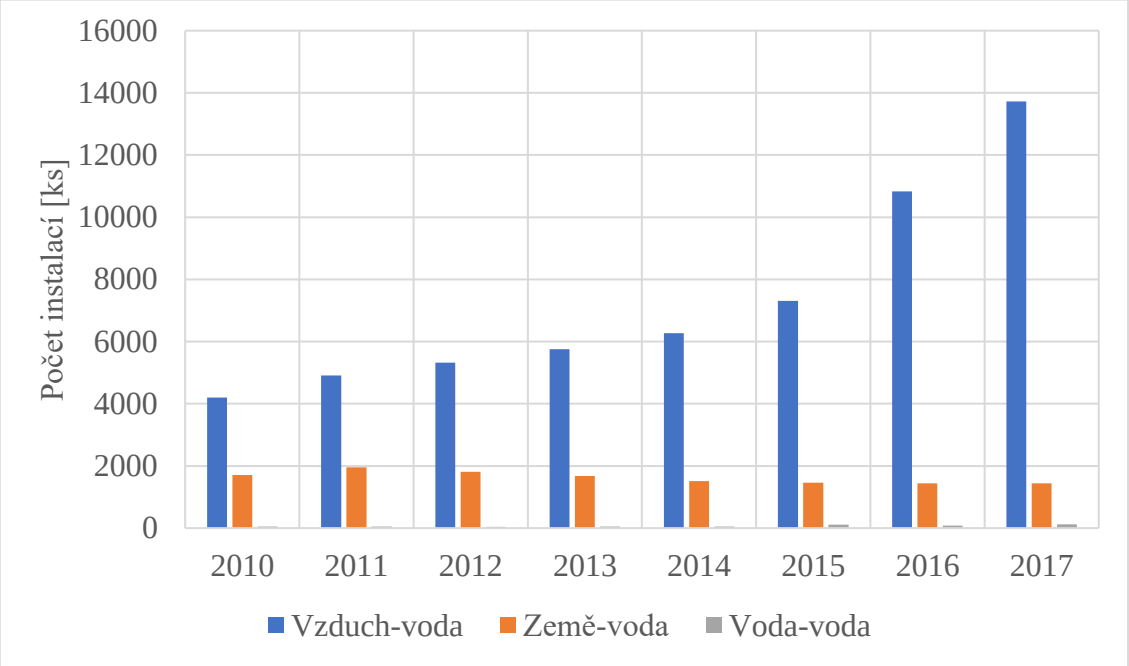
HCF nemají v molekule atomy chloru, jen fluor. Patří sem například R134a, R152a, R125, R32, R218, R407c, R404a. [1]

HC jsou to přírodní uhlovodíky a jejich směsi. Jsou zcela bez halogenidů, ale jsou hořlavé. [1]

2.2 Druhy tepelných čerpadel

Tepelná čerpadla se dělí do několika kategorií dle využívaného nízkopotenciálního zdroje tepla a teplonosné látky, do které je teplo přenášeno. V typovém označení jsou pak oba parametry odděleny pomlčkou. Nejprve je uváděn nízkopotenciální zdroj tepla (země, voda, vzduch) a po pomlčce následuje teplonosná

látka (voda, vzduch) do kterého je teplo přenášeno. Nejčastěji používané typy tepelných čerpadel jsou uvedeny níže na Obr. 3. [1]



Obr. 3 Vývoj počtu instalací tepelných čerpadel v Čechách

2.2.1 Typ země-voda

Typ tepelného čerpadla země-voda využívá teplo ze zemského masivu s využitím zemských kolektorů, nebo geotermálních vrtů. Jedná se o teplotně nejstabilnější typ, protože jeho závislost na venkovních klimatických podmínkách je velmi malá. Lze ho tedy využívat i v oblastech, kde je velmi nízká teplota okolního prostředí. Kvůli těmto vlastnostem je tento typ tepelného čerpadla druhým nejčastěji využívaným v Čechách [1]

Zemní kolektory

Pro využívání tepla z podpovrchových vrstev zemského masivu se využívá plošných zemních kolektorů. Tento systém vyžaduje velkou plochu pozemku, která nesmí být dále upravována kvůli možnému porušení kolektorů. [1]

Svislé zemní vrty

Pro využívání tepla ze zemského masivu se používají zemní vrty hluboké až 200 m. Zhotovení zemních vrtů je velmi nákladné, přesto je tento způsob odebírání tepla velmi rozšířený. Tento nízko potenciální zdroj tepla je téměř neovlivněn klimatickými podmínkami a má konstantní teplotu po dobu celého roku. Díky tomu se hodí i pro

chlazení v letních měsících. Na rozdíl od zemních kolektorů navíc nezabírají takovou plochu pozemku. [1] [5]

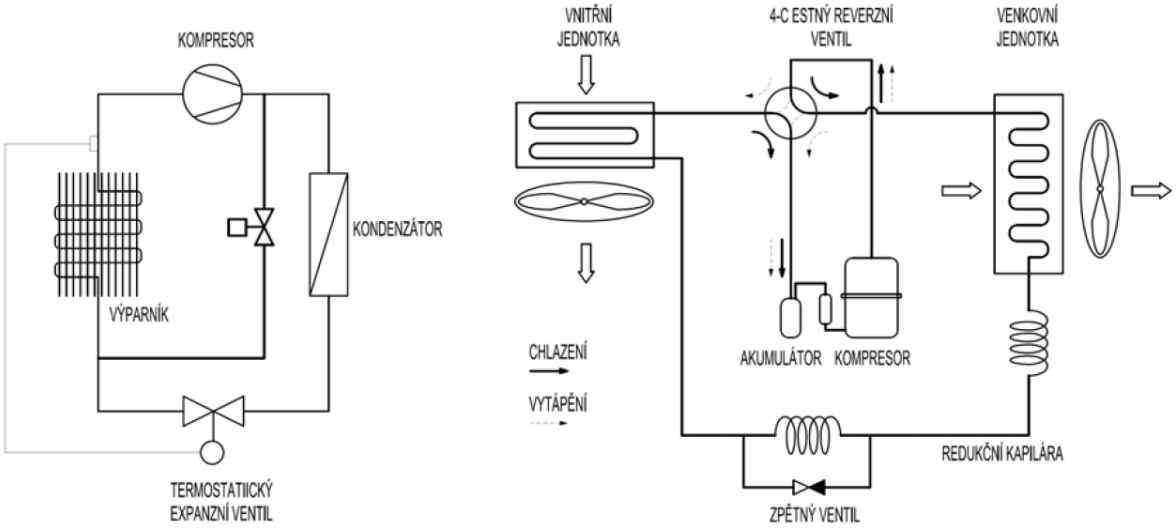
2.2.2 Typ vzduch-voda

Tepelné čerpadlo vzduch-voda využívá jako nízkopotenciální zdroj tepla venkovní vzduch. Mohou se vyskytovat ve vnitřním, nebo vnějším provedení. U vnitřních provedení se většinou na fasádu domu instalují vyústky pro nasávání venkovního vzduchu a výfuk pro odvádění ochlazeného vzduchu z tepelného čerpadla umístěného uvnitř budovy. U venkovního provedení se ven umisťuje celá jednotka, nebo pouze výparník. Lze ho instalovat ve většině lokalit, protože odpadají náročné zemní práce. Mezi nevýhody patří závislost na klimatických podmínkách. V zimních měsících, kdy je potřeba tepla nejvyšší, je ve vzduchu nejméně energie pro odebrání a v létě je tomu naopak. Kvůli nestálosti výkonu se tepelná čerpadla vzduch-voda navrhují jako bivalentní. Vysoké uplatnění nacházejí v systémech pro přípravu teplé vody či pro ohřev bazénové vody. V letních měsících dosahuje vysokých topných faktorů. Moderní tepelná čerpadla mohou pracovat i při venkovní teplotě vzduchu -20 °C. [1] [5]

U tepelného čerpadla může docházet ke kondenzaci vodní páry na výparníku. K tomuto jevu dochází, když je teplota výparníku nižší než teplota rosného bodu. Tento kondenzát se u vnitřních jednotek odvádí rovnou do kanalizace. Pokud je jednotka pod úrovní kanalizace, je nutné zajistit přečerpávání. V případě venkovních jednotek se kondenzát může nechat zasakovat do štěrkového lože.

Pokud je teplota pod bodem mrazu, tak může zkondenzovaná vodní pára namrzat. To je nežádoucí jev, protože vede ke snížení prostupu tepla, což ve výsledku vede ke snížení výkonu a topného faktoru tepelného čerpala. Aby k výraznému namrzávání nedocházelo, jsou tepelná čerpadla vybavena vnitřním odmrazováním, nebo vnějším ohřevem.

Vnitřní odmrazování se používá nejčastěji a je také nejúspornější. Lze toho dosáhnut reverzním chodem tepelného čerpadla viz Obr. 4. S využitím čtyřcestného ventilu se obrátí chod chladicího cyklu a po dobu odmrazování výparník pracuje jako kondenzátor a kondenzátor jako výparník. Další způsob, jak dosáhnou vnitřního odmrazování je využití horkých par chladiva. S využitím magnetického ventilu s omezovačem průtoku chladiva je horké chladivo na výstupu z kondenzátoru přivedeno do výparníku, který se ohřeje a vzniklá námraza začne odtávat.



Obr. 4 Cyklus odmrazování horkými parami a cyklus odmrazování reverzním chodem [1]

Vnější ohřev je realizován buď pomocí elektricky vyhřívaných topných tyčí umístěných mezi výparníkovým potrubím, nebo vnějším ohřevem vzduchu při teplotách nad 3 °C. Po zastavení tepelného čerpadla se pomocí ventilátoru přivádí vnější teplejší vzduch na namrzlé výparníkové potrubí.

Hlučnost

Častým problémem vzduchových tepelných čerpadel může být hlučnost. K té dochází zejména kvůli vysokým průtokům vzduchu na výparníku. K redukci nežádoucích zvukových projevů je potřeba dbát, aby:

- byly použity tlumiče chvění a hluku ve vedení vodního a vzduchového okruhu tepelného čerpadla;
- tepelné čerpadlo nebylo umístěno v blízkosti odrazových ploch, které vlivem odrazu zvukový vln mohou zesílit nežádoucí zvukové projevy;
- tepelné čerpadlo bylo umístěno na pružném podkladu, který bude tlumit vibrace;
- maximální rychlost proudění ve vzduchovodech a vyústkách nepřesahovala 3 m/s;
- okolní terén u tepelného čerpadla byl zatravněný;
- tepelné čerpadlo bylo dostatečně vzdáleno od posuzovaného místa, nebo izolováno protihlukovou bariérou.

2.2.3 Typ voda-voda

Tepelné čerpadlo voda-voda dosahuje nejlepších topných faktorů, ale je jen velmi málo lokalit, kde je vhodné ho použít. Nízkopotenciálním zdrojem tepla je voda:

- povrchová-říční toky t = 0 až 18 °C;
- podpovrchová-studny t = 8 až 12 °C;
- hlubinná-vrty t = 10 až 13 °C;
- geotermální t >25 °C;
- odpadní t = 20 až 25 °C.

Pro dosažení vysokého výkonu na primární straně je potřeba mít dostatečné množství a trvalý průtok vody. U tohoto systému je nejčastěji používaným zdrojem nízkopotenciálního tepla voda ze studny, nebo odpadní voda. Jednotka tepelného čerpadla bývá nejčastěji umístěna ve vytápěné budově. [1]

2.3 Parametry tepelných čerpadel

Tepelný výkon

Tepelný výkon je jedním z nejdůležitějších parametrů tepelných čerpadel. Hodnota tepelného výkonu uváděná výrobci často představuje jmenovitý výkon. To je výkon při jasně stanovených podmínkách:

- •vzduch-voda A2/W35 (teplota vzduchu na vstupu do výparníku 2 °C, teplota otopné vody z kondenzátoru 35 °C);
- •země-voda B0/W35 (teplota solanky na vstupu do výparníku 0 °C, teplota otopné vody z kondenzátoru 35 °C);
- •voda-voda W10/W35 (teplota vody na vstupu do výparníku 10 °C, teplota otopné vody z kondenzátoru 35 °C).

Tepelný výkon tepelného čerpadla lze stanovit z výkonových charakteristik udávaných výrobcem. [1] [11]

Topný faktor

Topný faktor je bezrozměrné číslo, kterým určujeme energetickou efektivitu tepelného čerpadla. Topný faktor značíme značku *COP* z anglického Coefficient of Performance. *COP* je poměr mezi dodaným teplem a elektrickou energií nutnou pro provoz tepelného čerpadla. Hodnota tepelného faktoru se standardně pohybuje v rozmezí 2,5 až 5 a platí, čím vyšší číslo tím je tepelné čerpadlo efektivnější. Topný faktor je definován vztahem: [1]

$$COP = \frac{Q_{TC,dod}}{E_{TC}} \quad (1)$$

kde je

$Q_{TC,dod}$ teplo dodávané tepelným čerpadlem, v kWh;

E_{TC} elektrická energie pro pohon tepelného čerpadla, v kWh.

Stejně jako u tepelného výkonu i hodnota *COP* závisí na provozních podmínkách tepelného čerpadla, a to na teplotě na vstupu do výparníku a na výstupní teplotě z kondenzátoru. Hodnotu *COP* lze zjistit z provozních charakteristik pro *COP*, které by měl uvádět výrobce tepelného čerpadla. [1] [5] [6]

Sezonní topný faktor

Sezonní topný faktor vyjadřuje efektivitu tepelné soustavy pro vytápění a přípravu teplé vody s tepelným čerpadlem v konkrétní budově s konkrétní otopnou soustavou. Značí se zkratkou *SPF* z anglického názvu seasonal performance factor. *SPF* se stanovuje za hodnocený časový úsek (nejčastěji za měsíc či za rok). Výpočet *SPF* je dán vztahem:

$$SPF = \frac{Q}{E_{TC}+E_{ZZ}+E_{pom}} \quad (2)$$

kde je

Q teplo dodané soustavou pro danou aplikaci (vytápění, teplá voda), v kWh;

E_{TC} potřeba elektrické energie pro pohon tepelného čerpadla, v kWh;

E_{ZZ} potřeba elektrické energie záložního zdroje (elektrokotle), v kWh;

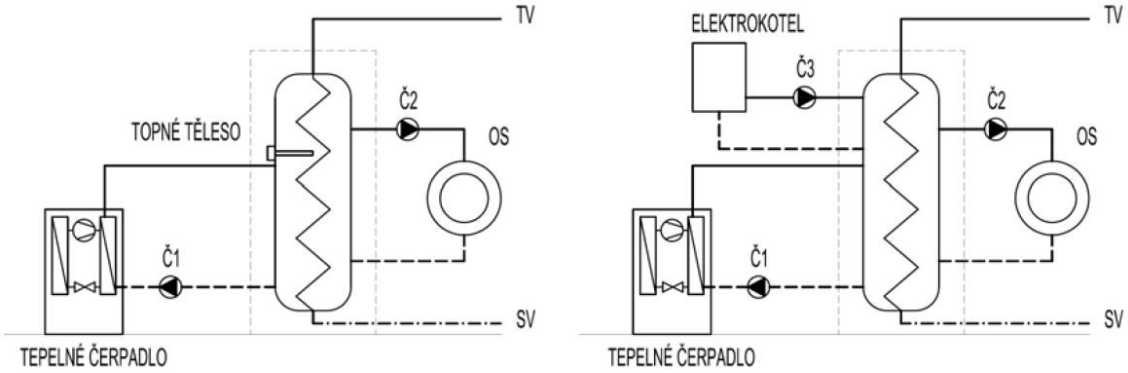
E_{pom} potřeba pomocné elektrické energie pro oběhová čerpadla, regulaci a další pomocná zařízení, v kWh.

Na rozdíl od topného faktoru, je v *SPF* zohledněna elektrické energie pro pomocná zařízení jako jsou například oběhová čerpadla, regulace, ventily, ventilátory atd.

Zohledňuje i elektrickou energii pro napájení záložního zdroje tepla v případě bivalentního provozu. Nejčastěji se hodnoty *SPF* pohybují v rozmezí 2,5 až 4,5. Čím je hodnota vyšší, tím efektivnější tepelná soustava je. [1]

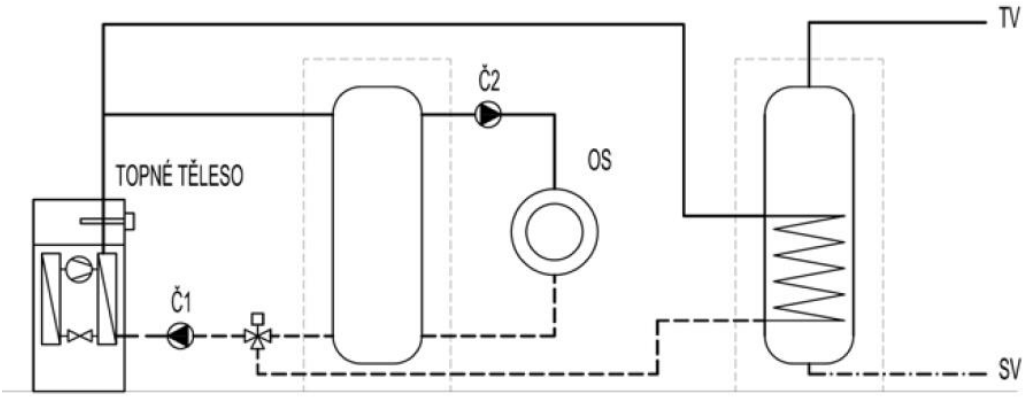
2.4 Soustavy s tepelnými čerpadly

Soustavy s tepelnými čerpadly se liší podle účelu a druhu provozu. Tepelná čerpadla mohu v soustavě sloužit k ohřevu vody v akumulačním kombinovaném zásobníku, ze kterého je pak teplo předáno otopné soustavě a soustavě s teplou vodou. V soustavě může být záložní zdroj tepla ve formě topného tělesa, nebo elektrokotle. Zapojení je znázorněno na Obr. 5.



Obr. 5 Zapojení tepelného čerpadla s kombinovaným zásobníkem a záložními zdroji tepla [1]

V soustavě může být ohřev otopné a teplé vody oddělen. V tomto případě mohou být použity dva akumulační zásobníky. Jeden pro přípravu teplé vody a druhý pro vytápění. Na regulátoru tepelného čerpadla se nastaví priorita ohřevu (TV, VYT) a na základě zvolené priority trojcestný ventil přepíná mezi oběma zásobníky. Zapojení je znázorněno na Obr. 6. Výměník tepla umístěný v zásobníku musí mít dostatečně velkou plochu pro přenesení tepelného výkonu při nízké teplotní úrovni otopné vody. [1]

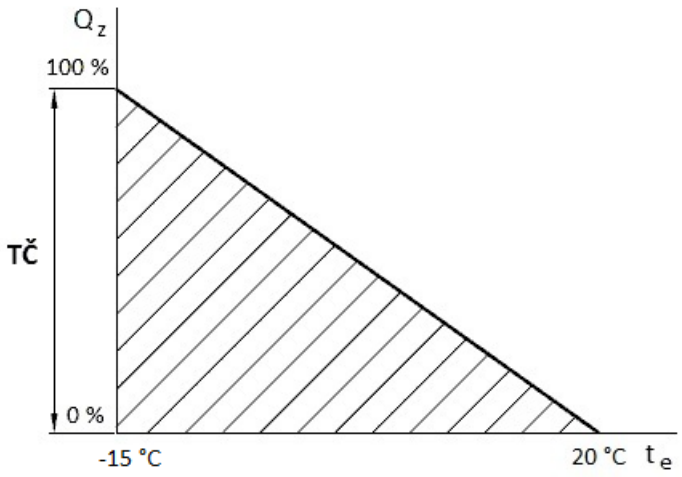


Obr. 6 Zapojení tepelného čerpadla s oddělenými zásobníky a záložním zdrojem tepla [1]

2.5 Provoz tepelných čerpadel

Monovalentní provoz

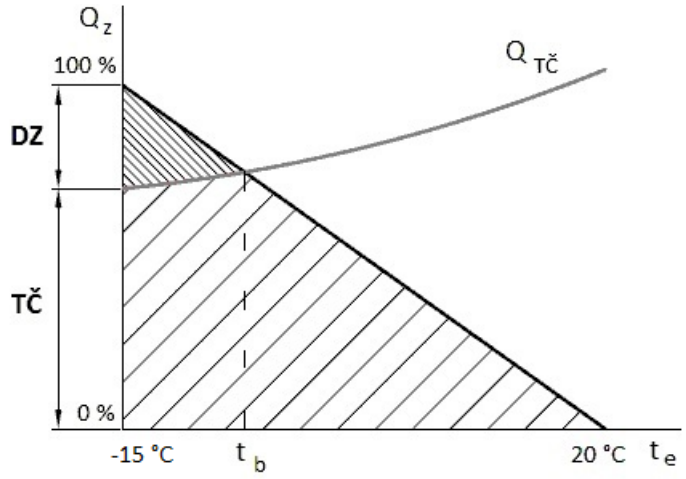
Monovalentní provoz tepelného čerpadla znamená, že použité tepelné čerpadlo má takový výkon, že pokryje celkovou potřebu tepla na vytápění a přípravu teplé vody. Monovalentní provoz bývá pro většinu budov neekonomický, protože pro většinu roku by pro pokrytí potřeb tepla stačilo použít tepelné čerpadlo o nižším výkonu. Investiční náklady tohoto stroje pak mohou být vysoké, protože je na rozdíl od bivalentního provozu potřeba tepelné čerpadlo o vyšším výkonu, pro který v letních měsících nemusí být uplatnění. Monovalentní provoz se tedy hodí spíše pro dobře izolované rodinné domy, u kterých celková tepelná ztráta nepřesahuje 10 kW, zde investiční náklady na potřebné tepelné čerpadlo nebudou tak vysoké. Průběh monovalentního provozu je znázorněn na Obr. 7. [6]



Obr. 7 Graf tepelné ztráty a výkonu tepelného čerpadla v závislosti na venkovní teplotě pro monovalentní provoz

Bivalentní provoz

Bivalentní provoz znamená, že tepelné čerpadlo nepokrývá celou potřebu tepla, ale zbylé nedodané teplo dodává záložní zdroj tepla. Toto nastává zejména v zimních měsících, kdy venkovní teplota klesne pod bod bivalence, pod kterým už tepelné čerpadlo nedokáže pokrýt potřebu tepla. To vede k tomu, že může být použito menší a levnější tepelné čerpadlo než u monovalentního provozu, ale na druhou stranu budou zvýšené provozní náklady na záložní zdroj, kterým bývá nejčastěji elektrokotel. Ten mají některá tepelná čerpadla v sobě již integrovaný. Zvýšený instalovaný elektrický příkon pro záložní zdroj si většinou vyžádá i vyšší paušální platby za jistič. Výkon tepelných čerpadel země-voda a voda-voda se obvykle navrhuje na 50 až 60 % vypočtených tepelných ztrát objektu, to by mělo pokrytí 82 až 89 % celkové roční spotřeby vytápění a záložní zdroj dodá zbývajících 11 až 18 %. U tepelných čerpadel vzduch-voda výkon klesá s poklesem venkovní teploty. Návrh je již poněkud náročnější a měl by vycházet z výkonových charakteristik uvažovaného zařízení. Je důležité, aby regulace záložního zdroje a tepelného čerpadla fungovala společně. Průběh bivalentního provozu je znázorněn na Obr. 8. [6]



Obr. 8 Graf tepelné ztráty a výkonu tepelného čerpadla v závislosti na venkovní teplotě pro bivalentní provoz

3. BILANCOVÁNÍ TEPELNÉHO ČERPADLA

3.1 Obecné závislosti

3.1.1 Charakteristiky tepelných čerpadel

Výrobci tepelných čerpadel by měli na základě zkoušky dle ČSN EN 14511 uvádět dostatečně detailní charakteristiky výkonu a topného faktoru. Potom lze provádět hodnocení těchto strojů při proměnlivých podmínkách. Pro tepelná čerpadla voda-voda

je potřeba mít alespoň 5 hodnot z 8 normou definovaných, pro typ země-voda to je minimálně 7 hodnot z 12 a pro typ vzduch-voda, který pracuje v největším rozsahu teplot je potřeba mít alespoň 12 hodnot z 20. V Tab. 1 lze vidět příklad charakteristik výkonu a topného faktoru uváděný výrobcem STIEBEL ELTRON.

Tab. 1 Příklad charakteristik výkonu a topného faktoru uváděné výrobcem pro tepelní čerpadlo vzduch-voda WPL 57 [12]

WQA	**Topný výkon [kW]**				**Topný faktor**			
[°C]	**35 °C**	**45 °C**	**55 °C**	**60 °C**	**35 °C**	**45 °C**	**55 °C**	**60 °C**
-20	16,5	17	18,9	19,9	2,1	1,8	1,7	1,6
-15	19,9	20,5	21,5	22	2,4	2,1	1,9	1,8
-7	23,9	24,7	25,4	25,8	2,7	2,4	2,1	2
2	29,9	30,9	31,5	31,8	3,3	2,8	2,4	2,2
7	29,9	28,4	27,1	26,5	3,4	2,8	2,4	2,2
10	33,6	30,2	31,4	32	3,8	3	2,7	2,5
15	37,1	35	35,1	35,2	4,1	3,3	2,9	2,7
20	40,6	39,8	38	37,1	4,5	3,6	3	2,8

Pro zjednodušení výpočtu lze proložit charakteristiky křivkou 2. nebo vyššího řádu. U tepelného čerpadla vzduch-voda je proložení obtížnější, protože charakteristiky nejsou monotónní, protože se zahrnuje sekvence odmrazování výparníku, a to se projevuje náhlým poklesem výkonu při venkovních teplotách mezi 5 až 10 °C. Proložení tedy není tak přesné jako u ostatních typů tepelných čerpadel. Pro tepelná čerpadla vzduch-voda se využívá vícenásobná regrese, ze které lze získat hodnoty koeficientů polynomu A, B, C, D, E, F pro výpočet tepelného výkonu a koeficienty a, b, c, d, e, f pro výpočet topného faktoru. Tepelný výkon a topný faktor tepelného čerpadla je pak určen pomocí následujících vztahů: [13]

$$\phi_{T\check{C}} = A + B \cdot t_{v1} + C \cdot t_{k2} + D \cdot t_{v1}^2 + E \cdot t_{k2}^2 + F \cdot t_{v1} \cdot t_{k2} \tag{3}$$

$$COP = a + b \cdot t_{v1} + c \cdot t_{k2} + d \cdot t_{v1}^2 + e \cdot t_{k2}^2 + f \cdot t_{v1} \cdot t_{k2} \tag{4}$$

kde je

$\phi_{T\check{C}}$ tepelný výkon tepelného čerpadla [kW];

COP topný faktor tepelného čerpadla [-];

t_{v1} teplota na vstupu do výparníku [°C];

t_{k2} teplota na výstupu z kondenzátoru [°C].

3.1.2 Provozní podmínky

U otopných soustav, zvláště napojených na tepelné čerpadlo se využívá ekvitermní regulace kvůli pozitivnímu vlivu na účinnost. Ekvitermní regulace teploty spočívá v nastavení teploty přívodní otopné vody (regulací zdroje tepla) na základě venkovní teploty. Při nižší venkovní teplotě je požadována vyšší teplota dodávané otopné vody, aby došlo k rovnováze mezi výkonem otopných ploch a tepelnými ztrátami místnosti a teplota místnosti tak zůstala konstantní. Průběh ekvitermních křivek je znázorněn na Obr. 9. Výpočet ekvitermní teploty otopné vody je dán vztahem: [13]

$$t_{w1} = t_i + \frac{t_{w1,N} - t_{w2,N}}{2} \cdot \frac{t_i - t_e}{t_i - t_{e,N}} + \left(\frac{t_{w1,N} + t_{w2,N}}{2} - t_i\right) \cdot \left(\frac{t_i - t_e}{t_i - t_{e,N}}\right)^{1/n} \quad (5)$$

$$t_{k2} = t_{w1} + \Delta t_w \quad (6)$$

kde je

t_{w1} ekvitermní teplota přívodní otopné vody [°C].;

$t_{w1,N}$ jmenovitá teplota přívodní otopné vody [°C];

$t_{w2,N}$ jmenovitá teplota vratné otopné vody [°C];

t_i vnitřní teplota vzduchu [°C];

t_e venkovní teplota vzduchu [°C];

$t_{e,N}$ výpočtová venkovní teplota vzduchu [°C];

t_{k2} teplota na výstupu z kondenzátoru [°C];

n teplotní exponent [-];

Δt_w teplotní rozdíl zásobníku teplé vody při vytápění [°C].

Teplota na výstupu z kondenzátoru se při přípravě teplé vody vypočítá podle vztahu:

$$t_{k2} = t_{TV} + \Delta t_{TV} \quad (7)$$

kde je

t_{TV} teplota teplé vody [°C].

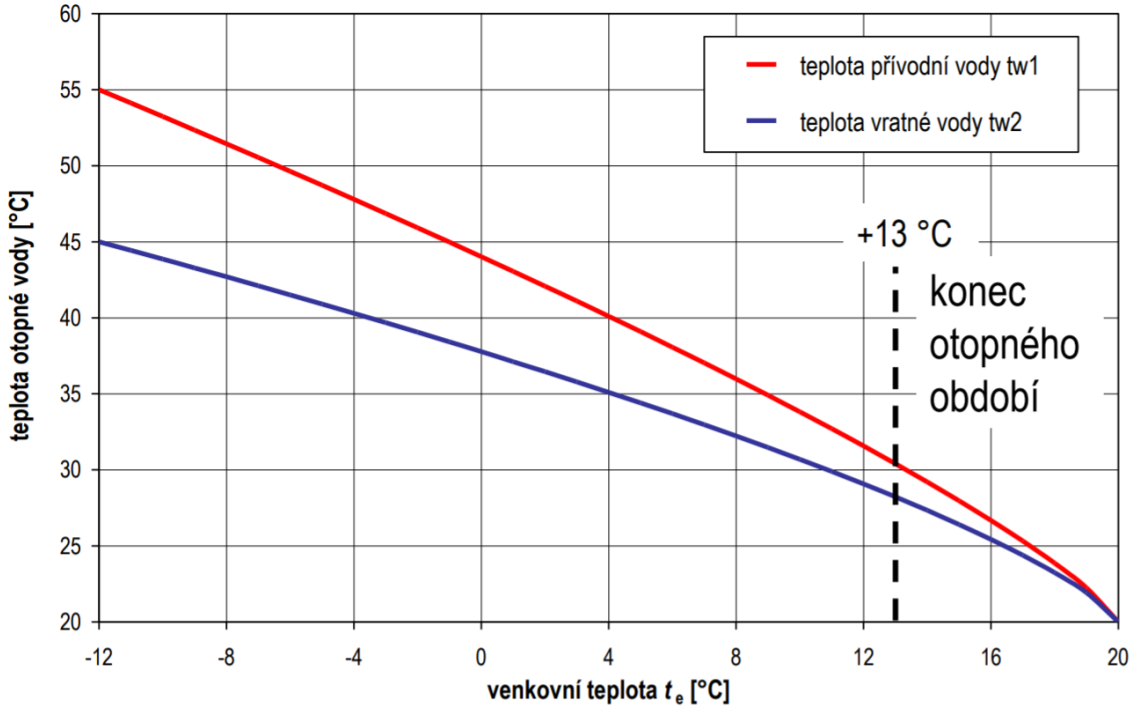
Δt_{TV} teplotní rozdíl zásobníku teplé vody při přípravě teplé vody [°C].

Teplota na vstupu do výparníku se liší podle použitého typu tepelného čerpadla.

- vzduch-voda: $t_{v1} = t_e$; (8)
- voda-voda: $t_{v1} = 10$ °C;
- země-voda. $t_{v1} = max[0°C; min(0{,}15 \cdot t_{em} + 1{,}5\ °C; 4{,}5\ °C)]$; (9)

kde je

t_{em} střední teplota venkovního vzduchu ve °C.



Obr. 9 Ukázka ekvitermních křivek [13]

3.2 Roční bilance podle TNI 730331

Dle TNI 730331 se roční provozní topný faktor tepelného čerpadla COP_{gen} stanoví podle vztahu:

$$COP_{gen} = f_{COP} \cdot COP \quad (10)$$

kde je

COP jmenovitý topný faktor stanovený při jmenovitých podmínkách [-];

f_{COP} součinitel ročního provozu tepelného čerpadla, který se stanoví podle Tab. 2 pro režim vytápění, nebo podle Tab. 3 pro systémy přípravy teplé vody [-]. [13]

Tab. 2 Součinitel ročního provozu tepelného čerpadla $f_{COP,VYT}$ pro vytápění [13]

Návrhová výstupní teplota otopné vody [°C]	**Vzduch-voda $f_{COP,VYT}$**	**Země-voda $f_{COP,VYT}$**	**Voda-voda $f_{COP,VYT}$**
35	1,02	1,07	1
45	0,93	0,94	0,89
55	0,83	0,81	0,76

Tab. 3 Součinitel ročního provozu tepelného čerpadla $f_{COP,TV}$ pro přípravu teplé vody [13]

Požadovaná teplota teplé vody [°C]	**Vzduch-voda $f_{COP,TV}$**	**Země-voda $f_{COP,TV}$**	**Voda-voda $f_{COP,TV}$**
40	0,94	0,86	0,8
50	0,77	0,66	0,61
60	0,6	0,45	0,42

Pokud je známa roční potřeba tepla na vytápění a přípravu teplé vody, tak lze spočítat roční spotřebu elektrické energie podle následujících vztahů:

$$E_{TC,TV} = \frac{Q_{TC,dod,TV}}{COP_{gen,TV}} \quad (11)$$

$$E_{TC,VYT} = \frac{Q_{TC,dod,VYT}}{COP_{gen,VYT}} \quad (12)$$

kde je

$E_{TC,TV}$ potřeba elektrické energie pro pohon TČ v režimu přípravy teplé vody [kWh];

$E_{TC,\mathrm{VYT}}$ potřeba elektrické energie pro pohon TČ v režimu vytápění [kWh];

$Q_{TC,dod,TV}$ energie dodaná za rok z tepelného čerpadla pro přípravu teplé vody TV [kWh];

$Q_{TC,dod,vyt}$ energie dodaná za rok z tepelného čerpadla pro krytí potřeby vytápění [kWh];

$COP_{gen,TV}$ roční provozní topný faktor tepelného čerpadla pro přípravu teplé vody [-];

$COP_{gen,VYT}$ roční provozní topný faktor tepelného čerpadla pro vytápění [-].

Pro zhodnocení roční efektivity systému pak slouží sezónní topný faktor daný vztahem:

$$SPF = \frac{Q_{TV}+Q_{VYT}}{E_{sys}} \quad (13)$$

kde je

SPF sezonní topný faktor [-];

Q_{TV} potřeba tepla na přípravu teplé vody [kWh];

Q_{VYT} potřeba tepla na přípravu teplé vody [kWh];

E_{sys} spotřeba elektrické energie celého systému [kWh].

Nevýhoda bilancování podle TNI 730331 je v tom, že se ve výpočtu nezohledňuje záložní zdroj. Pokud tepelné čerpadlo pracuje v bivalentním režimu, tak se reálná roční spotřeba energie bude odlišovat od vypočtené spotřeby. V běžných instalacích záložní zdroj pokrývá řádově jednotky procent spotřeby, takže odchylka od celkové skutečné spotřeby nemusí být výrazná. Pouze u výrazně poddimenzovaných instalací by byla odchylka velká. To samé platí o hodnotě sezónního topného faktoru. Ve výpočtu také není zahrnuta pomocná energie pro provoz oběhových čerpadel, ventilů a dalších pomocných zařízeních.

3.3 Měsíční bilance

Měsíční bilance podle střední venkovní teploty také v podstatě nezohledňuje vliv záložního zdroje, protože průměrné měsíční teploty jsou zřídka pod teplotou bivalence a skutečný vliv záložního zdroje na celkovou bilanci je neznámý. Ve výpočtu také není zahrnuta pomocná energie. Výpočet probíhá podle následujícího postupu na měsíční bázi. Pro střední venkovní teplotu v každém měsíci je podle vztahu (5) vypočtena ekvitermní teplota přívodní otopné vody t_{w1}. Teplota na výstupu z kondenzátoru t_{k2} pro režim vytápění je vypočtena podle vztahu (6). Teplota na vstupu do výparníku t_{v1} je určena podle typu tepelného čerpadla viz podkapitola 3.1.2. Teplota na výstupu z kondenzátoru t_{k2} pro režim přípravy teplé vody je vypočítána podle vztahu (7) uvedeném v podkapitole 3.1.2. Z charakteristik výkonu a topného faktoru tepelného čerpadla jsou získány hodnoty koeficientů polynomů. Podle vztahu (4) uvedeném v podkapitole 3.1.1 je vypočten topný faktor COP pro režim vytápění a přípravu teplé vody v jednotlivých měsících. Výpočet potřeby elektrické energie pro pohon tepelného čerpadla při přípravě teplé vody je dán následujícím vztahem: [13]

$$E_{TC,TV} = \frac{Q_{TV}}{COP_{TV}} \tag{14}$$

kde je

$E_{TC,TV}$ potřeba elektrické energie pro pohon tepelného čerpadla při přípravě teplé vody [kWh];

Q_{TV} potřeba tepla při přípravě teplé vody [kWh];

COP_{TV} topný faktor tepelného čerpadla při přípravě teplé vody [-].

Výpočet potřeby elektrické energie pro pohon tepelného čerpadla při vytápění je dán vztahem:

$$E_{TC,VYT} = \frac{Q_{VYT}}{COP_{VYT}} \quad (15)$$

kde je

$E_{TC,VYT}$ potřeba elektrické energie pro pohon tepelného čerpadla při vytápění [kWh];

Q_{VYT} potřeba tepla na vytápění [kWh];

COP_{TV} topný faktor tepelného čerpadla při vytápění [-].

Sezonní topný faktor se vypočítá podle vztahu:

$$SPF = \frac{Q_{TV}+Q_{VYT}}{E_{sys}} \quad (16)$$

kde je

Q_{TV} potřeba tepla na přípravu teplé vody [kWh];

Q_{VYT} potřeba tepla na vytápění [kWh];

E_{sys} spotřeba elektrické energie celého systému [kWh].

3.4 Intervalová metoda

Intervalová metoda představuje zjednodušenou metodu hodnocení provozu tepelného čerpadla pro přípravu teplé vody a vytápění. Postup výpočtu je popsán v technické normalizační informaci TNI 73 0351 a vychází z potřeb tepla budovy, parametrů tepelného čerpadla stanovených zkouškou dle ČSN EN 14511, klimatických podmínek a parametrů tepelné soustavy v budově. Základním principem výpočtového postupu je bilance energetických toků v dílčích teplotních intervalech. Teploty během

celého roku či během jednotlivých měsíců jsou rozděleny do teplotních intervalů o šířce 1 K a stanovujeme, jakou dobu byla venkovní teplota vzduchu v daném teplotním intervalu. Pro jednotlivé teplotní intervaly se pak řeší bilance energetických toku s využitím střední venkovní teploty a doby trvání intervalu. [13] [14]

Je žádoucí využívat klimatická data o četnosti venkovní teploty během celého roku či jednotlivých měsíců co nejblíže k umístění tepelného čerpadla, ale tato data nejsou zpravidla dostupná. Pro obecný bilanční výpočet s měsíčním, nebo ročním rozlišením lze použít klimatické údaje uvedené v TNI 73 0331. Jsou-li k dispozici hodinová klimatická data o venkovní teplotě, třeba referenční klimatický rok, tak z nich lze získat četnost venkovních teplot v požadovaných teplotních intervalech. Každý teplotní interval je charakterizován:

- horní a dolní teplotou venkovního vzduchu
- střední teplotou vzduchu
- trváním (hodiny)

Intervalová metoda je zjednodušena zejména v tom, že:

- nezohledňuje tepelná čerpadla s regulací výkonu – většinou výrobci ani veřejně neuvádějí hodnoty výkonu a topného faktoru při snížených otáčkách kompresoru;
- do výpočtu nezahrnuje tepelné ztráty zásobníku – předpokládá se, že tepelné ztráty jsou zahrnuty do potřeb tepla na přípravu teplé vody anebo na vytápění;
- se nezabývá vlivem blokace chodu tepelného čerpadla ve vysokém tarifu.

[13]

Postup výpočtu

Postup výpočtu intervalové metody lze použít jak pro samostatné vytápění, nebo přípravu teplé vody, ale také pro kombinovaný provoz vytápění a přípravy teplé vody. Jedná-li se o kombinovaný provoz, tak je nutné určit, jaký režim je prioritní a pro ten zpracovávat bilanci jako první. Zpravidla to bývá příprava teplé vody, protože v případě nedostatečného výkonu v tomto režimu uživatel změnu pozná téměř okamžitě. [13]

Pro střední teplotu každého teplotního intervalu se stanoví:

- potřeba tepla budovy;
- podmínky provozu tepelného čerpadla (t_{v1}, t_{k2});
- tepelný výkon a topný faktor tepelného čerpadla;
- disponibilní energie z tepelného čerpadla;
- dodaná energie z tepelného čerpadla pro krytí potřeby tepla budovy;
- potřeba elektřiny pro tepelného čerpadla;
- potřeba dodatkového tepla ze záložního zdroje;
- provozní doba tepelného čerpadla;
- potřeba pomocné elektřiny.

Potřeba tepla na vytápění se rozdělí do teplotních intervalů podle vztahu:

$$Q_{VYT,j} = Q_{VYT}\frac{DH_j}{DH} = Q_{VYT}\frac{(t_i - t_{em,j})\cdot\tau_j}{\sum_j DH_j} \quad (17)$$

kde je

$Q_{VYT,j}$ potřeba tepla na vytápění v intervalu j [kWh];

Q_{VYT} celková potřeba tepla na vytápění [kWh];

t_i vnitřní teplota vzduchu [°C];

$t_{em,j}$ střední teplota venkovního vzduchu v intervalu j [°C];

τ_j doba trvání intervalu j [h].

Celková potřeba tepla na vytápění Q_{VYT} je ekvivalentní hodinostupním v daném období.

Rozpočet potřeby tepla na přípravu teplé vody je proveden pomocí vztahu:

$$Q_{TV,j} = Q_{TV}\frac{H_j}{H} = Q_{TV}\frac{H_j}{\sum_j H_j} \quad (18)$$

kde je

Q_{TV} celková potřeba tepla na přípravu teplé vody, v kWh;

H_j doba trvání intervalu j [h];

H celková doba trvání potřeby tepla na přípravu teplé vody (rok = 8760 h) [h].

Teplota na výstupu z kondenzátoru se vypočítá podle vztahů (5), (6) a (7) uvedených v podkapitole 3.1.2.

Známe-li charakteristiky tepelného čerpadla, teplotu na vstupu do výparníku a teplotu na výstupu z kondenzátoru, lze spočítat tepelný výkon a topný faktor tepelného čerpadla. Postup výpočtu je uveden v podkapitole 3.1.1 Poté je vypočtena disponibilní energii z tepelného čerpadla pro krytí potřeby tepla na přípravu teplé vody podle vztahu:

$$Q_{TC,dis,TV,j} = \phi_{TC,TV,j} \cdot \tau_j \quad (19)$$

kde je

$Q_{TC,dis,TV,j}$ disponibilní energii z tepelného čerpadla pro přípravu teplé vody [kWh];

$\phi_{TC,TV,j}$ tepelný výkon tepelného čerpadla při přípravu teplé vody [kW];

τ_j doba trvání intervalu [h].

Dodané množství tepla tepelným čerpadlem pro přípravu teplé vody je v podstatě minimální hodnotou z dostupného množství tepla a potřeby tepla.

$$Q_{TC,dod,TV} = \min(Q_{TC,dis}; Q_{TV}) \quad (20)$$

kde je

$Q_{TC,dod,TV}$ dodané množství tepla tepelným čerpadlem při přípravě teplé vody [kWh];

$Q_{TC,dis}$ dispoziční energie z tepelného čerpadla, [kWh];

Q_{TV} Potřeba tepla při přípravě teplé vody [kWh].

Z dodané energie tepelným čerpadlem a topného faktoru COP lze vypočítat potřebu elektrické energie pro pohon tepelného čerpadla při přípravě teplé vody podle následujícího vztahu:

$$E_{TC,TV} = \frac{Q_{TC,dod,TV}}{COP_{TV}} \quad (21)$$

kde je

$E_{TC,TV}$ potřeba elektrické energie pro pohon tepelného čerpadla při přípravě teplé vody [kWh];

$Q_{TC,dod,TV}$ dodané množství tepla tepelným čerpadlem při přípravě teplé vody [kWh];

COP_{TV} topný faktor tepelného čerpadla při přípravě teplé vody [-].

Energie dodaná záložním zdrojem při přípravě teplé vody se vypočte podle následujícího vztahu:

$$E_{ZZ,TV} = Q_{TV} - Q_{TC,dod,TV} \quad (22)$$

kde je

$E_{ZZ,TV}$ energie dodaná záložním zdrojem při přípravě teplé vody [kWh];

$Q_{TC,dod,TV}$ dodané množství tepla tepelným čerpadlem pro přípravu teplé vody [kWh];

Q_{TV} potřeba tepla na přípravu teplé vody [kWh].

Výpočet doby chodu tepelného čerpadla při přípravě teplé vody je dán vztahem:

$$\tau_{TC,TV} = \frac{Q_{TC,dod,TV}}{\phi_{TC,TV}} \quad (23)$$

kde je

$\tau_{TC,TV}$ doba chodu tepelného čerpadla při přípravě teplé vody [h];

$Q_{TC,dod,TV}$ dodané množství tepla tepelným čerpadlem pro přípravu teplé vody [kWh];

$\phi_{TC,TV}$ tepelný výkon při přípravě teplé vody [kW].

Výpočet potřeby pomocné energie při přípravě teplé vody je dán vztahem:

$$E_{pom,TV} = P_{pom,TV} \cdot \tau_{TC,TV} \quad (24)$$

kde je

$E_{pom,TV}$ potřeba pomocné energie při přípravě teplé vody [kWh];

$P_{pom,TV}$ pomocná energie při přípravě teplé vody (ventily, regulace atd.) [kW];

$\tau_{TC,TV}$ doba chodu tepelného čerpadla při přípravě teplé vody [h].

Bilancování pro vytápění je analogické jako pro TV, jen jsou použity hodnoty pro vytápění. Pokud jde o kombinovaný provoz vytápění a přípravy teplé vody s prioritní přípravou teplé vody, tak se disponibilní doba provozu tepelného čerpadla při vytápění vypočte podle vztahu:

$$t_{TC,VYT,dis} = \tau_j - \tau_{TC,TV} \quad (25)$$

kde je

$t_{TC,VYT,dis}$ disponibilní doba provozu tepelného čerpadla při vytápění [h];

τ_j doba trvání intervalu [h];

$\tau_{TC,TV}$ doba chodu tepelného čerpadla při přípravě teplé vody [h].

Výpočet disponibilní energie z tepelného čerpadla při vytápění je dán vztahem:

$$Q_{TC,dis,VYT} = \tau_{TC,VYT,dis} \cdot \phi_{TC,VYT} \quad (26)$$

Výpočet dodané energie z tepelného čerpadla při vytápění je dán vztahem:

$$Q_{TC,dod,VYT} = \min(Q_{TC,dis,VYT}; Q_{VYT}) \quad (27)$$

Výpočet potřeby elektrické energie pro pohon tepelného čerpadla při vytápění je dán vztahem:

$$E_{TC,VYT} = \frac{Q_{TC,dod,VYT}}{COP_{VYT}} \quad (28)$$

Výpočet energie dodaná záložním zdrojem tepla při vytápění je dán vztahem:

$$E_{ZZ,VYT} = Q_{VYT} - Q_{TC,dod,VYT} \quad (29)$$

Výpočet doby chodu tepelného čerpadla při vytápění je dán vztahem:

$$\tau_{TC,VYT,j} = \frac{Q_{TC,dod,VYT}}{\phi_{TC,VYT}} \quad (30)$$

Výpočet potřeby pomocné energie při vytápění je dán vztahem:

$$E_{pom,VYT} = P_{pom,VYT} \cdot t_{TC,VYT,j} \quad (31)$$

Sezonní topný faktor se vypočítá podle vztahu:

$$SPF = \frac{Q_{TC,dod}+Q_{ZZ}}{E_{TC}+E_{ZZ}+E_{pom}} = \frac{Q_{TV}+Q_{VYT}}{E_{sys}} \quad (32)$$

kde je

E_{ZZ} elektrická energie pro záložní zdroj [kWh];

E_{pom} elektrická energie pomocná [kWh];

E_{TC} elektrická energie pro tepelné čerpadlo [kWh];

$Q_{TC,dod}$ energie dodaná tepelným čerpadlem [kWh];

Q_{ZZ} energie dodaná záložním zdrojem [kWh];

Q_{TV} potřeba tepla na přípravu teplé vody [kWh];

Q_{VYT} potřeba tepla na vytápění [kWh];

E_{sys} spotřeba elektrické energie celého systému [kWh].

Lze si všimnout, že sezonní topný faktor nezávisí pouze na efektivitě samotného tepelného čerpadla, ale také na pomocné energii a na potřebě elektrického záložního zdroje tepla. U tepelných čerpadel vzduch-voda a země-voda nemá potřeba elektrické energie pro pomocná zařízení zásadní vliv na celkovou hodnotu sezonního topného faktoru. Příkony oběhových čerpadel jsou jen v desítkách wattů. U tepelného čerpadla voda-voda využívajících studniční vodu se příkon studničních čerpadel pohybuje ve stovkách wattů a v bilanci hrají již významnou roli. Pokud je výkon tepelného čerpadla poddimenzovaný, tak i záložní zdroj hraje v bilanci významnou roli. K tomu dochází většinou je-li bod bivalence v oblasti venkovních teplot nad 0 °C. Intervalová metoda se pak může počítat s měsíčním rozložením teplotních intervalů (měsíční intervalová metoda) a ročním rozložení teplotních intervalů (roční intervalová metoda). [13]

3.5 Hodinová bilance

Výpočet provozního chování tepelného čerpadla pomocí podrobné hodinové bilance by měl přinést přesnější hodnoty než zjednodušený výpočet měsíční či roční intervalovou metodou. Pro výpočet je potřeba mít hodinová klimatická data z daného místa a hodinovou potřebu tepla na vytápění a přípravu teplé vody.

Nejlepším zdrojem klimatických dat je využití dat z meteostanice umístěné v blízkosti zkoumaného objektu, ta ale většinou dostupná nejsou. Pokud taková data

nejsou k dispozici, lze použít například hodinová klimatická data z aplikace PVGIS, která byla vytvořena výzkumným centrem Evropské komise a jsou volně přístupná na internetu. Využívá data z 566 měřicích stanic v Evropě a zohledňuje tvar terénu v rastru 1 km^2. V nové verzi lze získat data s hodinovým časovým krokem. [15]

Výpočet je pak velmi podobný jako u intervalové metody s tím rozdílem, že se bilance neprovádí pro jednotlivé hodinostupně, ale pro každou hodinu zvlášť. Používají se hodinová data venkovní teploty, potřeby tepla na vytápění a potřeby tepla na přípravu teplé vody. Pro sledování provozního chování tepelného čerpadla za dobu jednoho roku, je potřeba udělat bilanci pro 8 760 hodin. Z takto podrobných dat je pak možné zkoumat dynamické chování tepelného čerpadla během dne a noci, a to u výše zmíněných metod není možné.

4. ANALÝZA V BYTOVÉM DOMĚ

V této kapitole je popsána charakteristika analyzovaného bytového domu. Je zde popsáno navržené tepelné čerpadlo a pro jednotlivé metody bilancování uvedeny výsledky analýzy.

4.1 Bytový dům

Pro analýzu byl zvolen bytový dům postavený ve městě Bílina Obr. 10. Budova byla uvedena do provozu v 70. letech. V roce 2011 proběhla rekonstrukce, při které byl plášť budovy zateplen, byla vyměněna okna a došlo také na zasklení lodžií. V bytovém domě je celkem 44 bytů, ve kterých žije v součtu 91 lidí.

Z hlediska vytápění je objekt rozdělen na dvě zóny:

- vytápěno do této zóny patří byty které jsou vytápěny přibližně na teplotu 21,5 °C s objemem zóny 10 608 m^3;
- nevytápěno vytápění neprobíhá na chodbách a instalačním podlaží.

Geometrická charakteristika budovy je uvedena v Tab. 4 a v Tab. 5 jsou popsány stavební prvky a konstrukce budovy.

Tab. 4 Parametry budovy

Parametr	Hodnota	Jednotky
Objem budovy (objem části budovy s upravovaným vnitřním prostředím vymezený vnějšími povrchy konstrukcí obálky budovy)	10 608	[m^3]
Celková plocha obálky budovy (součet vnějších ploch konstrukcí ohraničujících objem budovy)	3 981	[m^2]
Objemový faktor tvaru budovy	0,38	[m^2/m^3]
Celková energeticky vztažná plocha budovy	3 597	[m^2]

Tab. 5 Stavební prvky a konstrukce

Konstrukce obálky budovy	Plocha	Součinitel prostupu tepla	Činitel tepl. redukce	Měrná ztráta prostupem tepla
		Vypočtená hodnota		
	[m^2]	[$W/m^2.K$]	[-]	[W/K]
Obvodová stěna	1557	0,31	1,00	486
Střecha	921	0,27	1,00	249
Podlaha	862	1,06	0,44	400
Otvorová výplň	641	1,21	1,00	776
Tepelné vazby				199
Celkem	**3981**			**2110**

V Tab. 6 je uveden průměrný součinitel prostupu tepla pro budovu jako celek.

Tab. 6 Součinitel prostupu tepla budovy

Budova	Průměrný součinitel prostupu tepla budovy	
	Vypočtená hodnota	Referenční hodnota
	[$W/m^2.K$]	[$W/m^2.K$]
Budova jako celek	0,53	0,53

Pro bytový dům jsou dostupná hodinová data potřeb tepla pro vytápění (simulace v prostředí TRNSYS) a přípravu teplé vody (reálné náměry). Potřeby tepla jsou známé pro roky 2014-2016, včetně hodinových klimatických údajů. V Tab. 7 jsou uvedeny jejich roční sumy.

Tab. 7 Potřeby tepla na vytápění a přípravu teplé vody

Rok	Název	Hodnota	Jednotka
2014	Potřeba tepla na vytápění	120 830	[kWh]
2015		118 359	[kWh]
2016		120 562	[kWh]
2014	Potřeba tepla na přípravu teplé vody	100 616	[kWh]
2015		101 289	[kWh]
2016		122 349	[kWh]

Technická zařízení budovy

V 1.PP je umístěna výměníková stanice, která zajišťuje vytápění a přípravu teplé vody v objektu. V bytech jsou otopná tělesa vybavena hlavicemi s termostatickými regulačními ventily. Teplotní exponent otopných těles n = 1,3. Systém je vybaven ekvitermní regulací. Návrhová teplota vstupní vody do otopné soustavy je uvažována $t_{w1,N}$ = 50 °C a výstupní $t_{w1,N}$ = 40 °C. Pro danou lokalitu bytového domu je venkovní výpočtová teplota $t_{e,N}$ = -12 °C. Příprava teplé vody probíhá ve výměníkové stanici. Teplota teplé vody t_{TV} je 55 °C. Větrání budovy je přirozené, větráním okny, dveřmi a infiltrací. Intenzita větrání je uvažována 0,3 1/h. Umělé osvětlení je zajištěno úspornými, klasickými žárovkami a LED osvětlením.

Obr. 10 Zkoumaný bytový dům

4.2 Návrh tepelného čerpadla pro bytový dům

Pro bytový dům bylo vybráno tepelné čerpadlo vzduch-voda WPL 57 od firmy STIEBEL ELTRON, které je na Obr. 11. Umožnuje kaskádové zapojení, pro vysoké požadavky na výkony až do 168 kW. Výstupní teplota z kondenzátoru může dosahovat více než 60 °C a tepelné čerpadlo umožňuje provoz i v bivalentním režimu. Tepelné čerpadlo má integrovaný měřič množství tepla a elektroměr. Expanzní ventil je řízen elektronicky. [12]

Obr. 11 Tepelné čerpadlo WPL 57 [13]

Mezi základní parametry tepelného čerpadla patří:

- jmenovitý topný výkon při A2/W35 (EN 14511) 29,81 kW;
- jmenovitý topný faktor při A2/W35 (EN 14511) 3,30;
- jmenovité napětí kompresoru 400 V;
- hladina akustického tlaku ve vzdálenosti 5 m ve volném prostoru 47 dB(A);
- výška 1485 mm;
- šířka 1860 mm;
- hloubka 2040 mm;
- hmotnost 600 kg;
- typ chladiva R407 C.

[12]

Namrzání výparníku při nízké venkovní teplotě je řešeno reverzním chodem tepelného čerpadla. Ve spodní části tepelného čerpadla je umístěna hadice pro odvod kondenzátu. Ta by měla být připojena na kanalizační odtok, nebo do jímky s hrubým štěrkem. Přitom je třeba pamatovat, pokládku do nezámrzné hloubky. [12]

Výrobce doporučuje umisťovat tepelné čerpadlo na podklad, který je vodorovný, pevný a trvanlivý. Rám tepelného čerpadla musí dosedat rovnoměrně, jinak to může mít negativní vliv na hlučnost. U bytových domů se tepelná čerpadla většinou umisťují na střechu. [12]

Pro hydraulické a elektroinstalační rozvody, které se zavádí do tepelného čerpadla zespodu, v podkladu musí být vytvořena průchodka (volný prostor). Topná a vratná strana musejí být při venkovní instalaci chráněny dostatečnou tepelnou izolací před mrazem a pokládkou do instalačních trubek před vlhkostí. Ochranu proti zamrznutí nabízí snímač ochrany před mrazem, který je instalován do tepelného čerpadla. Tento snímač aktivuje reverzní chod, který námrazu odstraní. [12]

V katalogu technických informací tepelných čerpadel od výrobce vybraného tepelného čerpadla jsou uvedeny i charakteristiky pro topný výkon, viz Tab. 8 a topný faktor, viz Tab. 9. [12]

Tab. 8 Charakteristiky topného výkonu tepelného čerpadla [12]

t_{k2}/t_{v1}	-20	-15	-7	2	7	10	15	20
35	16,5	19,9	23,9	29,9	29,9	33,6	37,1	40,6
45	17	20,5	24,7	30,9	28,4	30,2	35	39,8
55	18,9	21,5	25,4	31,5	27,1	31,4	35,1	38
60	19,9	22	25,8	31,8	26,5	32	35,2	37,1

Tab. 9 Charakteristiky topného faktoru tepelného čerpadla [12]

t_{k2}/t_{v1}	-20	-15	-7	2	7	10	15	20
35	2,1	2,4	2,7	3,3	3,4	3,8	4,1	4,5
45	1,8	2,1	2,4	2,8	2,8	3	3,3	3,6
55	1,7	1,9	2,1	2,4	2,4	2,7	2,9	3
60	1,6	1,8	2	2,2	2,2	2,5	2,7	2,8

Pro pokrytí celkové potřeby tepla na přípravu teplé vody a vytápění by jedno tepelné čerpadlo WPL 57 nestačilo, proto je řešena varianta se dvěma tepelnými čerpadly. To se v charakteristikách topného výkonu projeví tak, že hodnoty topného výkonu budou dvojnásobné. Charakteristiky topného faktoru pro variantu se dvěma tepelnými čerpadly

zůstávají neměnné. Pomocí vícenásobné regrese byly z charakteristik topného výkonu a topného faktoru určeny hodnoty koeficientů polynomu, viz Tab. 10 a Tab. 11.

Tab. 10 Hodnoty koeficientů pro topný výkon

Koeficient	F	E	D	C	B	A
Hodnota	**-0,014**	**0,007**	**0,004**	**-0,622**	**1,634**	**68,865**

Tab. 11 Hodnoty koeficientů pro topný faktor

Koeficient	f	e	d	c	b	a
Hodnota	**-0,001**	**0,001**	**0,000**	**-0,119**	**0,097**	**6,285**

Tyto hodnoty koeficientů jsou dosazeny do vztahu pro výpočet tepelného výkonu (3) a topného faktoru (4) a tyto vztahy jsou pak využity v hodinové, měsíční a intervalové metodě.

$$\phi_{T\check{C}} = A + B \cdot t_{v1} + C \cdot t_{k2} + D \cdot t_{v1}^2 + E \cdot t_{k2}^2 + F \cdot t_{v1} \cdot t_{k2} =$$

$$= 68{,}865 + 1{,}634 \cdot t_{v1} - 0{,}622 \cdot t_{k2} + 0{,}004 \cdot t_{v1}^2 + 0{,}007 \cdot t_{k2}^2 - 0{,}014 \cdot t_{v1} \cdot t_{k2} \quad (33)$$

$$COP = a + b \cdot t_{v1} + c \cdot t_{k2} + d \cdot t_{v1}^2 + e \cdot t_{k2}^2 + f \cdot t_{v1} \cdot t_{k2} =$$

$$= 6{,}285 + 0{,}097 \cdot t_{v1} - 0{,}119 \cdot t_{k2} + 0 \cdot t_{v1}^2 + 0{,}001 \cdot t_{k2}^2 - 0{,}001 \cdot t_{v1} \cdot t_{k2} \quad (34)$$

4.3 Výsledky analýzy

Pro výše popsaný bytový dům byla provedena analýza výpočtového hodnocení provozu tepelného čerpadla. Bilance byla provedena s klimatickými daty a potřebami tepla na vytápění a přípravu teplé vody pro roky 2014-2016. Měsíční data jsou uvedena v Tab. 12 až Tab. 17. V přílohách jsou uvedena hodinová data a samotné výpočty pro různé metody bilancování.

Tab. 12 Měsíční klimatická data z roku 2014

Teplota [°C]	**leden**	**únor**	**březen**	**duben**	**květen**	**červen**	**červenec**	**srpen**	**září**	**říjen**	**listopad**	**prosinec**
min	-8,6	-6,3	-1,8	1,2	0,4	7,4	10,0	7,4	2,8	-0,9	-1,0	-10,7
max	11,5	11,4	20,2	21,4	28,7	33,2	32,9	29,0	25,5	22,4	16,4	10,3
prům	1,9	3,6	7,2	11,3	13,4	17,2	20,7	17,4	15,5	11,6	6,3	2,2

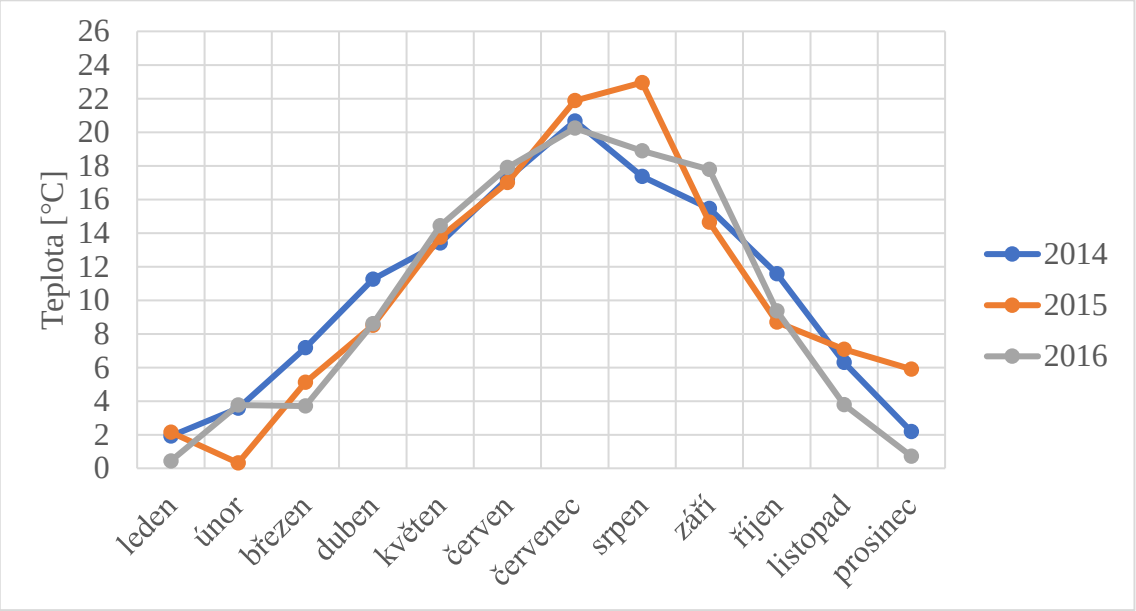
Tab. 13 Měsíční klimatická data z roku 2015

Teplota [°C]	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
min	-6,8	-7,5	-4,4	-4,9	5,2	7,4	9,5	12,4	6,3	-1,4	-2,3	-3,9
max	11,1	8,6	16,1	21,5	26,2	31,0	34,0	36,0	31,0	20,1	15,9	12,2
prům	2,2	0,3	5,1	8,5	13,7	17,0	21,9	23,0	14,6	8,7	7,1	5,9

Tab. 14 Měsíční klimatická data z roku 2016

Teplota [°C]	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
min	-15,8	-4,4	-5,9	-0,7	1,9	10,5	10,2	6,9	8,2	0,4	-6,2	-7,6
max	9,9	11,4	15,1	22,1	28,1	32,1	30,7	31,9	29,3	22,1	12,7	8,0
prům	0,4	3,8	3,7	8,6	14,4	17,9	20,2	18,9	17,8	9,4	3,8	0,7

Z Obr. 12 je vidět, že rok 2016 byl teplotně podprůměrný ve srovnání s roky 2014 a 2016.



Obr. 12 Průběhy průměrných teplot v letech 2014-2016

Tab. 15 Potřeby tepla na vytápění a přípravu teplé vody v roce 2014

leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
$Q_{TV,j}$ [kWh]											
11 888	11 122	10 772	9 901	9 328	7 646	8 060	9 185	9 389	10 915	10 849	11 253
$Q_{VYT,j}$ [kWh]											
25 649	17 547	6 882	754	134	-	-	-	-	4 040	18 641	26 969

Tab. 16 Potřeby tepla na vytápění a přípravu teplé vody v roce 2015

leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
$Q_{TV,j}$ [kWh]											
11 186	10 076	10 374	8 440	7 173	8 034	9 072	9 835	10 148	11 393	11 094	11 534
$Q_{VYT,j}$ [kWh]											
27 146	20 959	9 388	3 493	-	-	-	-	-	7 640	12 790	19 873

Tab. 17 Potřeby tepla na vytápění a přípravu teplé vody v roce 2016

leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
$Q_{TV,j}$ [kWh]											
10 470	9 779	9 948	8 546	7 466	8 340	9 200	10 122	10 797	12 046	11 808	11 724
$Q_{VYT,j}$ [kWh]											
29 616	17 781	16 011	3 302	71	-	-	-	-	7 487	19 357	28 724

4.3.1 Analýza roční bilance podle TNI 730331

Níže je uveden postup výpočtu pro rok 2015 s využitím ročních potřeb tepla na vytápění a přípravu teplé vody. V této roční bilanci není zohledněn záložní zdroj, ani pomocná zařízení (oběhová čerpadla, ventily, regulace atd.). Součinitelé ročního provozu tepelného čerpadla, byly stanoveny podle Tab. 2 pro režim vytápění a Tab. 3 pro systémy přípravy teplé vody. Pro další roky je postup výpočtu stejný. Detailní popis bilancování podle TNI 73 0331 je uveden v podkapitole 3.2. V Tab. 18 jsou uvedeny výsledky pro roky 2014 až 2016.

$$COP_{gen,TV} = f_{COP,TV} \cdot COP_H = 0{,}77 \cdot 3{,}30 = 2{,}54 \quad (35)$$

$$COP_{gen,VYT} = f_{COP,VYT} \cdot COP_H = 0{,}83 \cdot 3{,}30 = 2{,}74 \quad (36)$$

$f_{COP,TV} = 0{,}77$ (37)

$f_{COP,VYT} = 0{,}83$ (38)

$$E_{TC,TV} = \frac{Q_{TC,dod,TV}}{COP_{gen,TV}} = \frac{118\,359}{2{,}54} = 46\,580\ kWh \quad (39)$$

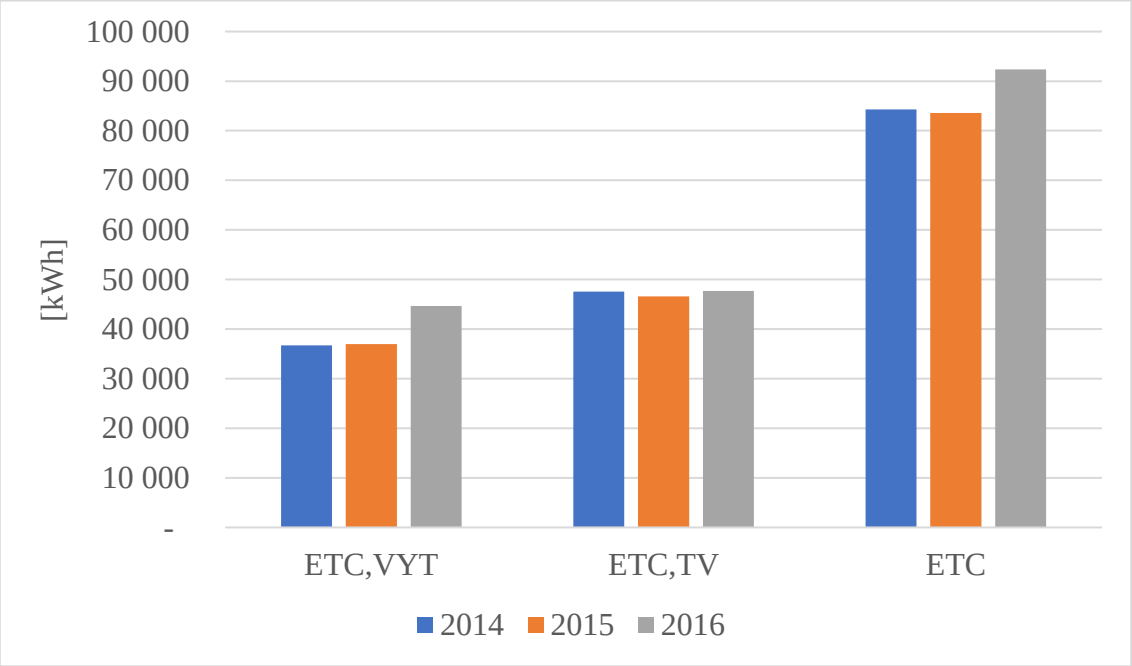
$$E_{TC,VYT} = \frac{Q_{TC,dod,vyt}}{COP_{gen,vyt}} = \frac{101\,289}{2{,}74} = 36\,980\ kWh \quad (40)$$

$$SPF = \frac{Q_{TV}+Q_{VYT}}{E_{sys}} = \frac{118\,359+101\,289}{46\,580+36\,980} = 2{,}63 \quad (41)$$

Tab. 18 Výsledky bilance podle TNI 73 0331 pro roky 2014-2016

Název	2014	2015	2016
$E_{TC,VYT}$ [kWh]	36 735	36 980	44 669
$E_{TC,TV}$ [kWh]	47 552	46 580	47 670
E_{TC} [kWh]	84 287	83 560	92 339
SPF	2,63	2,63	2,64

Z Obr. 13 je vidět, že v roce 2016 tepelné čerpadlo spotřebovalo nejvíce elektrické energie, a to hlavně na vytápění. Spotřeba elektrické energie na přípravu teplé vody se v letech 2014-2016 příliš neměnila. Z Tab. 18 lze vyčíst, že průběh sezonního topného faktoru se v letech 2014 až 2016 mění zcela minimálně.



Obr. 13 Porovnání spotřeby elektrické energie tepelného čerpadla v letech 2014-2016

4.3.2 Analýza měsíční bilance

Obecný postup výpočtu je uvedený v podkapitole 3.3. Níže je jako příklad uveden kompletní výpočet pro měsíc leden roku 2015. Jako vstupní teplota na výparníku byla použita střední venkovní teplota v lednu 2015 uvedená v Tab. 13. Vztah pro výpočet topného faktoru vychází ze vztahu uvedeném v podkapitole 4.2 do kterého byly dosazeny hodnoty koeficientů polynomů. Pro výpočet byla použita data potřeb tepla uvedená v Tab. 16. Dále také výpočtová venkovní teplota, teplotní spád otopné soustavy, teplota teplé vody a vnitřní teplota které jsou uvedené v podkapitole 4.1.

$$t_{w1} = t_i + \frac{t_{w1,N} - t_{w2,N}}{2} \cdot \frac{t_i - t_e}{t_i - t_{e,N}} + \left(\frac{t_{w1,N} + t_{w2,N}}{2} - t_i\right) \cdot \left(\frac{t_i - t_e}{t_i - t_{e,N}}\right)^{\frac{1}{n}} = 21{,}5 + \frac{50-40}{2} \cdot \frac{21{,}5-2{,}2}{21{,}5-(-12)} + \left(\frac{50+40}{2} - 21{,}5\right) \cdot \left(\frac{21{,}5-2{,}2}{21{,}5-(-12)}\right)^{\frac{1}{1{,}3}} = 39{,}8\ °C \quad (42)$$

$$t_{k2} = t_{w1} + \Delta t_w = 39{,}8 + 2 = 41{,}8\ °C \quad (43)$$

$$t_{k2} = t_{TV} + \Delta t_{TV} = 55 + 5 = 60\ °C \quad (44)$$

$$COP_{TČ,TV} = 6{,}285 + 0{,}097 \cdot t_{v1} - 0{,}119 \cdot t_{k2} + 0 \cdot t_{v1}^2 + 0{,}001 \cdot t_{k2}^2 - 0{,}001 \cdot t_{v1} \cdot t_{k2} = 6{,}285 + 0{,}097 \cdot 2{,}15 - 0{,}119 \cdot 60 + 0 \cdot 2{,}15^2 + 0{,}001 \cdot 60^2 - 0{,}001 \cdot 2{,}15 \cdot 60 = 2{,}21 \quad (45)$$

$$COP_{TČ,VYT} = 6{,}285 + 0{,}097 \cdot t_{v1} - 0{,}119 \cdot t_{k2} + 0 \cdot t_{v1}^2 + 0{,}001 \cdot t_{k2}^2 - 0{,}001 \cdot t_{v1} \cdot t_{k2} = 6{,}285 + 0{,}097 \cdot 2{,}2 - 0{,}119 \cdot 41{,}8 + 0 \cdot 2{,}2^2 + 0{,}001 \cdot 41{,}8^2 - 0{,}001 \cdot 2{,}2 \cdot 41{,}8 = 2{,}88 \quad (46)$$

$$E_{TC,TV} = \frac{Q_{TV}}{COP_{TV}} = \frac{11\,186}{2{,}21} = 5\,072\ kWh \quad (47)$$

$$E_{TC,VYT} = \frac{Q_{VYT}}{COP_{VYT}} = \frac{27\,146}{2{,}88} = 9\,432\ kWh \quad (48)$$

$$SPF = \frac{Q_{TV} + Q_{VYT}}{E_{sys}} = \frac{11\,186 + 27\,146}{50\,72 + 94\,32} = 2{,}64 \quad (49)$$

V Tab. 19, Tab. 20 a Tab. 21 jsou uvedeny výsledky analýzy pro roky 2014-2016. Z výsledků je vidět, že stejně jako u bilancování podle TNI 730331 zde není zohledněn záložní zdroj, protože průměrná měsíční teplota byla vždycky nad bodem bivalence. Z toho důvodu nebylo potřeba využívat záložní zdroj. V praxi by ale k využívání záložního zdroje docházelo, protože v zimních měsících často klesá venkovní teplota pod bod mrazu a potřeba tepla je daleko vyšší.

Tab. 19 Výsledky analýzy měsíční bilance pro rok 2014

Měsíc	Q_{TV} [kWh]	Q_{vyt} [kWh]	t_{v1} [°C]	$t_{k2,TV}$ [°C]	$t_{k2,VYT}$ [°C]	$COP_{TČ,TV}$	$COP_{TČ,VYT}$	$E_{TC,TV}$ [kWh]	$E_{TC,VYT}$ [kWh]	SPF
leden	12 083	25 649	1,9	60,0	42,0	2,20	2,86	5 496	8 977	2,61
únor	11 122	17 547	3,6	60,0	40,7	2,25	3,01	4 950	5 830	2,66
březen	10 772	6 882	7,2	60,0	37,9	2,36	3,38	4 571	2 039	2,67
duben	9 901	754	11,3	60,0	34,5	2,49	3,86	3 977	196	2,55
květen	9 328	134	13,4	60,0	32,6	2,56	4,14	3 639	32	2,58
červen	7 646	-	17,2	60,0	-	2,70	-	2 830	-	2,70
červenec	8 060	-	20,7	60,0	-	2,83	-	2 846	-	2,83
srpen	9 185	-	17,4	60,0	-	2,71	-	3 394	-	2,71
září	9 389	-	15,5	60,0	-	2,64	-	3 561	-	2,64
říjen	10 915	4 040	11,6	60,0	34,2	2,50	3,90	4 365	1 036	2,77
listopad	10 849	18 641	6,3	60,0	38,6	2,33	3,28	4 659	5 682	2,85
prosinec	11 580	26 969	2,2	60,0	41,8	2,21	2,88	5 248	9 359	2,64

Celková roční spotřeba elektrické energie za rok 2014 je 82 687 kWh. Celkový sezonní topný faktor systému za rok 2014 je 2,68.

Tab. 20 Výsledky analýzy měsíční bilance pro rok 2015

Měsíc	Q_{TV} [kWh]	Q_{vyt} [kWh]	t_{v1} [°C]	$t_{k2,TV}$ [°C]	$t_{k2,VYT}$ [°C]	$COP_{TČ,TV}$	$COP_{TČ,VYT}$	$E_{TC,TV,j}$ [kWh]	$E_{TC,VYT,j}$ [kWh]	SPF
leden	11 186	27 146	2,2	60,0	41,8	2,21	2,88	5 072	9 432	2,64
únor	10 076	20 959	0,32	60,0	43,2	2,15	2,72	4 678	7 705	2,51
březen	10 374	9 388	5,12	60,0	39,5	2,29	3,16	4 524	2 971	2,64
duben	8 440	3 493	8,50	60,0	36,8	2,40	3,52	3 519	991	2,65
květen	7 173	-	13,74	60,0	-	2,58	-	2 785	-	2,58
červen	8 034	-	17,00	60,0	-	2,69	-	2 983	-	2,69
červenec	9 072	-	21,87	60,0	-	2,88	-	3 150	-	2,88
srpen	9 835	-	22,95	60,0	-	2,92	-	3 364	-	2,92
září	10 148	-	14,64	60,0	-	2,61	-	3 892	-	2,61
říjen	11 393	7 640	8,70	60,0	36,6	2,40	3,55	4 737	2 154	2,76
listopad	11 094	12 790	7,08	60,0	37,9	2,35	3,37	4 714	3 801	2,81
prosinec	11 534	19 873	5,89	60,0	38,9	2,32	3,24	4 979	6 135	2,83

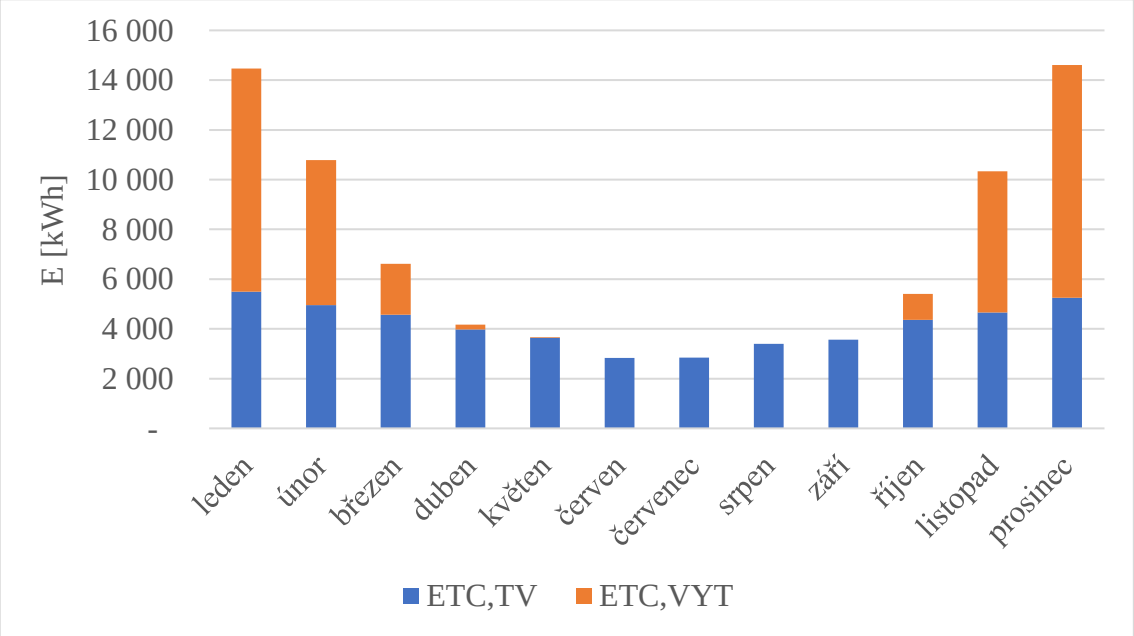
Celková roční spotřeba elektrické energie za rok 2015 je 81 587 kWh. Celkový sezonní topný faktor systému za rok 2015 je 2,69.

Tab. 21 Výsledky analýzy měsíční bilance pro rok 2016

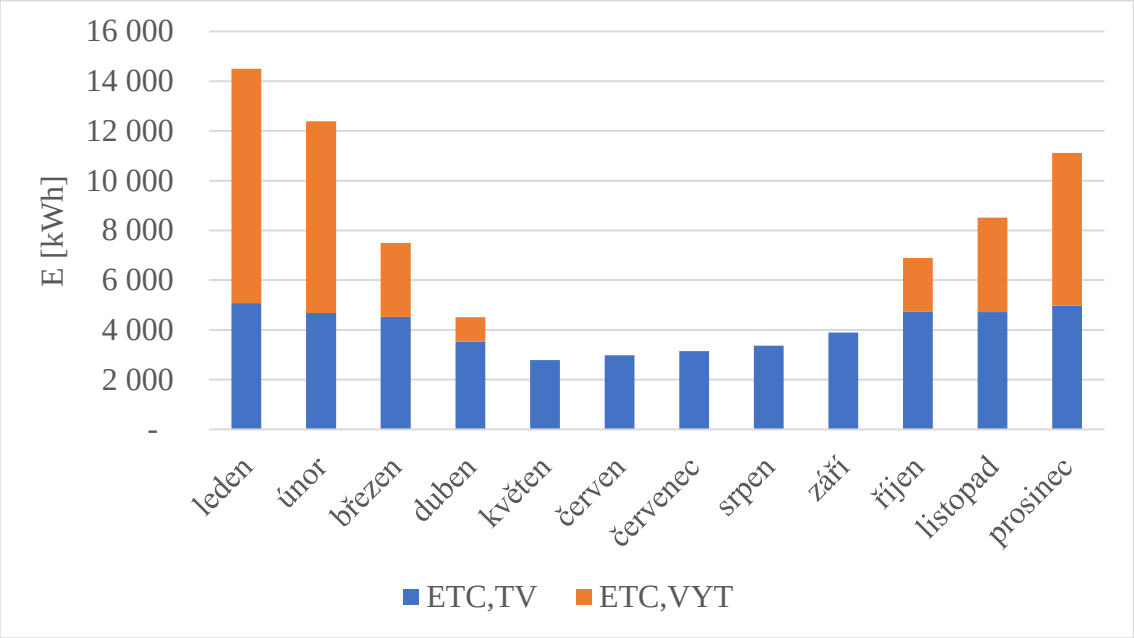
Měsíc	Q_{TV} [kWh]	Q_{vyt} [kWh]	t_{v1} [°C]	$t_{k2,TV}$ [°C]	$t_{k2,VYT}$ [°C]	$COP_{TČ,TV}$	$COP_{TČ,VYT}$	$E_{TC,TV,j}$ [kWh]	$E_{TC,VYT,j}$ [kWh]	SPF
leden	11 338	29 616	0,4	60,0	43,1	2,16	2,73	5 257	10 852	2,54
únor	9 779	17 781	3,8	60,0	40,6	2,25	3,03	4 341	5 873	2,70
březen	9 948	16 011	3,7	60,0	40,6	2,25	3,02	4 420	5 298	2,67
duben	8 546	3 302	8,6	60,0	36,7	2,40	3,54	3 558	934	2,64
květen	7 466	71	14,4	60,0	31,7	2,60	4,29	2 872	17	2,61
červen	8 340	-	17,9	60,0	-	2,73	-	3 059	-	2,73
červenec	9 200	-	20,2	60,0	-	2,82	-	3 267	-	2,82
srpen	10 122	-	18,9	60,0	-	2,76	-	3 663	-	2,76
září	10 797	-	17,8	60,0	-	2,72	-	3 967	-	2,72
říjen	12 046	7 487	9,4	60,0	36,1	2,43	3,63	4 964	2 065	2,78
listopad	11 808	19 357	3,8	60,0	40,5	2,25	3,03	5 241	6 389	2,68
prosinec	11 739	28 724	0,7	60,0	42,9	2,17	2,75	5 422	10 430	2,55

Celková roční spotřeba elektrické energie za rok 2016 je 91 887 kWh. Celkový sezonní topný faktor systému za rok 2016 je 2,65.

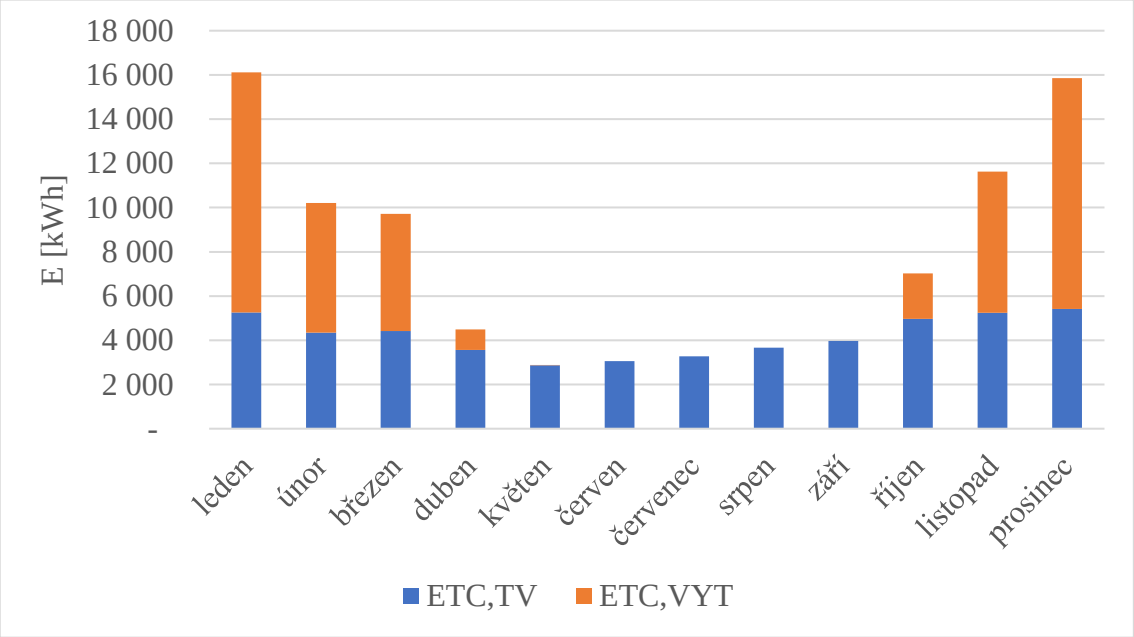
Průběh spotřeby elektrické energie tepelného čerpadla pro vytápění a přípravu teplé vody v letech 2014 až 2016 je znázorněn na Obr. 14, Obr. 15 a Obr. 16. Spotřeba tepelného čerpadla pro přípravu teplé vody se během roku příliš nemění, ale spotřeba elektrické energie pro vytápění se mění zásadně. Podle předpokladu je největší spotřeba v zimních měsících a od května do září je spotřeba elektrické energie na vytápění nulová, protože vytápění není potřeba.



Obr. 14 Průběh spotřeby elektrické energie v roce 2014

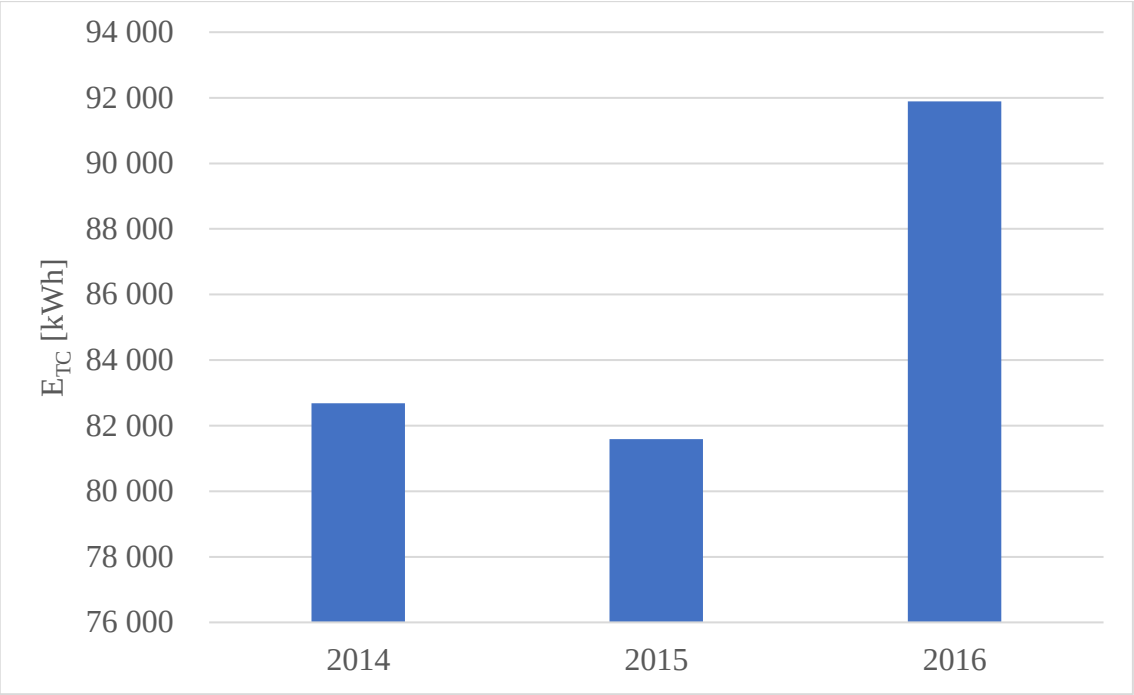


Obr. 15 Průběh spotřeby elektrické energie v roce 2015



Obr. 16 Průběh spotřeby elektrické energie v roce 2016

Na Obr. 17 je znázorněn průběh celkové roční spotřeby elektrické v letech 2014-2016. Z obrázku lze vyčíst, že v roce 2016 byla celková roční spotřeba elektrické energie za uplynulé roky nejvyšší.



Obr. 17 Průběh celkové roční spotřeby eklektické v letech 2014-2016

4.3.3 Intervalová bilance

Obecný postup výpočtu je uvedený v podkapitole 3.4. Níže je jako příklad uvedena bilance pro interval 0 až 1 °C se střední venkovní teplotou vzduchu 0,5 °C, pro leden roku 2015. Vztah pro výpočet topného výkonu a topného faktoru vychází ze vztahů uvedených v podkapitole 4.2 do kterých byly dosazeny hodnoty koeficientů polynomů. Z klimatických dat byla určena nejnižší a nejvyšší venkovní teplota vzduchu a mezi těmito teplotami byly sestaveny intervaly. Pro leden, který trvá 744 hodin byla v roce 2015 venkovní teplota v intervalu 0 až 1 °C 126 hodin. Pro výpočet byla použita data potřeb tepla uvedená v Tab. 16. Dále byla použita výpočtová venkovní teplota, teplotní spád otopné soustavy, teplota teplé vody a vnitřní teplota. Tato data jsou uvedena v podkapitole 4.1. Měsíční potřeba tepla pak byla rozpočítána do intervalu.

$$t_{w1} = t_i + \frac{t_{w1,N} - t_{w2,N}}{2} \cdot \frac{t_i - t_e}{t_i - t_{e,N}} + \left(\frac{t_{w1,N} + t_{w2,N}}{2} - t_i\right) \cdot \left(\frac{t_i - t_e}{t_i - t_{e,N}}\right)^{\frac{1}{n}} = 21{,}5 + \frac{50-40}{2} \cdot \frac{21{,}5-0{,}5}{21{,}5-(-12)} + \left(\frac{50+40}{2} - 21{,}5\right) \cdot \left(\frac{21{,}5-0{,}5}{21{,}5-(-12)}\right)^{\frac{1}{1{,}3}} = 41\ °C \quad (50)$$

$$t_{k2} = t_{w1} + \Delta t_w = 41 + 2 = 43\ °C \quad (51)$$

$$t_{k2} = t_{TV} + \Delta t_{TV} = 55 + 5 = 60\ °C \quad (52)$$

$$\phi_{T\check{C},TV} = 68{,}865 + 1{,}634 \cdot t_{v1} - 0{,}622 \cdot t_{k2} + 0{,}004 \cdot t_{v1}^2 + 0{,}007 \cdot t_{k2}^2 - 0{,}014 \cdot t_{v1} \cdot t_{k2} = 68{,}865 + 1{,}634 \cdot 0{,}5 - 0{,}622 \cdot 60 + 0{,}004 \cdot 0{,}5^2 + 0{,}007 \cdot 60^2 - 0{,}014 \cdot 0{,}5 \cdot 60 = 56{,}1\ kW \quad (53)$$

$$COP_{T\check{C},TV} = 6{,}285 + 0{,}097 \cdot t_{v1} - 0{,}119 \cdot t_{k2} + 0 \cdot t_{v1}^2 + 0{,}001 \cdot t_{k2}^2 - 0{,}001 \cdot t_{v1} \cdot t_{k2} = 6{,}285 + 0{,}097 \cdot 0{,}5 - 0{,}119 \cdot 60 + 0 \cdot 0{,}5^2 + 0{,}001 \cdot 60^2 - 0{,}001 \cdot 0{,}5 \cdot 60 = 2{,}16 \quad (54)$$

$$\phi_{T\check{C},VYT} = 68{,}865 + 1{,}634 \cdot t_{v1} - 0{,}622 \cdot t_{k2} + 0{,}004 \cdot t_{v1}^2 + 0{,}007 \cdot t_{k2}^2 - 0{,}014 \cdot t_{v1} \cdot t_{k2} = 68{,}865 + 1{,}634 \cdot 0{,}5 - 0{,}622 \cdot 43 + 0{,}004 \cdot 0{,}5^2 + 0{,}007 \cdot 43^2 - 0{,}014 \cdot 0{,}5 \cdot 43 = 55{,}05\ kW \quad (55)$$

$$COP_{T\check{C},VYT} = 6{,}285 + 0{,}097 \cdot t_{v1} - 0{,}119 \cdot t_{k2} + 0 \cdot t_{v1}^2 + 0{,}001 \cdot t_{k2}^2 - 0{,}001 \cdot t_{v1} \cdot t_{k2} = 6{,}285 + 0{,}097 \cdot 0{,}5 - 0{,}119 \cdot 43 + 0 \cdot 0{,}5^2 + 0{,}001 \cdot 43^2 - 0{,}001 \cdot 0{,}5 \cdot 43 = 2{,}74 \quad (56)$$

$$Q_{TV,j} = Q_{TV} \frac{H_j}{H} = Q_{TV} \frac{H_j}{\sum_j H_j} = 11\,186 \frac{126}{744} = 1\,894 \text{ kWh} \quad (57)$$

$$Q_{VYT,j} = Q_{VYT} \frac{DH_j}{DH} = Q_{VYT} \frac{(t_i - t_{em,j}) \cdot \tau_j}{\sum_j DH_j} = 27\,146 \frac{(21{,}5 - 0{,}5) \cdot 126}{14\,391} = 4\,991\ kWh \quad (58)$$

$$Q_{TC,dis,TV,j} = \phi_{TC,TV,j} \cdot \tau_j = 56{,}1 \cdot 126 = 7\,069\ kWh \quad (59)$$

$$Q_{TC,dod,TV} = \min\left(Q_{TC,dis,TV,j}; Q_{TV,j}\right) = \min(7069; 1\,894) = 1\,894\ kWh \quad (60)$$

$$E_{TC,TV} = \frac{Q_{TC,dod,TV}}{COP_{T\check{C},TV}} = \frac{1894}{2{,}16} = 877\ kWh \quad (61)$$

$$E_{ZZ,TV} = Q_{TV,j} - Q_{TC,dod,TV} = 1\,894{,}3 - 1\,894{,}3 = 0\ kWh \quad (62)$$

$$\tau_{TC,TV} = \frac{Q_{TC,dod,TV}}{\phi_{TC,TV}} = \frac{1\,894{,}3}{56{,}1} = 33{,}8\ h \quad (63)$$

$$E_{pom,TV} = P_{pom,TV} \cdot \tau_{TC,TV} = 0{,}09 \cdot 33{,}8 = 3\ kWh \quad (64)$$

$$t_{TC,VYT,dis} = \tau_j - \tau_{TC,TV} = 126 - 33{,}8 = 92{,}2\ h \quad (65)$$

$$Q_{TC,dis,VYT} = \tau_{TC,VYT,dis} \cdot \phi_{TC,VYT} = 92{,}2 \cdot 55{,}05 = 5\,077\ kWh \quad (66)$$

$$Q_{TC,dod,VYT} = \min\left(Q_{TC,dis,VYT}; Q_{VYT,j}\right) = \min(5\,077; 4\,991) = 4\,991\ kWh \quad (67)$$

$$E_{TC,VYT} = \frac{Q_{TC,dod,VYT}}{COP_{T\check{C},VYT}} = \frac{4\,991}{2{,}74} = 1\,825\ kWh \quad (68)$$

$$E_{ZZ,VYT} = Q_{VYT,j} - Q_{TC,dod,VYT} = 4\,991 - 4\,991 = 0\ kWh \quad (69)$$

$$\tau_{TC,VYT,j} = \frac{Q_{TC,dod,VYT}}{\phi_{TC,VYT}} = \frac{4\,991}{55{,}05} = 90{,}7\ h \quad (70)$$

$$E_{pom,VYT} = P_{pom,VYT} \cdot t_{TC,VYT,j} = 0{,}09 \cdot 90{,}7 = 8{,}2\ kWh \quad (71)$$

$$SPF = \frac{Q_{TC,dod}+Q_{ZZ}}{E_{TC}+E_{ZZ}+E_{pom}} = \frac{Q_{TV}+Q_{VYT}}{E_{sys}} = \frac{1894+4991}{877+3+1825+8{,}2} = 2{,}54 \quad (72)$$

V Tab. 22 Tab. 23 a Tab. 24 jsou uvedeny výsledky analýzy měsíční intervalové metody pro roky 2014-2016. Z výsledků je vidět, že na rozdíl od předchozích metod měsíční intervalová metoda zohledňuje potřebu záložního zdroje. Potřebu tepla na přípravu teplé vody tepelné čerpadlo pokryje ve všech měsících. Potřebu tepla na vytápění už tepelné čerpadlo nepokryje celou, ale většinou od listopadu do února musí záložní zdroj pokrýt zbytek.

Tab. 22 Výsledky analýzy měsíční intervalové metody pro rok 2014

Měsíc	Q_{TV} [kWh]	Q_{vyt} [kWh]	t_{v1} [°C]	COP_{TV}	COP_{VYT}	$E_{TC,TV}$ [kWh]	$E_{TC,VYT}$ [kWh]	$E_{ZZ,TV}$ [kWh]	$E_{ZZ,VYT}$ [kWh]	$E_{pom,TV}$ [kWh]	$E_{pom,VYT}$ [kWh]	SPF
leden	12 083	25 649	1,9	2,20	2,89	5 497	8 647	-	1 334,1	19	39	2,43
únor	11 122	17 547	3,6	2,25	3,03	4 952	5 931	-	83,1	17	39	2,60
březen	10 772	6 882	7,2	2,36	3,42	4 577	2 154	-	-	16	27	2,61
duben	9 901	754	11,3	2,50	3,90	3 981	211	-	-	14	10	2,53
květen	9 328	134	13,4	2,57	3,72	3 645	36	-	-	12	1	2,56
červen	7 646	-	17,2	2,71	-	2 836	-	-	-	10	-	2,69
červenec	8 060	-	20,7	2,84	-	2 850	-	-	-	10	-	2,82
srpen	9 185	-	17,4	2,71	-	3 399	-	-	-	12	-	2,69
září	9 389	-	15,5	2,64	-	3 566	-	-	-	12	-	2,62
říjen	10 915	4 040	11,6	2,51	3,92	4 371	1 119	-	-	15	5	2,71
listopad	10 849	18 641	6,3	2,33	3,31	4 662	5 896	-	0,9	16	28	2,78
prosinec	11 580	26 969	2,2	2,21	2,92	5 252	8 691	-	2 335,8	18	39	2,36

Celková roční spotřeba elektrické energie za rok 2014 je 86 385 kWh. Celkový sezonní topný faktor systému za rok 2014 je 2,56.

Tab. 23 Výsledky analýzy měsíční intervalové metody pro rok 2015

Měsíc	Q_{TV} [kWh]	Q_{vyt} [kWh]	t_{v1} [°C]	COP_{TV}	COP_{VYT}	$E_{TC,TV}$ [kWh]	$E_{TC,VYT}$ [kWh]	$E_{ZZ,TV}$ [kWh]	$E_{ZZ,VYT}$ [kWh]	$E_{pom,TV}$ [kWh]	$E_{pom,VYT}$ [kWh]	SPF
leden	11 186	27 146	2,2	2,21	2,89	5 073	9 316	-	647	18	42	2,54
únor	10 076	20 959	0,3	2,16	2,74	4 681	7 741	-	275	16	42	2,43
březen	10 374	9 388	5,1	2,30	3,19	4 528	3 079	-	-	16	34	2,58
duben	8 440	3 493	8,5	2,41	3,58	3 525	1 077	-	-	12	14	2,58
květen	7 173	-	13,7	2,58	0,00	2 788	-	-	-	10	5	2,56
červen	8 034	-	17,0	2,70	0,00	2 988	-	-	-	10	-	2,68
červenec	9 072	-	21,9	2,89	0,00	3 158	-	-	-	11	-	2,86
srpen	9 835	-	23,0	2,93	0,00	3 374	-	-	-	12	-	2,90
září	10 148	-	14,6	2,61	0,00	3 897	-	-	-	13	-	2,60
říjen	11 393	7 640	8,7	2,41	3,58	4 742	2 253	-	-	16	11	2,71
listopad	11 094	12 790	7,1	2,36	3,42	4 721	4 062	-	-	16	19	2,71
prosinec	11 534	19 873	5,9	2,32	3,26	4 981	6 257	-	64	17	29	2,77

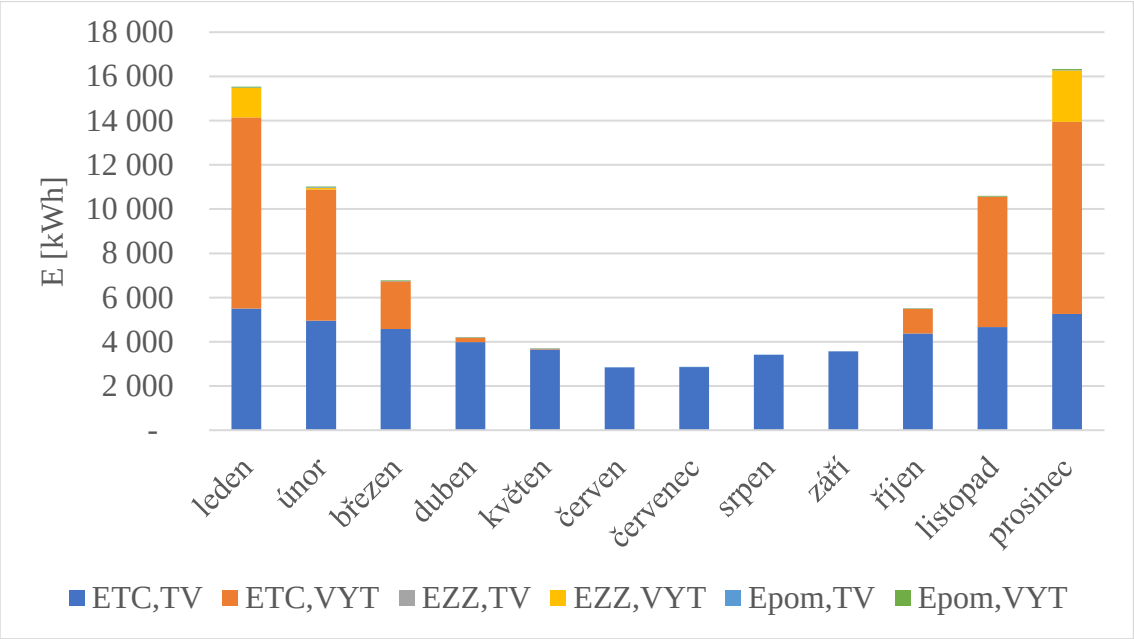
Celková roční spotřeba elektrické energie za rok 2015 je 83 591 kWh. Celkový sezonní topný faktor systému za rok 2015 je 2,63.

Tab. 24 Výsledky analýzy měsíční intervalové metody pro rok 2016

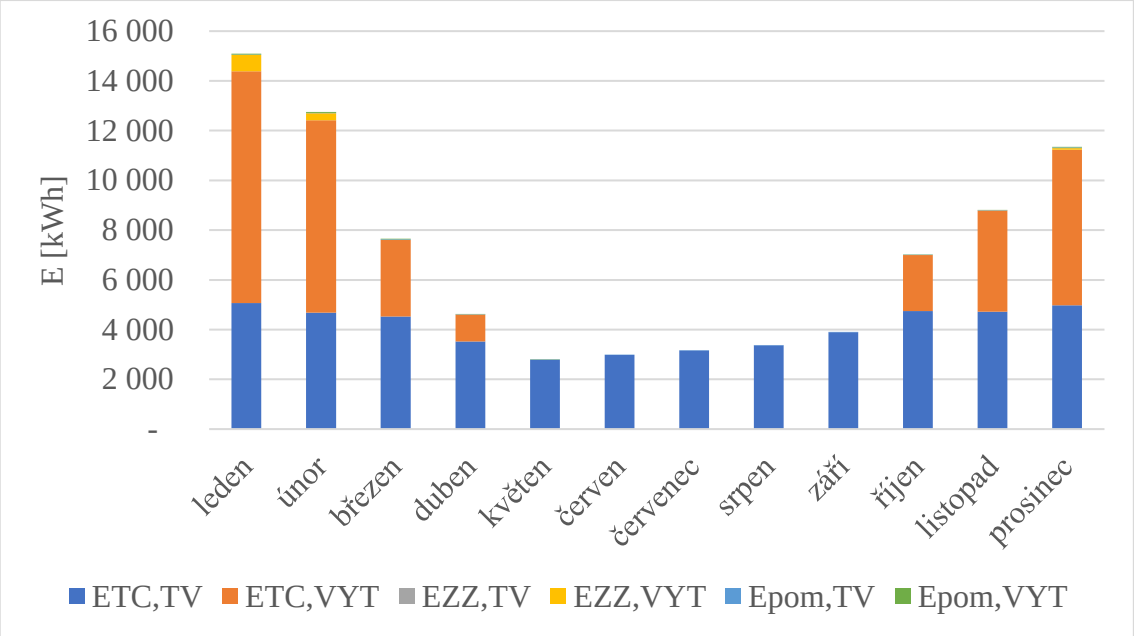
Měsíc	Q_{TV} [kWh]	Q_{vyt} [kWh]	t_{v1} [°C]	COP_{TV}	COP_{VYT}	$E_{TC,TV}$ [kWh]	$E_{TC,VYT}$ [kWh]	$E_{ZZ,TV}$ [kWh]	$E_{ZZ,VYT}$ [kWh]	$E_{pom,TV}$ [kWh]	$E_{pom,VYT}$ [kWh]	SPF
leden	11 338	29 616	0,4	2,16	2,78	5 261	9 461	-	4 050	18	42	2,17
únor	9 779	17 781	3,8	2,26	3,06	4 342	6 020	-	28	15	42	2,64
březen	9 948	16 011	3,7	2,25	3,05	4 423	5 444	-	-	15	28	2,62
duben	8 546	3 302	8,6	2,41	3,55	3 561	981	-	-	12	25	2,59
květen	7 466	71	14,4	2,61	3,86	2 876	19	-	-	10	5	2,59
červen	8 340	-	17,9	2,73	-	3 062	-	-	-	10	-	2,71
červenec	9 200	-	20,2	2,82	-	3 272	-	-	-	11	-	2,80
srpen	10 122	-	18,9	2,77	-	3 669	-	-	-	13	-	2,75
září	10 797	-	17,8	2,73	-	3 974	-	-	-	14	-	2,71
říjen	12 046	7 487	9,4	2,43	3,60	4 969	2 138	-	-	17	10	2,74
listopad	11 808	19 357	3,8	2,26	3,06	5 244	6 512	-	138	18	30	2,61
prosinec	11 739	28 724	0,7	2,17	2,77	5 424	9 591	-	2 505	19	43	2,30

Celková roční spotřeba elektrické energie za rok 2016 je 97 362 kWh. Celkový sezonní topný faktor systému za rok 2016 je 2,50.

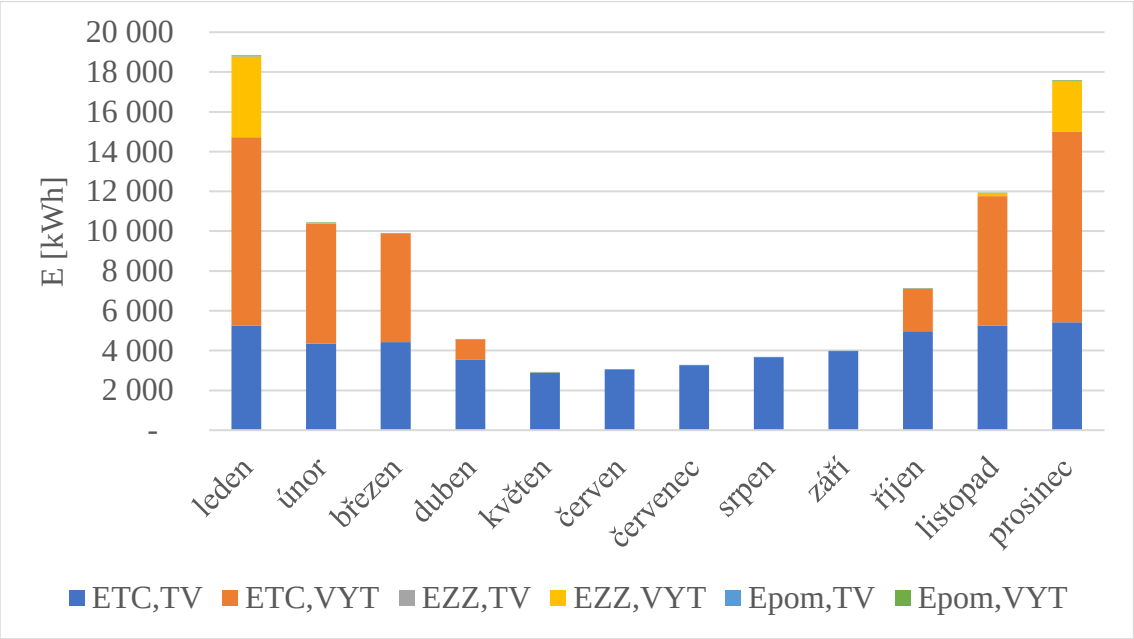
Na Obr. 18, Obr. 19 a Obr. 20 je znázorněn průběh spotřeby elektrické energie tepelného čerpadla pro vytápění, přípravu teplé vody, záložního zdroje a pomocných zařízení pro přípravu teplé vody a vytápění. Spotřeba záložního zdroje na vytápění má nezanedbatelný vliv na celkovou spotřebu elektrické energie. Podle předpokladu je nejvyšší spotřeba v zimních měsících.



Obr. 18 Průběh spotřeby elektrické energie v roce 2014

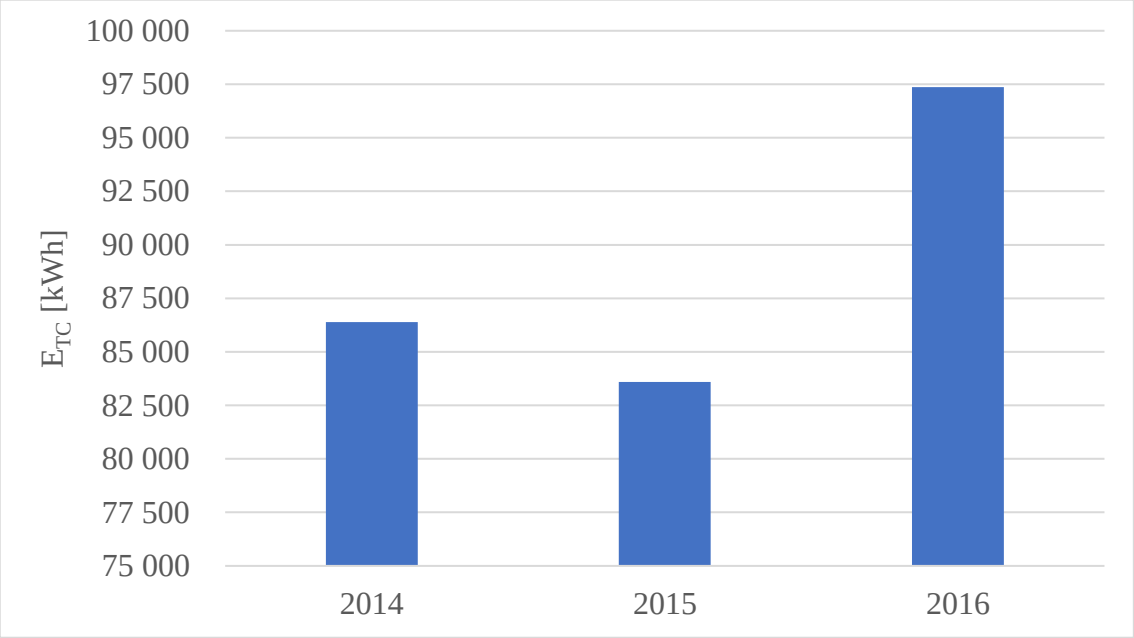


Obr. 19 Průběh spotřeby elektrické energie v roce 2015



Obr. 20 Průběh spotřeby elektrické energie v roce 2016

Na Obr. 21 je znázorněn průběh celkové roční spotřeby eklektické energie v letech 2014-2016. Z obrázku lze vyčíst, že v roce 2015 byla celková spotřeba elektrické nejnižší a v roce 2016 byla naopak nejvyšší.



Obr. 21 Průběh celkové roční spotřeby eklektické energie v letech 2014-2016

Roční intervalová metoda

Postup výpočtu je stejný jako u intervalové měsíční metody s tím rozdílem, že se nebilancuje pro jednotlivé intervaly v měsících, ale pro intervaly v letech. Z výsledků v Tab. 25 lze vyčíst, že v roce 2015 nebylo potřeba využít záložní zdroj. Sezonní topný faktor byl nejvyšší v roce 2014.

Tab. 25 Výsledky analýzy roční intervalové metody pro roky 2014-2016

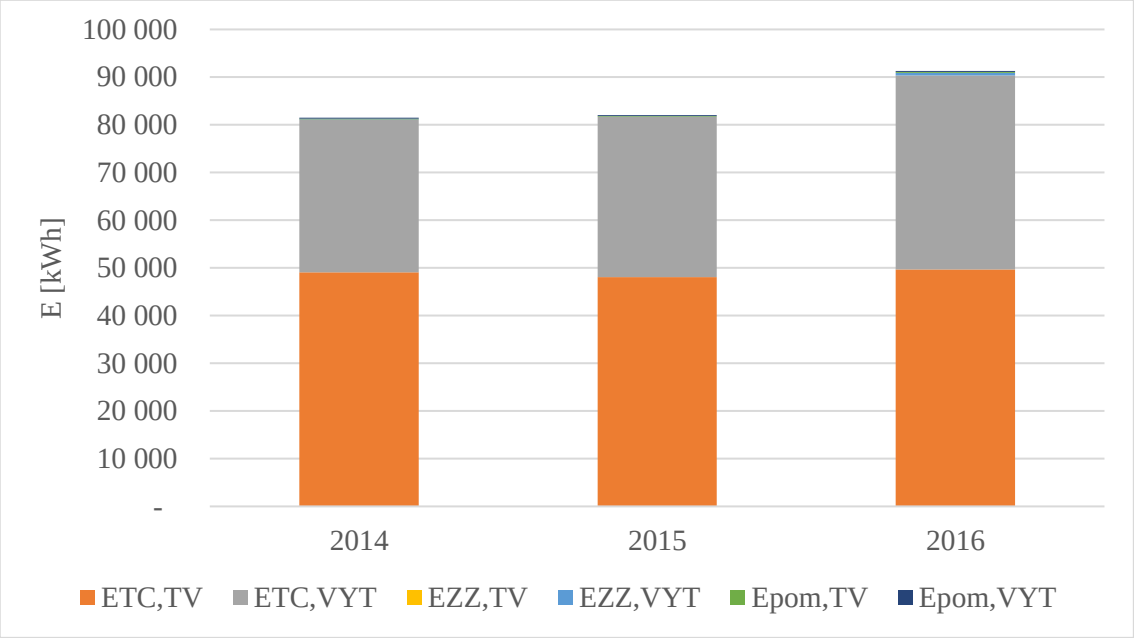
Rok	Q_{TV} [kWh]	Q_{vyt} [kWh]	t_{v1} [°C]	COP_{TV}	COP_{VYT}	$E_{TC,TV}$ [kWh]	$E_{TC,VYT}$ [kWh]	$E_{ZZ,TV}$ [kWh]	$E_{ZZ,VYT}$ [kWh]	$E_{pom,TV}$ [kWh]	$E_{pom,VYT}$ [kWh]	SPF
2014	120 830	100 616	10,7	2,55	3,33	49 074	32 058	-	15	169	151	2,72
2015	118 359	101 289	10,7	2,65	3,46	48 103	33 587	-	-	165	157	2,68
2016	121 129	122 349	10,0	2,46	3,13	49 712	40 668	-	531	171	188	2,67

Celková roční spotřeba elektrické energie za rok 2014 je 81 466 kWh. Celkový sezonní topný faktor systému za rok 2014 je 2,72.

Celková roční spotřeba elektrické energie za rok 2015 je 82 013 kWh. Celkový sezonní topný faktor systému za rok 2015 je 2,68.

Celková roční spotřeba elektrické energie za rok 2016 je 91 270 kWh. Celkový sezonní topný faktor systému za rok 2016 je 2,67.

Na Obr. 22 je znázorněn průběh spotřeby elektrické energie tepelného čerpadla pro vytápění, přípravu teplé vody, záložního zdroje a pomocných zařízení pro přípravu teplé vody a vytápění. Z obrázku lze vyčíst, že na rozdíl od měsíční intervalové metody, kde byla celková spotřeba elektrické energie nejnižší v roce 2015, tak v případě roční intervalové metody je nejnižší v roce 2014. Vliv záložního zdroje na celkovou spotřebu elektrické energie je minimální.



Obr. 22 Průběh spotřeby elektrické energie v letech 2014-2016

4.3.4 Hodinová bilance

Obecný postup výpočtu je uvedený v podkapitole 3.5. Níže je jako příklad uveden výpočet pro první hodinu v lednu roku 2015. Jako vstupní teplota na výparníku byla použita venkovní teplota z hodinových klimatických dat. Pro výpočet byla použita hodinová data potřeb tepla. Dále byla použita výpočtová venkovní teplota, teplotní spád otopné soustavy, teplota teplé vody a vnitřní teplota. Tato data jsou uvedena v podkapitole 4.1. Vztah pro výpočet topného výkonu a topného faktoru vychází ze vztahů uvedených v podkapitole 4.2, do kterých byly dosazeny hodnoty koeficientů polynomů.

$$t_{w1} = t_i + \frac{t_{w1,N} - t_{w2,N}}{2} \cdot \frac{t_i - t_e}{t_i - t_{e,N}} + \left(\frac{t_{w1,N} + t_{w2,N}}{2} - t_i\right) \cdot \left(\frac{t_i - t_e}{t_i - t_{e,N}}\right)^{\frac{1}{n}} = 21{,}5 + \frac{50-40}{2} \cdot \frac{21{,}5-0{,}9}{21{,}5-(-12)} + \left(\frac{50+40}{2} - 21{,}5\right) \cdot \left(\frac{21{,}5-0{,}9}{21{,}5-(-12)}\right)^{\frac{1}{1{,}3}} = 40{,}7\ °C \quad (73)$$

$$t_{k2} = t_{w1} + \Delta t_w = 40{,}7 + 2 = 42{,}7\ °C \quad (74)$$

$$t_{k2} = t_{TV} + \Delta t_{TV} = 55 + 5 = 60\ °C \quad (75)$$

$$\phi_{TČ,TV} = 68{,}865 + 1{,}634 \cdot t_{v1} - 0{,}622 \cdot t_{k2} + 0{,}004 \cdot t_{v1}^2 + 0{,}007 \cdot t_{k2}^2 - 0{,}014 \cdot t_{v1} \cdot t_{k2} = 68{,}865 + 1{,}634 \cdot 0{,}9 - 0{,}622 \cdot 60 + 0{,}004 \cdot 0{,}9^2 + 0{,}007 \cdot 60^2 - 0{,}014 \cdot 0{,}9 \cdot 60 = 56{,}47\ kW \quad (76)$$

$$COP_{TČ,TV} = 6{,}285 + 0{,}097 \cdot t_{v1} - 0{,}119 \cdot t_{k2} + 0 \cdot t_{v1}^2 + 0{,}001 \cdot t_{k2}^2 - 0{,}001 \cdot t_{v1} \cdot t_{k2} = 6{,}285 + 0{,}097 \cdot 0{,}9 - 0{,}119 \cdot 60 + 0 \cdot 0{,}9^2 + 0{,}001 \cdot 60^2 - 0{,}001 \cdot 0{,}9 \cdot 60 = = 2{,}17 \quad (77)$$

$$\phi_{TČ,VYT} = 68{,}865 + 1{,}634 \cdot t_{v1} - 0{,}622 \cdot t_{k2} + 0{,}004 \cdot t_{v1}^2 + 0{,}007 \cdot t_{k2}^2 - 0{,}014 \cdot t_{v1} \cdot t_{k2} = 68{,}865 + 1{,}634 \cdot 0{,}9 - 0{,}622 \cdot 42{,}7 + 0{,}004 \cdot 0{,}9^2 + 0{,}007 \cdot 42{,}7^2 - 0{,}014 \cdot 0{,}9 \cdot 42{,}7 = 55{,}53\ kW \quad (78)$$

$$COP_{TČ,VYT} = 6{,}285 + 0{,}097 \cdot t_{v1} - 0{,}119 \cdot t_{k2} + 0 \cdot t_{v1}^2 + 0{,}001 \cdot t_{k2}^2 - 0{,}001 \cdot t_{v1} \cdot t_{k2} = 6{,}285 + 0{,}097 \cdot 0{,}9 - 0{,}119 \cdot 42{,}7 + 0 \cdot 0{,}9^2 + 0{,}001 \cdot 42{,}7^2 - 0{,}001 \cdot 0{,}9 \cdot 42{,}7 = 2{,}77 \quad (79)$$

$$Q_{TC,dis,TV,j} = \phi_{TC,TV,j} \cdot \tau_j = 56{,}47 \cdot 1 = 56{,}47\ kWh \quad (80)$$

$$Q_{TC,dod,TV} = \min\left(Q_{TC,dis,TV}; Q_{TV}\right) = \min(56{,}47; 9{,}15) = 9{,}15\ kWh \quad (81)$$

$$E_{TC,TV} = \frac{Q_{TC,dod,TV}}{COP_{TV}} = \frac{9{,}15}{2{,}17} = 4{,}21\ kWh \quad (82)$$

$$E_{ZZ,TV} = Q_{TV} - Q_{TC,dod,TV} = 9{,}15 - 9{,}15 = 0\ \text{kWh} \quad (83)$$

$$\tau_{TC,TV} = \frac{Q_{TC,dod,TV}}{\phi_{TC,TV}} = \frac{9{,}15}{56{,}47} = 0{,}16\ h \quad (84)$$

$$E_{pom,TV} = P_{pom,TV} \cdot \tau_{TC,TV} = 0{,}09 \cdot 0{,}16 = 0{,}015\ kWh \quad (85)$$

$$\tau_{TC,VYT,dis} = \tau_j - \tau_{TC,TV} = 1 - 0{,}16 = 0{,}84\ h \quad (86)$$

$$Q_{TC,dis,VYT} = \tau_{TC,VYT,dis} \cdot \phi_{TC,VYT} = 0{,}84 \cdot 55{,}53 = 46{,}53\ kWh \quad (87)$$

$$Q_{TC,dod,VYT} = \min\left(Q_{TC,dis,VYT}; Q_{VYT}\right) = \min(46{,}53; 45{,}99) = 45{,}99\ kWh \quad (88)$$

$$E_{TC,VYT} = \frac{Q_{TC,dod,VYT}}{COP_{VYT}} = \frac{45{,}99}{2{,}77} = 16{,}59\ kWh \quad (89)$$

$$E_{ZZ,VYT} = Q_{VYT} - Q_{TC,dod,VYT} = 45{,}99 - 45{,}99 = 0\ kWh \quad (90)$$

$$\tau_{TC,VYT} = \frac{Q_{TC,dod,VYT}}{\phi_{TC,VYT}} = \frac{45{,}99}{55{,}53} = 0{,}83\ h \quad (91)$$

$$E_{pom,VYT} = P_{pom,VYT} \cdot t_{TC,VYT} = 0{,}09 \cdot 0{,}83 = 0{,}075\ kWh \quad (92)$$

$$SPF = \frac{Q_{TC,dod} + Q_{ZZ}}{E_{TC} + E_{ZZ} + E_{pom}} = \frac{Q_{TV} + Q_{VYT}}{E_{sys}} = \frac{9{,}15 + 45{,}99}{4{,}21 + 0{,}015 + 16{,}59 + 0{,}075} = 2{,}64 \quad (93)$$

V Tab. 26, Tab. 27 a Tab. 28 jsou uvedeny výsledky hodinové bilance pro roky 2014-2016. Výsledky z hodinové bilance by se měly realitě blížit nejvíce. Lze si všimnout, že záložní zdroj pro vytápění je potřeba od října do března. V roce 2015 výkon tepelného čerpadla zcela stačí na pokrytí potřeb tepla pro přípravu teplé vody, ale v letech 2014 a 2016 by už minimální množství tepla musel dodat i záložní zdroj. To může být způsobeno omezeným výkonem tepelného čerpadla, při nejnižších ročních teplotách. Nejnižší teplota v roce 2014 byla v prosinci a to -10,73 °C což je i měsíc, kdy byl potřeba záložní zdroj pro přípravu teplé vody. V roce 2016 byla nejnižší teplota v lednu a to -15,79 °C a třetí nejnižší byla v listopadu -6,15 °C, a to by bylo taky potřeba využít záložní zdroje na přípravu teplé vody.

Tab. 26 Výsledky analýzy hodinové bilance pro rok 2014

Měsíc	Q_{TV} [kWh]	Q_{vyt} [kWh]	t_{v1} [°C]	COP_{TV}	COP_{VYT}	$E_{TC,TV}$ [kWh]	$E_{TC,VYT}$ [kWh]	$E_{ZZ,TV}$ [kWh]	$E_{ZZ,VYT}$ [kWh]	$E_{pom,TV}$ [kWh]	$E_{pom,VYT}$ [kWh]	SPF
leden	12 083	25 649	1,9	2,20	2,88	5 480	8 460	-	1 958	19	38	2,36
únor	11 122	17 547	3,6	2,25	3,00	4 915	5 789	-	682	17	26	2,51
březen	10 772	6 882	7,2	2,36	3,16	4 540	2 283	-	20	16	11	2,57
duben	9 901	754	11,3	2,50	3,13	3 954	250	-	-	14	1	2,53
květen	9 328	134	13,4	2,57	3,39	3 632	40	-	-	12	0	2,57
červen	7 646	-	17,2	2,71	-	2 798	-	-	-	10	-	2,72
červenec	8 060	-	20,7	2,84	-	2 861	-	-	-	10	-	2,81
srpen	9 185	-	17,4	2,71	-	3 379	-	-	-	12	-	2,71
září	9 389	-	15,5	2,64	-	3 541	-	-	-	12	-	2,64
říjen	10 915	4 040	11,6	2,51	3,49	4 342	1 231	-	3	15	6	2,66
listopad	10 849	18 641	6,3	2,33	3,30	4 643	5 797	-	260	16	27	2,73
prosinec	11 580	26 969	2,2	2,21	2,92	5 237	8 629	15	2 476	18	39	2,35

Celková roční spotřeba elektrické energie za rok 2014 je 87 534 kWh. Celkový sezonní topný faktor systému za rok 2014 je 2,53.

Tab. 27 Výsledky analýzy hodinové bilance pro rok 2015

Měsíc	Q_{TV} [kWh]	Q_{vyt} [kWh]	t_{v1} [°C]	t_{k2TV} [°C]	t_{k2vyt} [°C]	COP_{TV}	COP_{VYT}	$E_{TC,TV}$ [kWh]	$E_{TC,VYT}$ [kWh]	$E_{ZZ,TV}$ [kWh]	$E_{ZZ,VYT}$ [kWh]	$E_{pom,TV}$ [kWh]	$E_{pom,VYT}$ [kWh]	SPF
leden	11 186	27 146	2,2	60	41,8	2,21	2,89	5 064	9 161	-	1 107	17	41	2,49
únor	10 076	20 959	0,3	60	43,3	2,16	2,72	4 651	7 464	-	1 169	16	33	2,33
březen	10 374	9 388	5,1	60	40,6	2,30	3,03	4 495	3 211	-	7	15	15	2,55
duben	8 440	3 493	8,5	60	41,0	2,41	2,98	3 528	1 228	-	-	12	6	2,50
květen	7 173	-	13,7	60	-	2,58	-	2 789	-	-	-	10	-	2,56
červen	8 034	-	17,0	60	-	2,70	-	3 006	-	-	-	10	-	2,66
červenec	9 072	-	21,9	60	-	2,89	-	3 186	-	-	-	11	-	2,84
srpen	9 835	-	23,0	60	-	2,93	-	3 413	-	-	-	12	-	2,87
září	10 148	-	14,6	60	-	2,61	-	3 938	-	-	-	13	-	2,57
říjen	11 393	7 640	8,7	60	38,0	2,41	3,37	4 773	2 307	-	3	16	11	2,68
listopad	11 094	12 790	7,1	60	38,1	2,36	3,38	4 731	3 921	-	249	16	18	2,63
prosinec	11 534	19 873	5,9	60	38,9	2,32	3,26	4 997	6 140	-	367	17	29	2,72

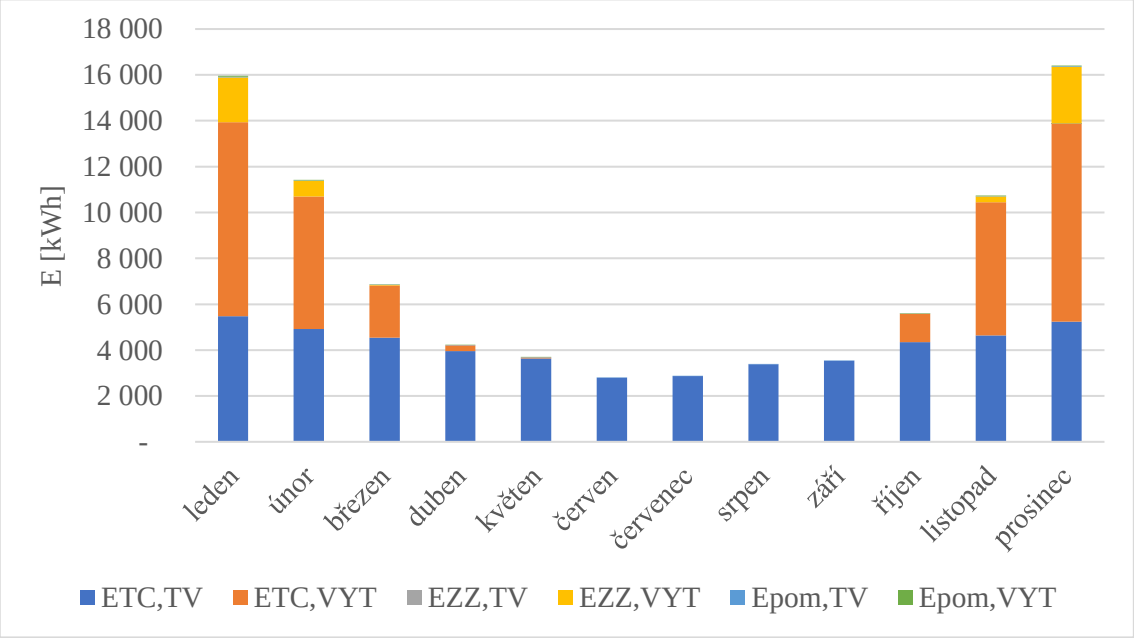
Celková roční spotřeba elektrické energie za rok 2015 je 85 228 kWh. Celkový sezonní topný faktor systému za rok 2015 je 2,58.

Tab. 28 Výsledky analýzy hodinové bilance pro rok 2016

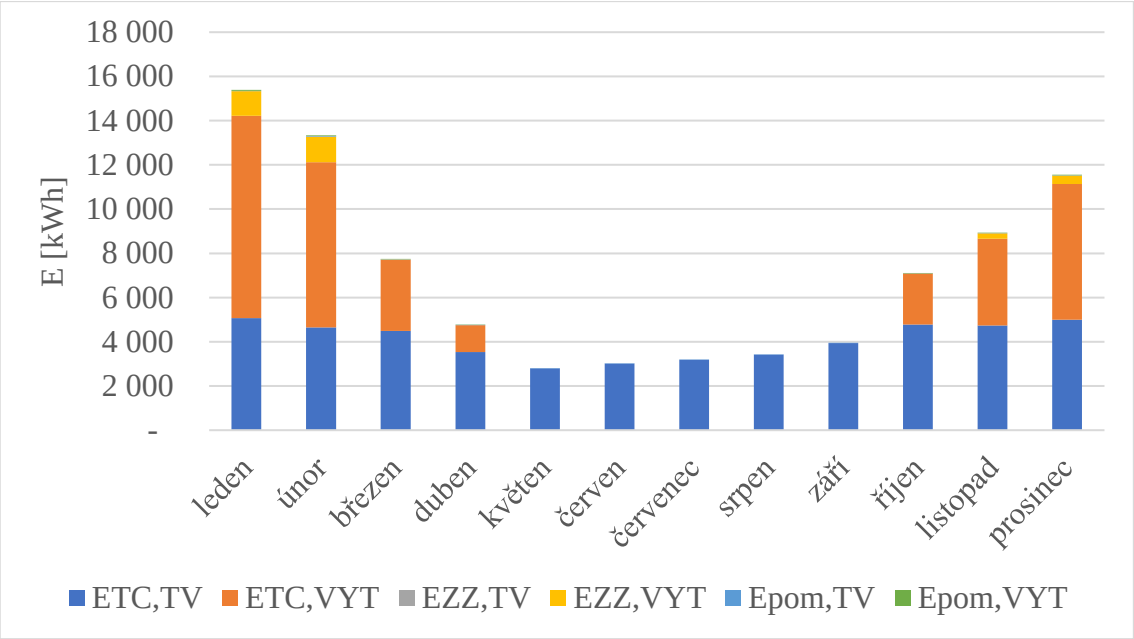
Měsíc	Q_{TV} [kWh]	Q_{vyt} [kWh]	t_{v1} [°C]	COP_{TV}	COP_{VYT}	$E_{TC,TV}$ [kWh]	$E_{TC,VYT}$ [kWh]	$E_{ZZ,TV}$ [kWh]	$E_{ZZ,VYT}$ [kWh]	$E_{pom,TV}$ [kWh]	$E_{pom,VYT}$ [kWh]	SPF
leden	11 338	29 616	0,4	2,16	2,78	5 276	9 234	8	4 572	18	41	2,14
únor	9 779	17 781	3,8	2,26	3,05	4 345	5 847	-	477	15	27	2,57
březen	9 948	16 011	3,7	2,25	3,00	4 448	5 386	-	484	15	25	2,51
duben	8 546	3 302	8,6	2,41	3,26	3 578	1 057	-	-	12	5	2,55
květen	7 466	71	14,4	2,61	-	2 893	24	-	-	10	0	2,58
červen	8 340	-	17,9	2,73	-	3 081	-	-	-	11	-	2,70
červenec	9 200	-	20,2	2,82	-	3 292	-	-	-	11	-	2,79
srpen	10 122	-	18,9	2,77	-	3 691	-	-	-	13	-	2,73
září	10 797	-	17,8	2,73	-	4 017	-	-	-	14	-	2,68
říjen	12 046	7 487	9,4	2,43	3,55	4 990	2 144	-	34	17	10	2,71
listopad	11 808	19 357	3,8	2,26	3,05	5 259	6 253	5	799	18	29	2,52
prosinec	11 739	28 724	0,7	2,17	2,77	5 437	9 343	-	3 074	19	42	2,26

Celková roční spotřeba elektrické energie za rok 2016 je 99 399 kWh. Celkový sezonní topný faktor systému za rok 2016 je 2,45.

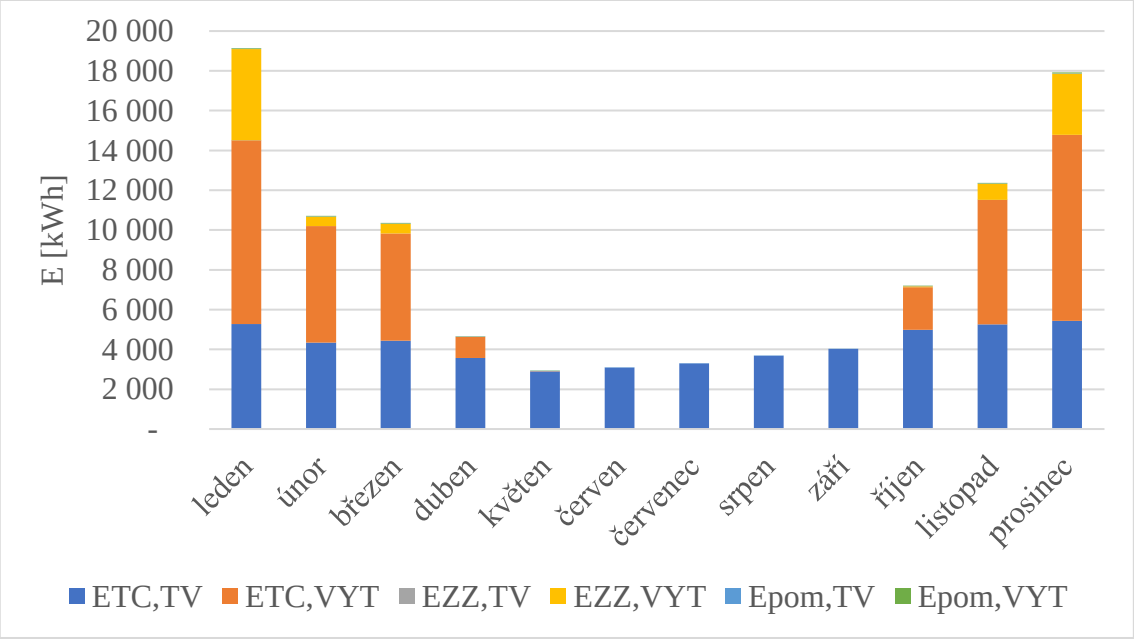
Na Obr. 23, Obr. 24 a Obr. 25 je znázorněn průběh spotřeby elektrické energie tepelného čerpadla pro vytápění, přípravu teplé vody, záložního zdroje a pomocných zařízení pro přípravu teplé vody a vytápění. Vliv záložního zdroje na celkovou spotřebu elektrické energie je ze všech metod největší.



Obr. 23 Průběh spotřeby elektrické energie v letech 2014

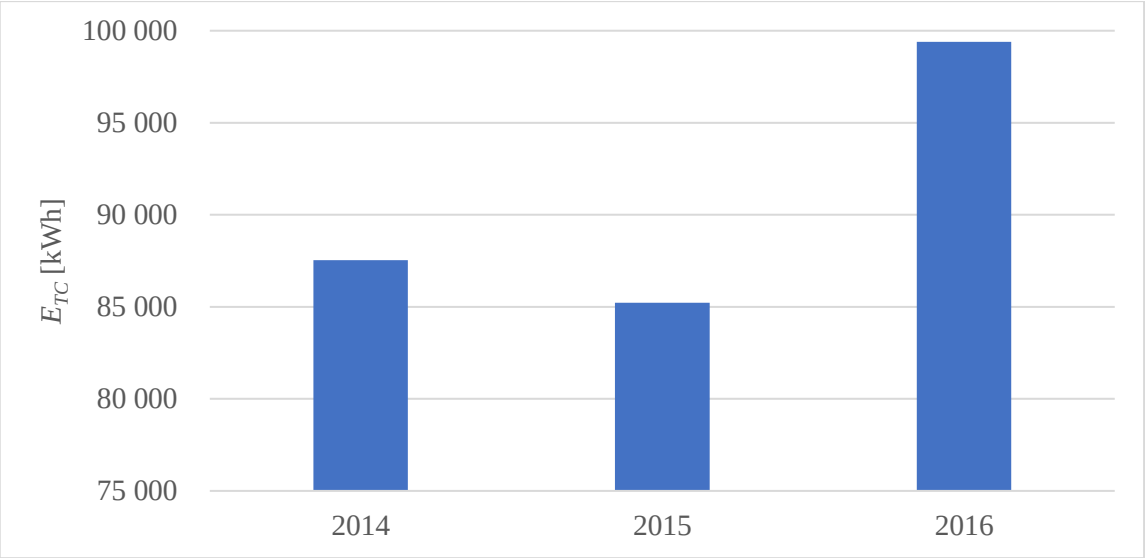


Obr. 24 Průběh spotřeby elektrické energie v letech 2015



Obr. 25 Průběh spotřeby elektrické energie v letech 2016

Na Obr. 26 je znázorněn průběh celkové roční spotřeby eklektické energie v letech 2014-2016. Z obrázku lze vyčíst, že v roce 2015 byla celková spotřeba elektrické nejnižší a v roce 2016 byla naopak nejvyšší.



Obr. 26 Průběh celkové roční spotřeby eklektické energie v letech 2014-2016

4.4 Porovnání

Pro porovnání byly výstupy z hodinové simulace brány jako referenční, protože jsou nejpodrobnější a měly by nejvíce odpovídat realitě. Výstupy z ostatních výpočtových metod jsou pak porovnávány s výstupy z hodinové simulace. V Tab. 29 až Tab. 31 jsou porovnány celkové spotřeby elektrické energie a sezonní topné faktory pro jednotlivé měsíce v letech 2014-2016. Měsíční porovnání bylo možné provést s měsíční, měsíční intervalovou a hodinovou metodou. Zbylé výpočtové metody na měsíční porovnání nelze použít.

Tab. 29 Porovnání celkové spotřeby elektrické energie a sezonního topného faktoru faktorů z měsíční a intervalové měsíční metody vůči hodinové simulaci pro rok 2014

Měsíc	***E*$_{TC}$ [kWh]**					***SPF***				
2014	hod.	měs.	rozdíl %	int. měs.	rozdíl %	hod.	měs.	rozdíl %	int. měs.	rozdíl %
leden	15 955	14 473	**9,29**	15 536	**2,62**	2,36	2,61	**10,24**	2,43	**2,69**
únor	11 430	10 780	**5,69**	11 022	**3,56**	2,51	2,66	**6,03**	2,60	**3,70**
březen	6 868	6 610	**3,76**	6 774	**1,38**	2,57	2,67	**3,93**	2,61	**1,41**
duben	4 219	4 173	**1,11**	4 216	**0,08**	2,53	2,55	**1,12**	2,53	**0,08**
květen	3 684	3 671	**0,36**	3 695	**0,29**	2,57	2,58	**0,36**	2,56	**0,29**
červen	2 808	2 830	**0,81**	2 846	**1,36**	2,72	2,70	**0,80**	2,69	**1,34**
červenec	2 871	2 846	**0,87**	2 860	**0,37**	2,81	2,83	**0,88**	2,82	**0,37**
srpen	3 391	3 394	**0,10**	3 411	**0,59**	2,71	2,71	**0,10**	2,69	**0,59**
září	3 553	3 561	**0,24**	3 578	**0,71**	2,64	2,64	**0,24**	2,62	**0,70**
říjen	5 598	5 401	**3,51**	5 510	**1,57**	2,66	2,77	**3,90**	2,71	**1,86**
listopad	10 744	10 341	**3,75**	10 603	**1,31**	2,73	2,85	**4,57**	2,78	**1,98**
prosinec	16 414	14 607	**11,01**	16 335	**0,48**	2,35	2,64	**12,37**	2,36	**0,48**

Z Tab. 29 lze vyčíst, že hodnoty celkové spotřeby elektrické energie z měsíční metody se od hodnot z hodinové metody liší více v zimních měsících kdy probíhá vytápění. To může být dáno tím, že metoda neuvažuje vliv záložního zdroje. Měsíční intervalová metoda se od podrobné hodinové metody liší nejméně.

Hodnoty sezonního topného faktoru se u měsíční a měsíční intervalové metody liší přibližně o stejný procentuální rozdíl jako u celkové spotřeby elektrické energie. Opět je měsíční intervalová metoda přesnější než měsíční metoda.

Tab. 30 Porovnání celkové spotřeby elektrické energie a sezonního topného faktoru faktorů z měsíční a intervalové měsíční metody vůči hodinové simulaci pro rok 2015

Měsíc	E_{TC} **[kWh]**					***SPF***				
2015	hod.	měs.	rozdíl %	int. měs.	rozdíl %	hod.	měs.	Rozdíl %	int. měs.	rozdíl %
leden	15 391	14 504	**5,77**	15 095	**1,92**	2,49	2,64	**6,12**	2,54	**1,96**
únor	13 333	12 383	**7,13**	12 755	**4,34**	2,33	2,51	**7,67**	2,43	**4,53**
březen	7 744	7 495	**3,21**	7 657	**1,12**	2,55	2,64	**3,32**	2,58	**1,14**
duben	4 774	4 510	**5,53**	4 629	**3,03**	2,50	2,65	**5,85**	2,58	**3,13**
květen	2 799	2 785	**0,49**	2 803	**0,13**	2,56	2,58	**0,49**	2,56	**0,14**
červen	3 017	2 983	**1,11**	2 998	**0,62**	2,66	2,69	**1,13**	2,68	**0,62**
červenec	3 197	3 150	**1,48**	3 169	**0,89**	2,84	2,88	**1,50**	2,86	**0,89**
srpen	3 425	3 364	**1,78**	3 386	**1,15**	2,87	2,92	**1,81**	2,90	**1,17**
září	3 951	3 892	**1,49**	3 910	**1,03**	2,57	2,61	**1,51**	2,60	**1,04**
říjen	7 110	6 892	**3,07**	7 023	**1,23**	2,68	2,76	**3,21**	2,71	**1,28**
listopad	8 936	8 515	**4,71**	8 818	**1,32**	2,63	2,81	**6,56**	2,71	**2,89**
prosinec	11 551	11 114	**3,78**	11 348	**1,75**	2,72	2,83	**3,93**	2,77	**1,78**

V roce 2015 byl procentuální rozdíl mezi měsíční a hodinovou, měsíční intervalovou a hodinovou metodou velmi podobný jako v roce 2014. Opět má měsíční intervalová metoda menší odchylku od hodinové než měsíční metoda.

Tab. 31 Porovnání celkové spotřeby elektrické energie a sezonního topného faktoru faktorů z měsíční a intervalové měsíční metody vůči hodinové simulaci pro rok 2016

Měsíc	E_{TC} **[kWh]**					***SPF***				
2016	hod.	měs.	rozdíl %	int. měs.	rozdíl %	hod.	měs.	rozdíl %	int. měs.	rozdíl %
leden	19 150	16 109	**15,88**	18 833	**1,66**	2,14	2,54	**18,88**	2,17	**1,69**
únor	10 711	10 214	**4,64**	10 447	**2,46**	2,57	2,70	**4,86**	2,64	**2,52**
březen	10 357	9 718	**6,17**	9 910	**4,32**	2,51	2,67	**6,58**	2,62	**4,51**
duben	4 652	4 491	**3,45**	4 579	**1,56**	2,55	2,64	**3,57**	2,59	**1,58**
květen	2 926	2 888	**1,30**	2 910	**0,57**	2,58	2,61	**1,32**	2,59	**0,57**
červen	3 091	3 059	**1,06**	3 073	**0,60**	2,70	2,73	**1,07**	2,71	**0,61**
červenec	3 303	3 267	**1,07**	3 283	**0,59**	2,79	2,82	**1,09**	2,80	**0,60**
srpen	3 704	3 663	**1,11**	3 682	**0,59**	2,73	2,76	**1,12**	2,75	**0,60**
září	4 031	3 967	**1,58**	3 988	**1,06**	2,68	2,72	**1,61**	2,71	**1,07**
říjen	7 196	7 029	**2,32**	7 134	**0,86**	2,71	2,78	**2,37**	2,74	**0,87**
listopad	12 364	11 630	**5,93**	11 942	**3,41**	2,52	2,68	**6,31**	2,61	**3,53**
prosinec	17 915	15 852	**11,51**	17 581	**1,86**	2,26	2,55	**13,01**	2,30	**1,90**

V roce 2016 byla měsíční intervalová metoda opět přesnější než měsíční metoda. V Tab. 31 je vidět, že se celková spotřeba elektrické energie a sezonní topný faktor v prosinci a lednu u měsíční metody odlišuje o více než deset procent. U měsíční intervalové metody je odchylka jen v jednotkách procent.

V Tab. 32, Tab. 33 a Tab. 34 se s hodinovou metodou porovnávají metody: měsíční intervalová, roční podle TNI 730331, měsíční a roční intervalová. Porovnávají se roční spotřeby elektrické energie a sezonní topné faktory pro roky 2014-2016.

Tab. 32 Porovnání roční spotřeby elektrické energie a sezonního topného faktoru pro rok 2014

Metoda	E_{TC} **[kWh]**	**Rozdíl [%]**	***SPF***	**Rozdíl [%]**
Hodinová	**87 534**		**2,53**	
Intervalová měsíční	86 385	1,31	2,56	1,33
Roční podle TNI 730331	84 287	3,71	2,63	3,85
Měsíční	82 687	5,54	2,68	5,79
Intervalová roční	81 466	6,93	2,72	7,45

Jak už naznačovaly výsledky z měsíčního porovnání, tak i v roce 2014 se celková spotřeba eklektické energie a sezonní topný faktoru u měsíční intervalové metody blížily výsledkům hodinové metody nejvíce. Liší se o méně než dvě procenta. Překvapivé jsou výsledky z roční metody podle TNI 730331. Přestože jde o výpočtově nejjednodušší metodu, tak přibližně čtyřprocentní rozdíl oproti hodinové metodě je velmi malý. Nejhůře dopadla roční intervalová metoda, které se oproti hodinové liší přibližně o sedm procent.

Tab. 33 Porovnání roční spotřeby elektrické energie a sezonního topného faktoru pro rok 2015

Metoda	ETC [kWh]	Rozdíl [%]	SPF	Rozdíl [%]
Hodinová	85 228		2,58	
Intervalová měsíční	83 591	1,92	2,63	1,96
Roční podle TNI 730331	83 560	1,96	2,63	2,00
Intervalová roční	82 013	3,77	2,68	3,92
Měsíční	81 587	4,27	2,69	4,39

V roce 2015 se výsledkům hodinové metody opět nejvíce blížily hodnoty z měsíční intervalové metody. Výsledky roční metody podle TNI 730331 jsou s intervalovou měsíční metodou téměř shodné. S přibližně čtyřprocentním rozdílem od hodinové metody jsou hodnoty z roční intervalové metody a nejhůře dopadla měsíční metoda s více než čtyřprocentní odchylkou. V roce 2015 byla potřeba záložního zdroje ze všech hodnocených let nejnižší, a to se nejspíše projevilo i na menších odchylkách u zjednodušených metod.

Tab. 34 Porovnání roční spotřeby elektrické energie a sezonního topného faktoru pro rok 2016

Metoda	ETC [kWh]	Rozdíl [%]	SPF	Rozdíl [%]
Hodinová	99 399		2,45	
Intervalová měsíční	97 362	2,05	2,50	2,09
Roční podle TNI 730331	92 339	7,10	2,64	7,65
Měsíční	91 887	7,56	2,65	8,11
Intervalová roční	91 270	8,18	2,67	8,91

V roce 2016 se opět k výsledkům hodinové metody nejvíce blížila měsíční intervalová metoda s přibližně dvouprocentním rozdílem. Odchylky měsíční, intervalové roční a roční metody podle TNI 730331 oproti hodinové metodě byly velmi podobné. Roční intervalová metoda dopadla nejhůře.

5. ZÁVĚR

Práce se zabývala analýzou výpočtového hodnocení provozu tepelného čerpadla v daném bytovém domě. Cílem této práce bylo zjistit, která metoda je pro bilancování tepelného čerpadla nejvhodnější a o kolik se výsledky z metod vzájemně liší. V úvodu práce je uvedena základní teorie o tepelných čerpadlech. Dále jsou v této práci popsány použité metody pro bilancování tepelných čerpadel. Pak následuje samotná analýza v bytovém domě.

Pro pokrytí potřeb tepla na vytápění a přípravu teplé vody u daného bytového domu byla použita dvě tepelná čerpadla vzduch-voda WPL 57. Pro tato tepelná čerpadla pak byla vypracována výpočtová analýza hodnocení provozu. Pro měsíční bilancování byla použita: hodinová metoda, měsíční metoda a měsíční intervalová metoda. Pro roční bilancování byla kromě výše zmíněných metod využita ještě metoda roční intervalová a roční metoda podle TNI 730331. Analýza byla provedena pro roky 2014 až 2016, pro které byla dostupná hodinová klimatická data a hodinové potřeby tepla pro vytápění a přípravu teplé vody.

Z výsledků analýzy vyplývá, že pro měsíční bilancování se jako optimální metoda jeví měsíční intervalová metoda, která se oproti podrobné hodinové simulaci liší přibližně o dvě procenta. Intervalová metoda spolu s hodinovou simulací započítává i elektrickou energii nutnou pro provoz záložního zdroje tepla, v případě nutnosti provozu tepelného čerpadla v bivalentním režimu. To zjednodušené metody nezohledňují. Na rozdíl od hodinové simulace navíc měsíční intervalová metoda nepotřebuje data hodinových potřeb tepla na vytápění a přípravu teplé vody, které jsou většinou nedostupné.

Z výsledků analýzy pro roční bilancování opět vychází měsíční intervalová metoda nejlépe, ale překvapivé je, jak blízko výsledkům hodinové simulace je roční metoda podle TNI 730331. Přestože se jedná o výpočtově nejjednodušší metodu, tak odchylka oproti hodinové simulaci byla velmi malá. Pohybovala se mezi dvěma až osmi procenty. V roce 2015 se výsledky téměř rovnaly výsledkům měsíční intervalové metody. Je potřeba ale zmínit, že tato metoda nezohledňuje vliv záložního zdroje, což může výsledek zkreslovat.

Největší odchylku oproti hodinové simulaci vykazovala většinou roční intervalová metoda. Ve letech 2014 a 2016 kdy byla potřeba záložního zdroje nejvyšší se odchylka od hodinové metody pohybovala okolo sedmi a půl procent, přestože výpočet

zohledňuje vliv záložního zdroje. V roce 2015 měla největší odchylku měsíční metoda, která využívá střední venkovní teplotu v jednotlivých měsících. Odchylka byla přibližně čtyřprocentní. V letech 2014 a 2016 byly její výsledky druhé nejméně přesné a oproti výsledkům z roční intervalové metody se příliš nelišily.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] MATUŠKA, Tomáš. *Alternativní zdroje energie*. Praha: Evropský sociální fond, 2010. Skriptum. ČVUT v Praze, Fakulta strojní.

[2] Princip tepelného čerpadla. *Enerfin plus* [online]. Plzeň: Enerfin plus, [2014] [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: https://www.enerfinplus.cz/princip-tepelneho-cerpadla.html

[3] KOLARČÍK, Kamil, Jaroslav KAMINSKÝ a Mojmír VRTEK. *Kompresory*. Ostrava: Evropský sociální fond, 2012. Skriptum. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní.

[4] *Výsledky statistických šetření: Tepelná čerpadla (energie prostředí)* [online]. Praha: Oddělení analýz a datové podpory koncepcí, MPO, 2018 [cit. 2019-06-02]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/obnovitelne-zdroje-energie/2018/7/Tepelna-cerpadla-2010-2017_1.pdf

[5] SRDEČNÝ, Karel a Jan TRUXA. *Tepelná čerpadla*. Brno: ERA, 2005. 21. století. ISBN 80-736-6031-8.

[6] HONZÍK, Jiří. Dimenzování tepelného čerpadla vzduch-voda, bivalentní/záložní zdroj. In: *TZB-info* [online]. 2011 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: http://vytapeni.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/7995-dimenzovani-tepelneho-cerpadla-vzduch-voda-bivalentni-zalozni-zdroj

[7] BOREK, René. Faktory ovlivňující efektivnost a provoz tepelných čerpadel. *Elektrorevue* [online]. 2006 [cit. 2019-06-02]. Dostupné z: http://www.elektrorevue.cz/clanky/06038/index.html

[8] Postup při návrhu tepelných čerpadel. *TZB-info* [online]. Praha: Krainer, 2015 [cit. 2019-06-02]. Dostupné z: https://vytapeni.tzb-info.cz/tepelnacerpadla/12401-postup-pri-navrhu-tepelnych-cerpadel

[9] *PROJEKTOVÁNÍ A INSTALACE: TEPELNÁ ČERPADLA* [online]. 2015. Holzminden: STIEBEL ELTRON, 2015 [cit. 2019-06-03]. Dostupné z: https://www.tepelna-cerpadla.cz/?download=_/download/technicke_informace_tepelna_cerpadla.pdf

[10] *Navrhování a bilancování tepelných čerpadel* [online]. Praha: Matuška, [2015] [cit. 2019-06-03]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/tomas.matuska/wordpress/wp-content/uploads/2015/02/AZE-P6-tepelna_cerpadla_navrhovani_bilancovani.pdf

[11] MATUŠKA, Tomáš. Parametry pro hodnocení efektivity tepelných čerpadel: COP a SCOP. *TZB-info* [online]. Buštěhrad: Matuška, 2015 [cit. 2019-06-03]. Dostupné z: https://vytapeni.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/13196-parametry-pro-hodnoceni-efektivity-tepelnych-cerpadel-cop-a-scop

[12] PROJEKTOVÁNÍ A INSTALACE: TEPELNÁ ČERPADLA. In: *Stiebel Eltron* [online]. Praha: Stiebel Eltron, 2015 [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: http://www.tepelna-cerpadla.cz/?download=_/download/technicke_informace_tepelna_cerpadla.pdf

[13] MATUŠKA, Tomáš a Bořivoj ŠOUREK. Výpočet ročního provozu tepelného čerpadla intervalovou metodou podle TNI 73 0351. *Topenářství instalace*. 2014, **2014**(7), 67.

[14] *TNI 73 0331 (730331) A Energetická náročnost budov – Typické hodnoty pro výpočet*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. Dostupné také z: http://csnonline.agentura-cas.cz/

[15] WPL 57. In: *STIEBEL ELTRON* [online]. (Německo): STIEBEL ELTRON, [2011] [cit. 2019-06-03]. Dostupné z: https://www.stiebel.com.au/images/products/WPL_47_57_Webphoto_02.png

[15] *PVGIS: Photovoltaic Geographic Information System* [online]. Germany: IEHIAS, 2010 [cit. 2019-06-03]. Dostupné z: http://www.integrated-assessment.eu/eu/resource_centre/pvgis_photovoltaic_geographic_information_system.html

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Konstrukční uspořádání tepelného čerpadla [1] 11
Obr. 2 Princip práce spirálového kompresoru a řez válcem spirálového kompresoru [3] 12
Obr. 3 Vývoj počtu instalací tepelných čerpadel v Čechách 14
Obr. 4 Cyklus odmrazování horkými parami a cyklus odmrazování reverzním chodem [1] 16
Obr. 5 Zapojení tepelného čerpadla s kombinovaným zásobníkem a záložními zdroji tepla [1] 19
Obr. 6 Zapojení tepelného čerpadla s oddělenými zásobníky a záložním zdrojem tepla [1] 20
Obr. 7 Graf tepelné ztráty a výkonu tepelného čerpadla v závislosti na venkovní teplotě pro monovalentní provoz 20
Obr. 8 Graf tepelné ztráty a výkonu tepelného čerpadla v závislosti na venkovní teplotě pro bivalentní provoz 21
Obr. 9 Ukázka ekvitermních křivek [10] 24
Obr. 10 Zkoumaný bytový dům 36
Obr. 11 Tepelné čerpadlo WPL 57 [15] 37
Obr. 12 Průběhy průměrných teplot v letech 2014-2016 40
Obr. 13 Porovnání spotřeby elektrické energie tepelného čerpadla v letech 2014-2016 42
Obr. 14 Průběh spotřeby elektrické energie v roce 2014 45
Obr. 15 Průběh spotřeby elektrické energie v roce 2015 46
Obr. 16 Průběh spotřeby elektrické energie v roce 2016 46
Obr. 17 Průběh celkové roční spotřeby eklektické v letech 2014-2016 47
Obr. 18 Průběh spotřeby elektrické energie v roce 2014 51
Obr. 19 Průběh spotřeby elektrické energie v roce 2015 51
Obr. 20 Průběh spotřeby elektrické energie v roce 2016 52
Obr. 21 Průběh celkové roční spotřeby eklektické energie v letech 2014-2016 52
Obr. 22 Průběh spotřeby elektrické energie v letech 2014-2016 54
Obr. 23 Průběh spotřeby elektrické energie v letech 2014 57
Obr. 24 Průběh spotřeby elektrické energie v letech 2015 58
Obr. 25 Průběh spotřeby elektrické energie v letech 2016 58
Obr. 26 Průběh celkové roční spotřeby eklektické energie v letech 2014-2016 59

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Příklad charakteristik výkonu a topného faktoru uváděné výrobcem pro tepelní čerpadlo vzduch-voda WPL 57 [12] 22
Tab. 2 Součinitel ročního provozu tepelného čerpadla $f_{COP,VYT}$ pro vytápění [14] 25
Tab. 3 Součinitel ročního provozu tepelného čerpadla $f_{COP,TV}$ pro přípravu teplé vody [14] 25
Tab. 4 Parametry budovy 35
Tab. 5 Stavební prvky a konstrukce 35
Tab. 6 Součinitel prostupu tepla budovy 35
Tab. 7 Potřeby tepla na vytápění a přípravu teplé vody 36
Tab. 8 Charakteristiky topného výkonu tepelného čerpadla [12] 38
Tab. 9 Charakteristiky topného faktoru tepelného čerpadla [12] 38
Tab. 10 Hodnoty koeficientů pro topný výkon 39
Tab. 11 Hodnoty koeficientů pro topný faktor 39
Tab. 12 Měsíční klimatická data z roku 2014 39
Tab. 13 Měsíční klimatická data z roku 2015 40
Tab. 14 Měsíční klimatická data z roku 2016 40
Tab. 15 Potřeby tepla na vytápění a přípravu teplé vody v roce 2014 40
Tab. 16 Potřeby tepla na vytápění a přípravu teplé vody v roce 2015 41
Tab. 17 Potřeby tepla na vytápění a přípravu teplé vody v roce 2016 41
Tab. 18 Výsledky bilance podle TNI 73 0331 pro roky 2014-2016 42
Tab. 19 Výsledky analýzy měsíční bilance pro rok 2014 44
Tab. 20 Výsledky analýzy měsíční bilance pro rok 2015 44
Tab. 21 Výsledky analýzy měsíční bilance pro rok 2016 45
Tab. 22 Výsledky analýzy měsíční intervalové metody pro rok 2014 49
Tab. 23 Výsledky analýzy měsíční intervalové metody pro rok 2015 50
Tab. 24 Výsledky analýzy měsíční intervalové metody pro rok 2016 50
Tab. 25 Výsledky analýzy roční intervalové metody pro roky 2014-2016 53
Tab. 26 Výsledky analýzy hodinové bilance pro rok 2014 56
Tab. 27 Výsledky analýzy hodinové bilance pro rok 2015 56
Tab. 28 Výsledky analýzy hodinové bilance pro rok 2016 57
Tab. 29 Porovnání celkové spotřeby elektrické energie a sezonního topného faktoru faktorů z měsíční a intervalové měsíční metody vůči hodinové simulaci pro rok 2014 59

Tab. 30 Porovnání celkové spotřeby elektrické energie a sezonního topného faktoru faktorů z měsíční a intervalové měsíční metody vůči hodinové simulaci pro rok 2015 60
Tab. 31 Porovnání celkové spotřeby elektrické energie a sezonního topného faktoru faktorů z měsíční a intervalové měsíční metody vůči hodinové simulaci pro rok 2016 61
Tab. 32 Porovnání roční spotřeby elektrické energie a sezonního topného faktoru pro rok 2014 61
Tab. 33 Porovnání roční spotřeby elektrické energie a sezonního topného faktoru pro rok 2015 62
Tab. 34 Porovnání roční spotřeby elektrické energie a sezonního topného faktoru pro rok 2016 62

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Výpočtový excel pro rok 2014

Příloha 2 Výpočtový excel pro rok 2015

Příloha 3 Výpočtový excel pro rok 2016