



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

OPTIMALIZACE VYTÁPĚNÍ RODINNÉHO DOMU TEPELNÝM ČERPADLEM S FVE

OPTIMIZATION OF COMBINED HEAT PUMP AND SOLAR PV SYSTEM FOR FAMILY HOUSE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Bojanovský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Skryja, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Student: **Jan Bojanovský**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Skryja, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Optimalizace vytápění rodinného domu tepelným čerpadlem s FVE

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na optimalizaci systému vytápění rodinného domu tepelným čerpadlem v kombinaci s malou fotovoltaickou elektrárnou. Základem optimalizace je stanovení požadovaných tepelných výkonů pro různé období roku, stanovení energetických bilancí a energetických výnosů z malé FVE a energetických spotřeb pro vytápění a ohřev TUV v rodinném domku. Systém vytápění bude dále zhodnocen z hlediska akumulace jak elektrické, tak tepelné energie.

Cíle bakalářské práce:

1. Rešerše systému tepelné čerpadlo – fotovoltaický systém – akumulace
2. Popis optimalizovaného systému RD
3. Energetické bilance
4. Optimalizace toků energií a návrh akumulace
5. Ekonomická bilance

Seznam doporučené literatury:

CIHELKA, Jaromír. Solární tepelná technika. Praha: T. Malina, 1994, 203 s. : il. ISBN 80-900759-5-9

Haselhuhn R., Fotovoltaika-budovy jako zdroj proudu, Hel Ostrava 2010, ISBN978-80-86167-33-6

SRDEČNÝ, Karel a Jan TRUXA. Tepelná čerpadla. Praha: EkoWATT, 2009, 71 s. : il., mapy. ISBN978-80-

87333-02-0

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této práce je navrhnout optimalizaci systému rodinného domu vytápěného tepelným čerpadlem v kombinaci s malou fotovoltaickou elektrárnou a baterií. Rešeršní část práce popisuje princip funkce a druhy tepelných čerpadel, fotovoltaických elektráren a akumulace energie z pohledu jejich využití v rodinném domě. Praktická část práce se dále věnuje zhodnocení a optimalizaci systému, který byl do rodinného domu nově instalován. Protože v tomto konkrétním případě byl systém zapojen v nedávné době a nebylo tak možno získat data kontinuálně za celý rok užívání, byla chybějící data doplněna simulací či aproximací. Na základě kombinace naměřených a nasimulovaných dat byla následně navržena optimalizace systému z hlediska ekonomicky co nejefektivnějšího využití elektrické a tepelné energie. Dle výstupů této práce je pak možno posoudit ekonomiku provozu tepelného čerpadla a fotovoltaické elektrárny a vhodnost instalace tohoto systému do staršího rodinného domu.

Klíčová slova

Tepelné čerpadlo, fotovoltaická elektrárna, akumulace energie, virtuální baterie

ABSTRACT

The aim of this work is to propose the optimization of a family house system heated by a heat pump in combination with a small photovoltaic power plant and a battery. The research part of the work describes the principle of operation and types of heat pumps, photovoltaic power plants and energy storage from the perspective of their use in a family house. The practical part of the work further focuses on the evaluation and optimization of the system that was newly installed in the family house. Because in this particular case the system was recently put into operation and it was not possible to obtain data continuously for the entire year of use, the missing data were supplemented by simulation or approximation. Based on a combination of measured and simulated data, the system was subsequently optimized for the most economically efficient use of electrical and thermal energy. Based on the outputs of this work, it is possible to assess the economics of operating the heat pump and photovoltaic power plant and the suitability of installing this system in an older family house.

Key words

Heat pump, photovoltaic power plant, accumulation of energy, virtual battery

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BOJANOVSKÝ, Jan. *Optimalizace vytápění rodinného domu tepelným čerpadlem s FVE*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/158219>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Pavel Skryja.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Pavla Skryji, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 24. 5. 2024

.....
Jan Bojanovský

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Pavlu Skryjovi, Ph.D., za mnoho cenných rad a vedení mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině za veškerou podporu v průběhu psaní této práce a celého studia.

Obsah

1. Úvod.....	6
2. Rešerše systému tepelné čerpadlo – fotovoltaický systém – akumulace	7
2.1. Tepelná čerpadla	7
2.1.1. Princip funkce	9
2.1.2. Typy tepelných čerpadel.....	12
2.2. Fotovoltaické systémy	15
2.2.1. Fotoelektrický jev, princip funkce, účinnost a výkon	16
2.2.2. Typy panelů	23
2.2.3. Střídač.....	26
2.3. Akumulace.....	27
2.3.1. Funkce	27
2.3.2. Chemická a elektrochemická akumulace	27
2.3.3. Mechanická akumulace	30
2.3.4. Tepelná akumulace	31
3. Popis systému RD	33
3.1. Popis RD a lokalit.....	33
3.1.1. Střecha s FV panely	33
3.1.2. Objekt domu	33
3.1.3. Lokalita.....	34
3.2. Součásti systému RD	36
4. Energetická bilance	39
4.1. Spotřeba dřeva.....	39
4.2. Spotřeba vody.....	39
4.3. Elektřina	40
4.3.1. Elektřina ze sítě	41
4.3.2. Elektřina vyrobená pomocí FV	42
4.4. Teplo získané pomocí tep. čerpadla - tepelné výkony pro různá období roku...	43
4.5. Celková energie.....	44
5. Optimalizace toků energií a návrh akumulace	45
5.1. Tepelné čerpadlo – průměrný topný faktor.....	45
5.2. Výkon fotovoltaického generátoru	46
5.2.1. Umístění a sklon panelů, zastínění	51
5.3. Návrh akumulace energie	53
5.3.1. Virtuální baterie.....	53
5.3.2. Akumulace tepla.....	56
5.4. Optimalizace toků energií.....	59
6. Ekonomická bilance	59
7. Závěr.....	64
8. Seznam použitých zdrojů	65
9. Seznam zkratk a symbolů.....	73

1. Úvod

Tepelné čerpadlo, fotovoltaika a baterie. V dnešní době se už asi nenajde nikdo, kdo by tyto termíny neslyšel, neviděl na střechách tmavé panely nebo neslyšel slabé hučení venkovních jednotek tepelných čerpadel. K rozmachu těchto systémů a hledání alternativních zdrojů vytápění za poslední roky přispělo mnoho okolností.

K hledání a pořizování alternativy tradičního způsobu vytápění přispívá také cena energií na vytápění, která má na rozpočet rodinného domu velký dopad. V případě použití plynu jako zdroje energie je zde navíc i nejistota dodávek, kterých jsme byli za poslední roky svědky. Mnoho lidí proto nyní volí cestu vytápění domácnosti tepelným čerpadlem. Jakmile se elektřina stane jediným zdrojem energie, cesta k její úspoře a zdrojům nás zajímají o to více. Jako vhodné řešení se jeví diverzifikace odběru ze sítě fotovoltaikou. Pro noční spotřebu nebo pro dny s horším počasím se fotovoltaika často doplňuje o vhodný typ akumulace.

Méně častým, ale v důsledku důležitějším důvodem je ekologie. Spalování neobnovitelných fosilních paliv je v dlouhodobém měřítku neudržitelné vzhledem k jejich omezeným zásobám a globálnímu oteplování. Získávání energie z obnovitelných zdrojů je proto prosazováno na globální, evropské i státní úrovni. Přejít na udržitelné zdroje energií v domácnostech je proto podporován dotačními programy, které vlastníkům nemovitostí zpřístupňují nákup zařízení.

Nelze se tedy divit rozmachu pořizování ať už celého systému tepelné čerpadlo-fotovoltaika-akumulace energie, nebo jen jeho částí. Je však tento přístup nejvýhodnější? Na to nelze odpovědět už jen kvůli rozmanitosti staveb, do kterých se instaluje, geografickým specifikacím nebo efektivitě systému. Nové pasivní stavby jsou na tento systém navrženy. Co ale staré domy, při jejichž stavbě bylo získávání energie ze slunce a venkovního vzduchu hubbou budoucnosti?

Cílem této práce je shrnout poznatky o těchto technologiích a aplikovat je při zhodnocení nově instalovaného systému, tepelné čerpadlo – fotovoltaika – akumulace, ve starším rodinném domě na Vysočině postaveném na začátku minulého století. A na základě hodnot získaných měřením systému navrhnout optimalizaci.

2. Rešerše systému tepelné čerpadlo – fotovoltaický systém – akumulace

2.1. Tepelná čerpadla

Historie

Historie moderních tepelných čerpadel (TČ) se datuje do roku 1852, kdy lord Kelvin (William Thompson) formuloval myšlenku tepelného čerpadla jako “obráceně fungujícího tepelného motoru, kterého je možno použít nejen k chlazení, ale i k ohřívání” [1]. V roce 1857 spatřilo světlo světa první TČ určené pouze k vytápění postavené rakouským inženýrem z Nového Jičína [2] Peterem von Rittingerem o výkonu 14kW.

Dalšími velkými milníky pro nárůst počtu tepelných čerpadel mezi běžnými domácnostmi byly roky 1973 a 1979. Ropné krize v těchto letech podnítily zájem o alternativní zdroje energií. Již v roce 1979 na světě existovalo okolo 800 tisíc TČ, z nichž 90 % připadalo na USA a 6,5 % na Evropu.[3]

V dnešní době jsou TČ rozšířena do všech koutů světa. Co se týká počtu, podle International Energy Agency (IEA) se jen v roce 2022 v Evropě prodalo téměř 3 miliony TČ. Do budoucna se očekává další růst počtů instalovaných TČ. Důkazem může být 50% nárůst prodeje TČ kompatibilních s klasickým radiátorovým a podlahovým vytápěním v roce 2022 oproti minulému roku. Rok 2022 byl také první, kdy se v USA prodalo více TČ než klasických plynových kotlů. [4]

Topný faktor

Topný faktor (TF) je jeden z nejdůležitějších parametrů TČ, jelikož udává poměr mezi vyprodukovaným teplem a spotřebou elektřiny, tedy efektivitu systému. Celosvětově se používá zkratka COP z anglického Coefficient of Performance. [5]

$$\varepsilon = \frac{Q}{E} \quad (1)$$

Kde: ε je hodnota topného faktoru [-]
 Q je vyprodukované teplo [kW]
 $E_{př}$ je příkon TČ [kW]

Platí, že energie na pohon TČ se rovná součtu energií potřebných pro provoz jeho součástí:

$$E_{př} = E_K + E_V + E_{\check{c}} \quad (2)$$

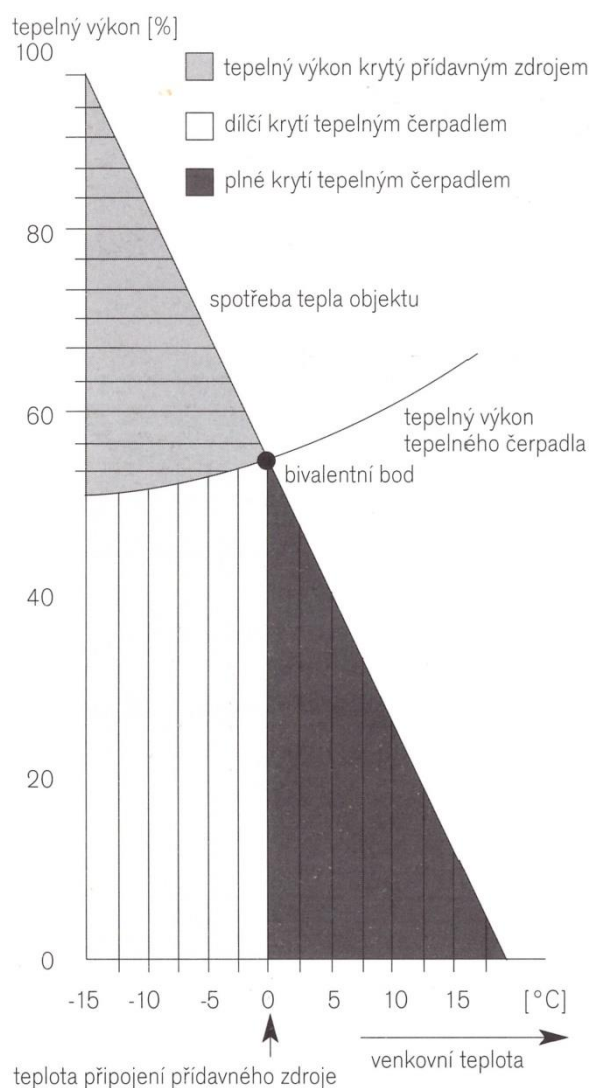
Kde: E_K je elektřina pro pohon kompresoru [kW]
 E_V je elektřina pro pohon ventilátoru [kW]
 $E_{\check{c}}$ je elektřina pro pohon jednotky [kW]

Důležité je dodat, že TF se mění v závislosti na podmínkách provozu TČ (viz. Tab. 1). Pro vyšší TF je ideální co nejmenší rozdíl mezi teplotami ochlazovaného a ohřívajícího média. Z toho vyplývá, že pro porovnání TČ je samostatná hodnota TF nicneříkající bez hodnot podmínek, při kterých byl TF měřen [5]. Proto je vhodnější užívat SCOP (Seasonal Coefficient of Performance), který neměří TF v jeden moment, ale výslednou hodnotu získá z měření v průběhu celé sezóny, podle normy EN 14825 [6].

Střední teplota vstupů/výstupů	Topný faktor	Příkon [kW]	Výkon [kW]
0/35 °C	4,6	1,6	7,3
0/50 °C	3,3	2,1	6,9

Tab. č. 1: Příklad parametrů konkrétního tepelného čerpadla za různých vstupních podmínek [5]

Bod bivalence



Obr. č. 1: Bivalentní chod tepelného čerpadla [5]

Snižování TF s venkovní teplotou implikuje existenci teploty, při které už TČ není schopno získávat dostatek tepla pro komfortní vyhřívání domu nebo ohřev TUV. Tato teplota se nazývá bodem bivalence. [5]

Pokud bychom nikdy nechtěli překročit tento bod, tak by TČ muselo být dimenzováno na maximální výkon. To by bylo značně neekonomické, protože maximálního výkonu se v průběhu topné sezóny nedosáhne tolikrát, aby cena tepla získaného přesáhla cenu za výkonnější TČ. Aby byl pokryt chybějící výkon TČ, do systému se zařazuje tzv. bivalentní zdroj. Tím mohou být například kamna, kotel nebo jakýkoliv jiný zdroj tepla. Některá TČ mají již v sobě zabudovaný elektrický dohřev. [5]

Mnohem větší problém s nedostatkem výkonu mají čerpadla, která ochlazují venkovní vzduch, a to vlivem výrazného kolísání teplot. U čerpadel, která ochlazují půdu nebo podzemní vodu, se bude křivka výkonu přibližovat vodorovné přímce, protože se u těchto zdrojů téměř nemění teplota. [5]

2.1.1. Princip funkce

Chladnička, klimatizace, mrazák, tepelné čerpadlo – všechny tyto stroje fungují na stejném principu. Odebírají teplo vstupnímu médiu a předávají ho výstupnímu. Teoreticky by chladnička s otevřenými dveřmi ven z místnosti a zadní stranou s kondenzátorem umístěnou uvnitř fungovala jako tepelné čerpadlo vzduch – vzduch. [5]

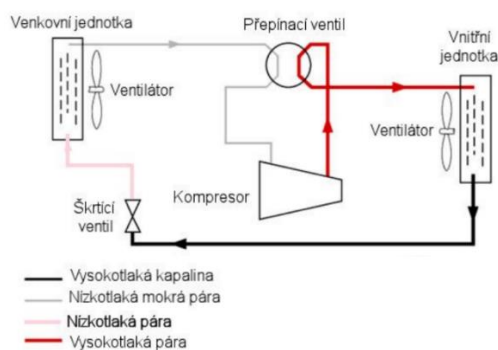
Před vysvětlením samotného principu zrekapitulují základní funkce jednotlivých částí:

Většina TČ má dvě hlavní části – venkovní a vnitřní jednotku. Venkovní jednotka má za úkol odebírat teplo ochlazenému médiu (vzduchu, zemi nebo vodě) a převést ho do teplejšího média. Vnitřní jednotka, jinak nazývaná hydrobox, naopak odebírá teplo teplejšímu médiu a předává ho ohřivanému, tedy nejčastěji vodě nebo vzduchu.

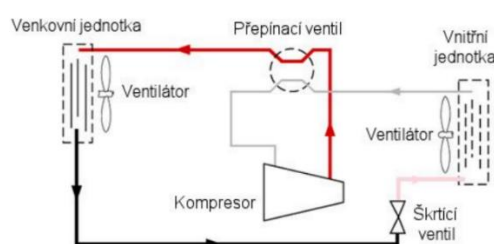
Princip kompresorového čerpadla vzduch – voda v topném módu

Každý typ TČ funguje na mírně odlišném principu, i když hlavní myšlenka zůstává stále stejná. Kompresorové TČ vzduch – voda je pro vysvětlení principu nejideálnější vzhledem ke své rozšířenosti a jednoduchosti na představu.

Pokud má TČ přepínací ventil, může pracovat v topném a chladicím módu. Princip bude vysvětlen na topném módu. [7]



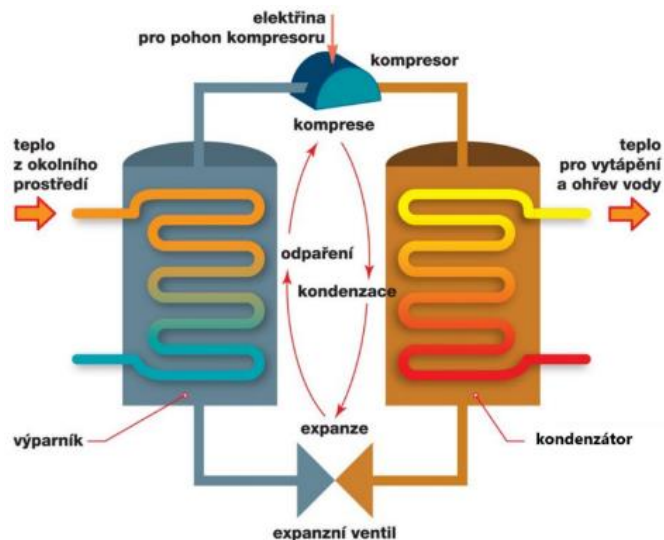
Obr. č. 3: Schéma TČ v topném módu [7]



Obr. č. 2: Schéma TČ v chladicím módu [7]

Princip:

Druhý termodynamický zákon nám říká, že teplo nikdy nepřejde z chladnějšího tělesa na teplejší. To, že např. z venkovního vzduchu o teplotě 0 °C dokážeme ohřát TUV na teplotu 45 °C je možné díky různým teplotním hladinám. Nízkopotenciální teplo venkovního vzduchu můžeme „přečerpat“ pomocí kompresoru díky změně tlaku na vyšší teplotní hladinu. Poté toto teplo můžeme využít k ohřevu. [8]



Obr. č. 4: Schéma TČ [7]

Ve výparníku se chladivo vypaří za nízké teploty a nízkého tlaku. Změna skupenství z kapalného na plynné spotřebuje teplo, které odebere ochlazenému médium (vzduchu). Poté je plynné ochlazené teplonosné médium (dále jen chladivo) stlačeno kompresorem na vyšší tlak. Toto stlačení dodá chladivu další energii ve formě technické práce. Elektřina na pohon kompresoru (a větráku venkovní jednotky) je jedinou energií, kterou v celém cyklu musíme dodat. Následně chladivo v kondenzátoru změní své skupenství zpět na kapalně. Kondenzací par vzniká teplo, které je chladivu pomocí výměníku odebráno ohřevaným médiem (např. TUV). Ochlazené, ale stále stlačené chladivo nakonec expanduje ve škrťicím ventilu (expanzním ventilu) na nižší tlak a cyklus se opakuje. [9]

Hlavní součásti tepelného čerpadla

Kompresor

Existuje mnoho druhů kompresorů pro TČ. Dříve se využívaly pístové a šroubové kompresory [1], kdežto dnes se nejvíce využívá kompresorů typu SCROLL – spirálové kompresory, které dosahují lepších TF [5].



Obr. č. 5: Scroll kompresor [10]

Konstrukci kompresoru typu SCROLL tvoří dvě spirály – pohyblivá a nepohyblivá – vsazené do sebe. Pohyblivá spirála excentrickými pohyby vytvoří prostor mezi spirálami (kapsa), kde je plynné chladivo. Dalšími pohyby se tato kapsa posouvá směrem do středu, kde se nachází výfukový otvor. Čím blíže je kapsa ke středu, tím je její objem menší a tlak větší. Díky konstrukci spirál a vzniku více kapes v průběhu cyklu je sání a výfuk plynů velmi plynulý. [5][11]

Chladiva

Chladiva jsou látky používané k přenosu tepla mezi jednotlivými komponenty TČ. Ideální chladivo by mělo výborné termodynamické vlastnosti jako např. nízký bod varu nebo kondenzace při malém tlaku a bylo by ekologicky nezávadné. Bohužel takové chladivo nebylo dosud vynalezeno. [9]

Na trhu existuje mnoho typů chladiv, nejčastěji založených na bázi uhlovodíků. Dříve používané fluorované uhlovodíky se dnes již nesmí používat kvůli ničení ozónové vrstvy. Byly nahrazeny hydrogenovanými fluorovodíky (HFC), které sice již nemají dopad na ozónovou vrstvu, ale stále mají vysoký potenciál skleníkového efektu (GWP – Global Warming Potencial). [9]

Malým únikům chladiv do atmosféry se nedá zcela zabránit, proto vzniká tlak na výrobce, aby se používala bezfluorová chladiva. Ačkoliv přírodní chladiva jako propan, amoniak nebo CO₂ nevykazují horší účinnost, tak stále nejsou u běžných TČ k vidění. To je zapříčiněno zejména bezpečnostními riziky s nimi spojenými, jako je hořlavost nebo toxicita a následně konstrukce složitějších systémů, která umožňují používat tato chladiva bezpečně. Do budoucna se předpokládá vývoj a nárůst počtu TČ využívajících přírodní chladiva. [12] [13]

Označení	Název	Skupina	GWP
R12	Dichlordifluoridmetan	PFC	6640
R134a	1,1,1,2-Tetrafluoretan	HFC	1300
R410A	Směs různých HFC	HFC	1730
R290	Propan	Bez PFC	3

Tab. č. 2: GWP různých chladiv

Např. velmi efektivní, málo vznětlivé a levné chladivo typu R32 (difluormetan) má stále GWP 677. To značí, že únik jednoho kilogramu R32 je pro globální oteplování stejně drastický jako únik 677 kilogramů CO₂. I přes tento parametr má stále o 32 % nižší hodnotu GWP než dnes velmi užívané chladivo R410A. [14]

Výměníky

Jsou komponenty TČ, kde dochází k předání tepla z ochlazovaného média do chladiva nebo z chladiva do ohříváné kapaliny. V TČ bývají dva – jeden ve venkovní jednotce (výparník) a jeden ve vnitřní jednotce (kondenzátor). Pro každé umístění je vhodnější jiný typ výměníku. [15]

Pro venkovní jednotku (čerpadlo vzduch - voda) se nejčastěji používají trubkové lamelové výměníky. [5]

Pro vnitřní jednotku jsou nejčastěji užívány deskové výměníky pro jejich vysoký přenášený výkon s dobrou účinností a kompaktní rozměry. Deskové výměníky se skládají z mnoha na sebe spájených desek, ve kterých jsou prolisy pro proudění kapaliny a chladiva. [15]

2.1.2. Typy tepelných čerpadel

Dnes se nejčastěji setkáme s elektrickými kompresorovými TČ dále se dělíme podle ochlazovaného média. Krom tohoto typu ale existují i TČ založená na jiných principech (většinou nepotřebují chladiva), nejčastější jsou TČ založená na sorpci. Mimo sorpci jsou ve vývoji systémy používající Stirlingův motor, zvukové vlny nebo vody místo chladiva. [13]

V následujících kapitolách se bude práce věnovat nejpoužívanějším typům TČ, tzn. čerpadlům sorpčním a kompresorovým.

Sorpční tepelná čerpadla

Pro jejich efektivnost při vysokých výkonech se v domácnostech, které takto vysoký výkon nepotřebují, nevyužívají, a to i přes výrazně menší spotřebu elektrické energie, tichý chod, možnosti využití slunečního záření pomocí solárních kolektorů, nebo odpadního tepla. [9]

Sorpční TČ se dělí na absorpční a adsorpční podle mírně odlišného chemického principu. I přes výrazně nižší TF, než mají kompresorová čerpadla, se sorpční čerpadla stále více uplatňují díky využití odpadního tepla, bezúdržbovosti a použití chemikálií, které nezpůsobují skleníkový efekt. [9] [13]

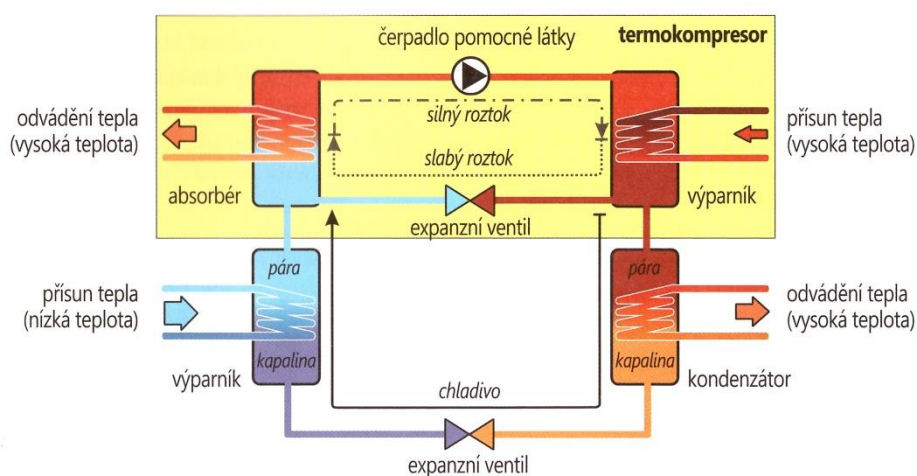
Druh TČ	Použité látky	Topný faktor
Adsorpce	Uhlík-metanol	0.12-1.06
	Zeolit-voda	0.28-1.4
	Silikagel-voda	0.25-0.65
Absorpce	Metanol-voda	0.7-1.1
Kompresorové	Bromid lithný-voda	3-4

Tab. č. 3: Topný faktor různých TČ

Absorpční TČ

Absorpce je chemický proces, při kterém se částice jedné látky (chladiva) pohlcují do celého objemu druhé látky (absorpční kapalina), ale nerozpouštějí se. Plynná forma absorbentu díky vibracím uvolňuje absorpční teplo, které je přibližně 1,5 násobek tepla latentního [16].

V praxi se často používá kombinace amoniaku a vody [9]. Pro volbu látek je důležitá rozdílná teplota varu a intenzita absorpce plynu kapalinou.



Obr. č. 6: Absorpční TČ [7]

Princip absorpčních TČ:

Pomocí spalování plynu nebo jiným zdrojem tepla se ve výparníku termokompresoru vytvoří dostatečná teplota (cca 100 °C), při které vyvře amoniak z vody (děj zvaný desorpce). Páry amoniaku poté putují do kondenzátoru, kde odevzdají teplo ohřivanému médiu a začnou kondenzovat. Poté se pomocí expanzního ventilu sníží tlak amoniaku, který následně ve výparníku přijme teplo z okolního prostředí a vypaří se. Již vypařený amoniak se následně v absorberu znovu absorpčně smíchá s vodou, která byla od amoniaku oddělena ve výparníku termokompresoru. Tato směs putuje do tepelně poháněného výparníku a cyklus se opakuje. [9]

Adsorpční TČ

Adsorpcí se rozumí děj, při kterém se částice (atomy, molekuly) hromadí na mezifázovém rozhraní. Pokud je adsorbentem pevná látka, tak je výhodné, aby měla co největší povrch. Takovou porézní látkou je např. aktivní uhlí nebo zeolity. [17]

Oproti jiným druhům adsorpční TČ vynikají svojí bezúdržbovostí, jelikož neobsahují žádné pohyblivé části ani žádné korozivní absorbenty – absorbenty se navíc musí měnit jednou za 4 až 5 let [18].

Elektrická kompresorová tepelná čerpadla

Dělí se podle chlazeného a ohřivaného média, např. země – voda, vzduch – vzduch. První slovo značí, odkud teplo odebíráme a druhé nám říká, do jakého média teplo přivádíme.

Dělení podle ohřivaného média

Vzduch Výhodou ohřívání vzduchu jsou vyšší topné faktory a možnost doplňkových funkcí jako je odvlhčování, čištění nebo chlazení vzduchu. Konkurencí pro tato čerpadla jsou rekuperační jednotky, které nabízejí podobné funkce. Tato TČ se používají spíše jako doplňkový zdroj tepla. [5]

Voda TČ ohřívající vodu jsou sice výrazně dražší, ale odpadá u nich potřeba dalšího zdroje na ohřívání TUV. Z tohoto důvodu se dále nebudeme zabývat TČ ohřívajícími vzduch. [5]

Dělení dle ochlazovaného média

- **Půda**

Zemský povrch je díky jádru Země stále nepatrně vyhříván. Na povrchu je v ČR průměrná hodnota tepelného toku 62,8 mW/m² [19]. Tento tepelný tok, akumulace sluneční energie [20] a teplo uložené v horninách [21] nám umožňují odebírat teplo z půdy.

Používají se dva způsoby odebírání tepla zemině lišící se umístěním a hloubkou. Hloubkové vrty a půdní kolektory umístěné cca 50 až 150 m pod povrchem a 1,5 až 2 m pod povrchem (půdní). [5]

Aby nedošlo k zamrznutí půdy v okolí vrtu, je třeba vrt správně navrhnout. Autoři Srdečný a Truxa [5] uvádějí, že na 1kW výkonu je potřeba 12-18 m hloubky vrtu. Pokud je nutnost takového výkonu, kdy není reálné provést jeden dostatečně dlouhý vrt, vrtů se udělá více. V takovém případě je potřeba dodržet minimální vzdálenost mezi vrty, aby nedošlo k vzájemnému ovlivnění.

Vrty lze i mírně poddimenzovat v případě, že je teplo odebíráno sezonně, a vrt se může ve zbylém čase zregenerovat. Existuje také možnost teplo do vrtu dodávat, například při chlazení objektu v létě může odebrané teplo ohřívat vrt a tím akumulovat energii. [22]

Půdní kolektory natažené vedle vyhřívaného objektu jsou levnější, ale mají kolísavý TF, jelikož je teplota půdy pod povrchem ovlivňována venkovní teplotou na rozdíl od hloubkových vrtů, které jsou dostatečně hluboko, aby dosáhly celoročně stálé teploty. [5]

- **Voda**

Teplo lze získávat buď z podzemní, nebo z povrchové vody. Povrchové vody se téměř nevyužívá z důvodu znečištěnosti a častému zamrznání. Ideální by bylo odebírat teplo trvale tekoucí povrchové vodě. Tato možnost se však vzhledem k legislativě a požadavkům na umístění velmi málo využívá. [5]

Naopak využití nízkopotencionálního tepla spodní vody je velmi efektivní. Ze sací studny se přečerpává voda do TČ, kde je jí odebráno teplo, a následně je přečerpána do vsakovací studny, odkud se voda vrací zpět do podloží. Omezením pro využití spodní vody je potřebný průtok alespoň 180 l/hod na 1 kW výkonu TČ [23].

Spodní voda má v průběhu roku téměř konstantní teplotu 8 až 12 °C [24]. V některých oblastech, např. Karlovarsko, dosahuje teplota spodní vody díky termálním pramenům až 20 °C [5]. Výhodou tohoto typu TČ je nejvyšší a stálý TF při nejnižších nákladech [5].

- **Vzduch**

Nejčastějším druhem TČ jsou čerpadla odebírající energii vzduchu díky své efektivnosti a nízkým investičním nákladům. [5][25]

Ochlazovat můžeme jak venkovní vzduch, tak i vnitřní vzduch domu. Vnitřní vzduch lze pro chod TČ použít pouze tehdy, když je dům vybaven nuceným větráním. Avšak takové domy častěji mívají rekuperační jednotky, které jsou velkou konkurencí TČ. Existují i hybridní stroje mezi TČ a rekuperační jednotkou, které kombinují jejich výhody. [5]

Nejčastěji se jako ochlazované médium používá venkovní vzduch. Tyto jednotky se obvykle skládají z venkovní a vnitřní jednotky (tzv. split verze). Venkovní jednotka je vybavena ventilátorem, který zajišťuje průtok vzduchu kolem výměníku o hodnotě cca 650 až 850 m³/hod [26]. Existují i jednotky, které nemají oddělené části (tzv. monobloc) a jsou celé umístěny uvnitř nebo vně objektu, což zajišťuje snadnější instalaci. Vzduch je k vnitřním jednotkám přiváděn zvenku pomocí potrubí a otvorů ve stěně, což je energeticky náročnější než u TČ typu split. [27][5]

Nevýhodou TČ beroucích si teplo ze vzduchu je nestálost venkovní teploty, která má velké výkyvy během roku, měsíce i dne. V zimě, kdy je potřeba nejvíce tepla, pracuje jednotka v důsledku nejnižších venkovních teplot z celého roku s nejnižším TF. Energie obsažená ve vzduchu je navíc silně závislá na jeho vlhkosti a její množství není přímo úměrné teplotě vzduchu. [5]

Dále je potřeba dobře určit umístění venkovní jednotky s ohledem na hlukovou zátěž, kterou produkuje, a kondenzaci vody. Čím více tepla musí venkovní jednotka odebrat, tím rychleji se musí točit ventilátor vytvářející hluk, který je zvláště slyšitelný v noci při nízkých teplotách. Hladina hlukové zátěže tepelného čerpadla je omezena zákony a normami. Dále je nutné venkovní jednotku umístit na takové místo, aby mohl kondenzát volně odtékat a například v zimě zkondenzovaná voda nezamrzala na používaných cestách. To se nejčastěji řeší drenážním systémem vykopaným do nezamrzné hloubky. [28]

Pro případ velmi nízkých teplot, kdy kondenzovaná voda přimrzá na výměníku, jsou jednotky vybaveny odmrazovacím režimem, při kterém čerpadlo na chvíli přepne do chladicího módu a venkovní výměník se zahřeje natolik, aby rozmrznul a voda mohla odtéci. [29]

Plynová kompresorová tepelná čerpadla

Tato čerpadla fungují na stejném principu jako elektricky poháněná čerpadla. Jediný rozdíl je v pohonu kompresoru, kde se používá spalování namísto elektrické energie. Označují se jako GHP čerpadla z anglického Gas Heat Pump.

Výhodou je vyšší účinnost vůči primárnímu palivu, které se spaluje přímo u čerpadla, a energie je přes spojku převáděna přímo na kompresor s celkovou účinností až 40 %. Primární palivo tedy není spalováno v elektrárnách a energie je následně dodávána přes rozvodnou síť s účinností cca 29 %. Navíc je zde možnost využití odpadního tepla motoru. Díky tomu mají plynová čerpadla vyšší TF. Vzhledem k větší složitosti systému, obtížnější obsluze a vhodnosti pro větší výkony se GHP využívají ve větších a energeticky náročnějších objektech, kde se využívá i chlazení pomocí tepelného čerpadla. [30]

2.2. Fotovoltaické systémy

Historie

Poprvé byl fotoefekt pozorován v roce 1839 devatenáctiletým Francouzem Alexandrem Edmondem Becquerelem při pokusech s platinovými elektrodami v nádobě s průlinčitou stěnou a elektrolytem, kdy při zakrytí nádoby galvanometr připojený na elektrody nezaznamenával napětí, ale při odkrytí ano. Světlo totiž začalo pomocí fotovoltaického efektu vytvářet napětí. [31]

V roce 1883 Američan C.E. Fritts vytvořil první selenové články [32]. Poprvé fotoefekt detailně popsal Albert Einstein roku 1905 ve své práci¹, za kterou v roce 1921 dostal Nobelovu cenu. Komerčního využití a většího vývoje se fotovoltaika dočkala až v 60. letech minulého století s nástupem kosmonautiky a využitím křemíku.

Dnes je fotovoltaika (FV) rozšířená po celém světě a stává se běžným způsobem výroby elektřiny. Rekordním rokem pro nárůst fotovoltaiky byl rok 2022 kdy globální výroba elektřiny fotovoltaikou narostla o 26 % (o 270 TWh) a celková elektřina generovaná fotovoltaikou dosáhla 1300 TWh. [33]

Tato čísla, podle IEA [33] odpovídají míře, kterou musí fotovoltaika růst, aby bylo možné dosáhnout uhlíkové neutrality do roku 2050 (Net Zero Emissions by 2050 Scenario – do ovzduší je vypuštěno stejné množství skleníkových plynů, jako je z ní odstraňováno).

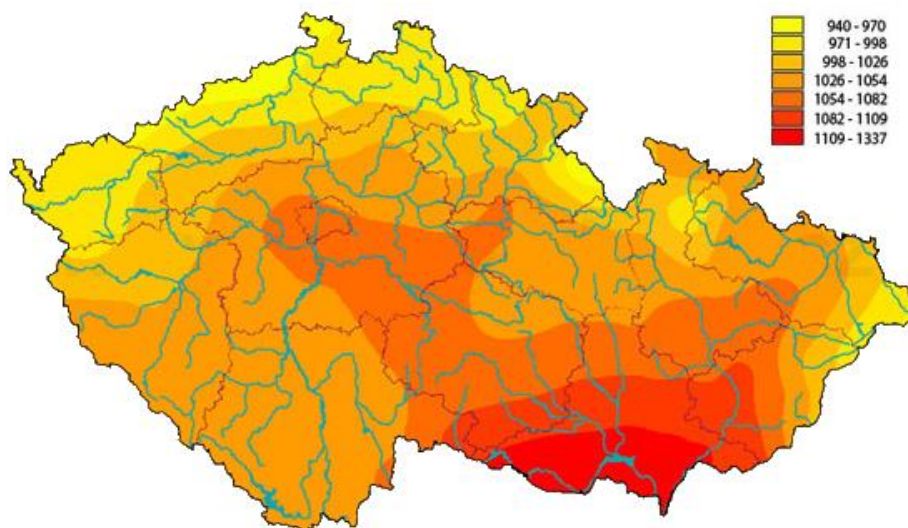
Sluneční energie

Každou sekundu Slunce ve svém jádře k fúzní reakci použije okolo 620 milionů tun vodíku [34] a z toho se zhruba 4 miliony tun hmoty přemění na energii, kterou Slunce pomocí fotonů vyzáří. Na povrch atmosféry Země díky tomu dopadá průměrně 1367 W/m² [35].

Při průchodu atmosférou se sluneční záření rozptyluje, odráží a pohlcuje v molekulách vzduchu. Tímto se výkon slunečního záření sníží na tzv. špičkový výkon (okolo poledne) na 1000 W/m². Tato hodnota se používá jako referenční hodnota pro výpočty. [35]

¹ On a Heuristic Viewpoint Concerning the Production and Transformation of Light

Dále je důležitá hodnota celkového ozáření. Tato hodnota závisí na počtu slunečních dní v roce a velmi se mění v závislosti na místě, kde je měřena. Pro Českou republiku je hodnota celkového ozáření 950 až 1340 kWh/m². Např. pro pouštní oblasti může nabývat téměř dvojnásobných hodnot. [35]



Obr. č. 7: Průměrné hodnoty ročního svitu v ČR v kWh/m² [35]

Intenzita ozáření je také závislá na hodnotě AM (Air Mass), která udává snížení intenzity záření v závislosti na množství vzduchu, kterým musí sluneční záření projít. Je-li Slunce kolmo vůči místu na Zemi, kde je panel, je hodnota AM = 1, jelikož záření urazí nejkratší možnou vzdálenost atmosférou, aby dosáhlo panelu. Jakmile je ale Slunce na obloze níž, tak hodnota vzrůstá, protože záření musí urazit delší vzdálenost skrze atmosféru. Mimo atmosféru je hodnota AM nulová. [36]

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (3)$$

Kde: θ_z je úhel mezi imaginární osou spojující měřené místo na Zemi se Sluncem a imaginární osou kolmou na zemský povrch [°]

Kromě fotovoltaiky se sluneční energie používá mnoha jinými způsoby. Například solární kolektory přeměňují sluneční záření v tepelnou energii ohřátím teplosměnného média [37].

Sluneční záření je samo o sobě největším zdrojem energie na Zemi a více než 99 % energie, kterou využíváme, je ze Slunce. Energetická bilance většinou počítá jen s energií spotřebovanou pomocí zařízení. Díky Slunci ale nemusíme například ve dne svítit nebo neustále topit. [9]

2.2.1. Fotoelektrický jev, princip funkce, účinnost a výkon

Fotoelektrický jev

Základním principem, který stojí za funkcí fotovoltaických článků, je fotoelektrický jev, při kterém dochází k absorpci energie fotonu elektronem, díky čemuž je vyražen ze svého původního místa. Takto uvolněnému elektronu se říká fotoelektron². [38]

Energie uvolněného elektronu se nejdříve snažila popsat klasická fyzika. Ta říká, že s vyšší frekvencí vlnění bude uvolněno více fotoelektronů v důsledku většího množství srážek. A dále také, že amplituda světelného vlnění bude mít vliv na kinetickou energii fotoelektronů. [39]

² Název značí pouze způsob uvolnění elektronu - jinak elektron nemá žádné zvláštní specifika

Při experimentech ale pozorovali opak:

- S rostoucí amplitudou světelného vlnění roste proud
- S rostoucí frekvencí se zvyšuje kinetická energie fotoelektronů

Toto chování fotoelektrického jevu vysvětlil až Albert Einstein ve své práci z roku 1905, kdy přišel s myšlenkou světla jako částicí elektromagnetické energie – fotonu, jejíž energie je závislá na frekvenci. Energii fotonu lze podle Einsteina vypočítat jako [39]

$$E_f = h \cdot \nu \quad (4)$$

Kde: E_f je energie fotonu [J]

h je Planckova konstanta [J·s]

ν je frekvence fotonu [Hz]

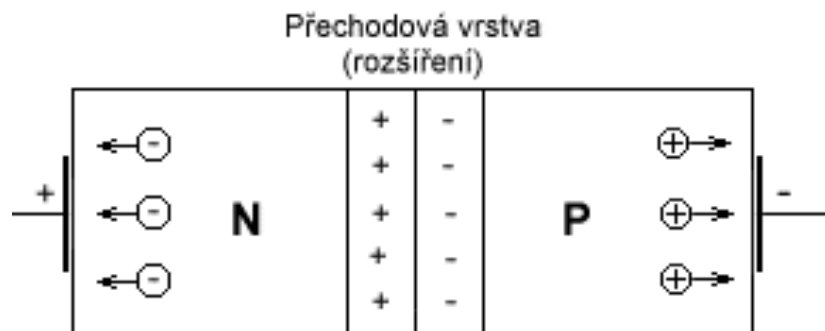
Elektron ze svého původního místa dokážou vyrazit pouze fotony s dostatečnou energií. Minimální frekvence, která zaručí tuto potřebnou energii, se také nazývá mezní frekvencí. Hodnota této frekvence je pro každý materiál jiná. [39]

Např. pro křemík je dostatečná energie pro vyražení elektronu z valenční vrstvy do vodivostního pásma 1.1 eV [40]. Frekvenci, které foton musí dosáhnout pro tuto energii, odpovídá vlnová délka 1127 nm. Všechny větší vlnové délky tedy mezní frekvence nedosáhnou (delší vlnová délka znamená menší frekvenci). Kratší vlnové délky mají dostatek energie na vyražení elektronu. Energie, která přebývá po srážce, se přemění na teplo.

Princip [35]

Základem solárního článku je PN přechod, který se vytvoří na rozhraní mezi kladně dotovaným křemíkem typu p a záporně dotovaným křemíkem typu n.

- V křemíku typu p se kromě atomů křemíku vyskytuje přesně daný počet atomů příměsi – atomů boru. Atomy boru mají 3 valenční elektrony, což je o jeden méně než v atomech křemíku. Vzniká tak tzv. kladně dotovaný křemík typu p (p jako positive)
- Křemík typu n je dotovaný atomy fosforu, které mají 5 valenčních elektronů, a tudíž vzniká záporně nabitý křemík typu n (n jako negative)



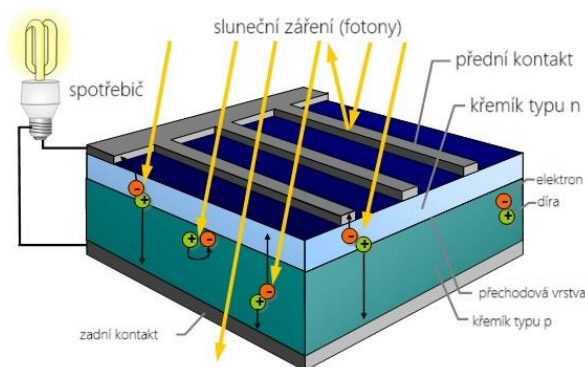
Obr. č. 8: PN přechod [41]

Vrstvy p a n jsou položeny na sebe a na jejich přechodu elektrony z polovodiče typu n pomocí difuze zaplní díry v polovodiči typu p. Takto vzniká tzv. přechodová vrstva. V n oblasti přechodové vrstvy zbydou kladně nabitě atomy dotujícího prvku a v oblasti p zase záporné. V přechodové vrstvě takto vznikne elektrické pole, které je orientováno proti směru pohybu nosičů náboje a zajistí ukončení difuze, která již dále nepokračuje.

Jakmile foton s dostatečnou energií projde skrze n vrstvu a uvolní elektron v pn přechodu pomocí fotoelektrického jevu, záporně nabitý elektron se začne pohybovat ke kladné části přechodové vrstvy a poté dále stejným směrem až na vnější okraj n vrstvy. Na něm tedy vznikne záporný náboj. Kladně nabitá díra v přechodové vrstvě po uvolněním elektronu je ihned zaplněna elektronem z p vrstvy, na jehož původním místě opět vzniká díra. Tento proces se opakuje, dokud díra nedorazí k vnějšímu okraji p vrstvy, kde vzniká kladný náboj. Mezi těmito vrstvami lze měřit elektrické napětí o velikosti cca 0,5 V.

Jakmile jsou tyto dvě vnější vrstvy spojeny pomocí elektrod v obvod, elektrony z n vrstvy prochází díky vzniklému elektrickému poli přes obvod do p vrstvy. S dopadem dalších fotonů se cyklus opakuje.

Avšak některé elektrony nedosáhnou kontaktů a rekombinují – tzn. sváže se volný elektron s dírou ve valenčním orbitalu atomu. Takovéto elektrony se na proudy nepodílí. [35]



Obr. č. 9: Struktura a fungování fotovoltaického článku [9]

Stavba fotovoltaického článku a modulu

Standartní fotovoltaický článek má dnes tvar čtverce o délce hrany 6 palců. Jelikož velikost článku ovlivní velikost proudu, nikoliv napětí, jednotlivé články se zapojují sériově za sebe do tzv. fotovoltaického modulu spojením předního kontaktu se zadním kontaktem dalšího článku. Tím se získá vyšší napětí, které má praktické využití. Obvykle se do jednoho modulu zapojí 36, 48, 54 nebo 72 článků, které jsou poté zality etylen-vinyl-acetátem (EVA) pro ochranu před vnějšími vlivy. Poslední vrstvou článku je přední antireflexní sklo, které je vysoce propustné pro světlo díky nízkému obsahu oxidu železa. [35]

Účinnost

Účinnost fotovoltaického panelu říká, kolik získáme elektrické energie z energie slunečního záření dopadajícího na článek. [9]

$$\eta = \frac{P_{MAX}}{\phi} \cdot 100 = \frac{U_{MAX} \cdot I_{MAX}}{e \cdot A} \cdot 100 \quad (5)$$

Kde: η je účinnost fotovoltaického panelu [%]

P_{MAX} je maximální výstupní elektrický výkon [W]

ϕ je vstupní energie slunečního záření [W]

U_{MAX} je maximální napětí [V]

I_{MAX} je maximální proud [A]

e je hodnota sluneční záření [W/m^2]

A je plocha článku [m^2]

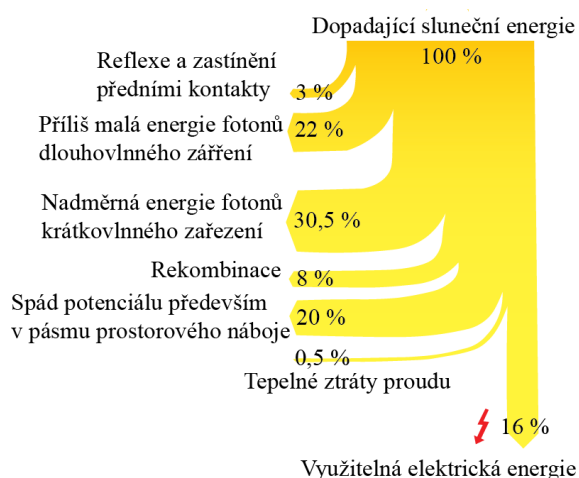
Nejlepší účinnosti dosáhli výzkumníci z německého Fraunhoferova institutu s FV článkem používajícím více pn přechodů pro lepší využití energie všech vlnových délek, a to 47,6 % [42].

V roce 1961 Walter Shockley a Hans Queisser publikovali model, který určuje maximální účinnost článku v závislosti na solárním spektru a materiálu. Takto byla určena maximální teoretická účinnost pro monokrystalické křemíkové články cca 33 %. [43]

Účinnost komerčních FV panelů se běžně pohybuje mezi 15 až 20 % a nadále se snižuje v závislosti na okolních podmínkách. Jednotlivé způsoby ztrát jsou popsány v následujících kapitolách. [35]

- **Ztráty v panelu**

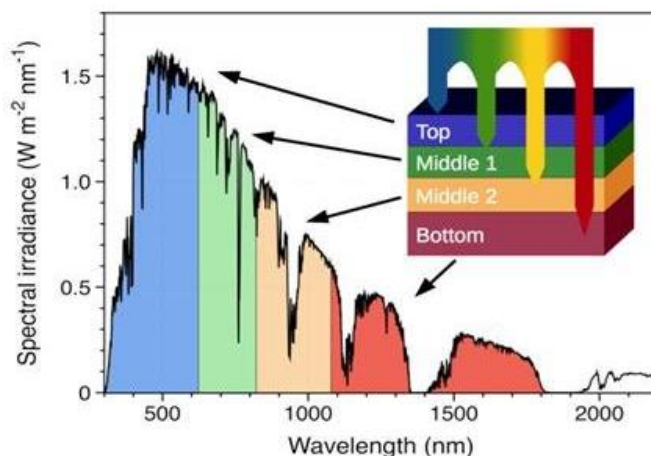
Jsou to jediné nevyhnutelné ztráty, jelikož souvisí s konstrukcí panelu a použitými materiály. Zákazník tedy po koupi daného solárního panelu už tyto ztráty nijak neomezí.



Obr. č. 10: Tok energie v solárním článku [35]

Každý článek má poměry ztrát jinak rozložené. Existují např. články, které nemají ztráty způsobené zastíněním předními kontakty. Takové články mají přední kontakty vyvedeny pomocí kanálků ve článku na zadní stranu. [35]

Největší ztráty jsou způsobeny příliš malou či příliš velkou energií fotonů, která se buď nevyužije vůbec, nebo se přemění na teplo, které dále snižuje účinnost. Řešením je využití více pn přechodů různých materiálů, kdy je každý dílčí článek optimalizován pro jinou vlnovou délku, čímž dokáže efektivně využívat celé světelné spektrum. [44]



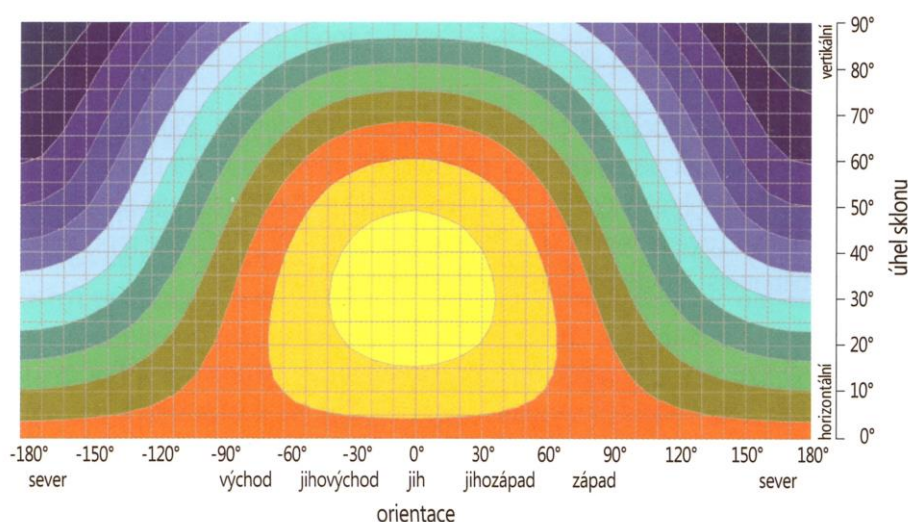
Obr. č. 11: Vícevrstvý FV článek [45]

- **Ztráty v závislosti na orientaci a umístění**

Tyto ztráty lze velmi dobře snížit již při projektování fotovoltaického systému.

Solární panely je nutné instalovat v dobře osvětlených a nezastíněných plochách, tedy nejčastěji na střechách. Pokud je na ploše více řad panelů, je nutné si dávat pozor na zastínění ostatními panely při poklesu slunce a prodloužení stínů. [35]

Největší výkon panel dodává při kolmém dopadu slunečního záření na jednotlivé články. Toho se v průběhu celého dne dá dosáhnout pouze natáčením panelu. To se ale nevyplatí s ohledem na cenu a možné poruchy systému, které natáčení umožní. Proto je důležité panely orientovat a naklonit tak, aby při fixním usazení dodávaly co největší výkon v průběhu dne i roku. Pro optimální orientaci panelu existují kalkulačky i mapy, které nám v procentech uvádí ozáření panelu. Pro Českou republiku je ideální sklon 30 až 35° a orientace na jih. Z obr. X je vidět, že je lepší panel umístit horizontálně než vertikálně. Podle Quashninga [9] jsou údaje v obr. X vytvořené pro Berlín téměř identické s údaji pro východní Čechy a severní Moravu. [35]



Obr. č. 12: Sluneční záření v závislosti na orientaci a sklonu v Berlíně [9]

- **Ztráty způsobené zastíněním**

Je logické, že FV panely je nutné umístit tak, aby nebyly zastíněny. Stíny snižují množství dopadajícího záření na panely, kterým se tak snižuje výkon.

Dokonce i malé stíny mohou způsobit velké ztráty. To je způsobeno tím, že celý modul dodává takový proud jako nejméně osvětlený článek. Je-li celý panel osvětlený až na jeden článek, tak nejenže má modul velmi nízkou účinnost, ale navíc veškerý proud z panelu prochází zastíněným článkem, kde se mění v teplo, které může být dostatečné na zničení panelu. [35]

Aby tyto tzv. Hot Spots (horká místa) nevznikaly, do panelů se umísťují obtokové diody, každá pro několik článků. Ty vedou proud mimo skupinu článků, z nichž je jeden nebo více zastíněných. Panelu se tak pouze sníží výkon o výkon odpojených článků a neomezí se proud v celém sériovém zapojení. [35]

Díky znalosti uspořádání obtokových diod můžeme snížit ztráty i u panelů, u kterých víme, že budou pravděpodobně zastíněny. Panely lze např. uspořádat tak, aby stín zasáhl naráz všechny články, které lze přemostit jednou obtokovou diodou. Při špatném umístění by mohl stín zasáhnout např. jeden článek u každé obtokové diody. Tím by byl celý panel odstaven od provozu. [35]

- **Ztráty vlivem počasí a teploty**

Prach, sníh, vítr, vlhkost i teplota mají velký vliv na účinnost FV panelů. U prvních dvou je důvod zřejmý – zastínění. Pro zlepšení účinnosti stačí z panelů nečistoty a sníh šetrně odstranit tak, aby nedošlo k poškrábání skla, čímž by došlo k větší odrazivosti světla od panelů. [46]

Vítr má dobrý vliv na výkon fotovoltaických panelů, se silnějším větrem se totiž panel lépe a rychleji ochlazuje [47]. Vlhkost ovzduší má na účinnost negativní vliv, protože s vyšší vlhkostí je v atmosféře více vody, která pohlcuje a odráží sluneční záření. Nad panely se může také vytvářet tenká vrstva páry, jejíž účinek je stejný [48]. Efekty jednotlivých složek počasí na výkon FV panelů jsou provázány a nelze určit vliv jedné složky bez ohledu na ostatní [46].

Teplota

Velký vliv na účinnost FV článků má také teplota. Podle Haselhubna [35] na každý přibývajícím stupě Celsia připadá snížení účinnosti v průměru o -0,4 až -0,5 %. Při zimních dnech se tedy napětí zvyšuje a může se dostat až na 1,2násobek jmenovité hodnoty měřené při standardních podmínkách (STC) – 25 °C. I přesto v létě díky většímu slunečnímu záření dodávají panely téměř o 80 % více energie.

Přestože se zvýšením teploty může mírně narůst proud protékající článkem, je tento nárůst mizivý oproti poklesu napětí ve článku. Tudíž se celkový výkon článku sníží [49]. Např. panely zmíněné v praktické části této práce mají teplotní koeficient pro napětí -0,272 %/°C a teplotní koeficient pro proud 0,044 %/°C.

Zjednodušený výpočet pro zjištění účinnosti krystalických křemíkových článků vypadá takto: [49]

$$\eta_C = \eta_{REF} \cdot [1 - \beta_{REF} \cdot (t_C - t_{STC})] \quad (6)$$

kde lze vypočítat β_{REF} jako

$$\beta_{REF} = \frac{1}{t_0 - t_{STC}} \quad (7)$$

Kde:	η_C	je účinnost při nové teplotě článku	[%]
	η_{REF}	je účinnost naměřená při STC podmínkách	[%]
	β_{REF}	je teplotní koeficient závislý na materiálu	[1/°C]
	t_C	je teplota FV článku	[°C]
	t_{STC}	je STC teplota	[°C]
	$t_{\eta=0}$	je teplota při které je účinnost článku rovna nule ³	[°C]

³ Pro křemík 270 °C

Elektrický výkon

Základní veličinou, která hraje roli ve výběru FV modulů, je maximální výkon označovaný jako P_{MAX} , P_{MPP} (MPP – Maximum Power Point) nebo W_P (Watt peak). Tím je výkon, který dodává článek v laboratorních podmínkách STC podle normy ČSN EN IEC 61215:

- Ozáření $e = 1000 \text{ W/m}^2$
- Teplota $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$
- Air Mass $AM = 1.5$

V realitě je výkon téměř vždy menší než v laboratorních podmínkách v důsledku ztrát způsobeným vnějšími vlivy popsanými dříve.

Dále je dobré dodat, že výkon panelu je vždy menší než výkon článku. To je způsobeno krycím sklem, které nemá 100% propustnost, a rámem, který drží jednotlivé články pospolu. Obecně lze říci, že na 1 kW výkonu je potřeba okolo 10 m² panelů. [35]

Fotovoltaický výkon se vypočte jako součin proudu a napětí protékající fotovoltaikou [9]

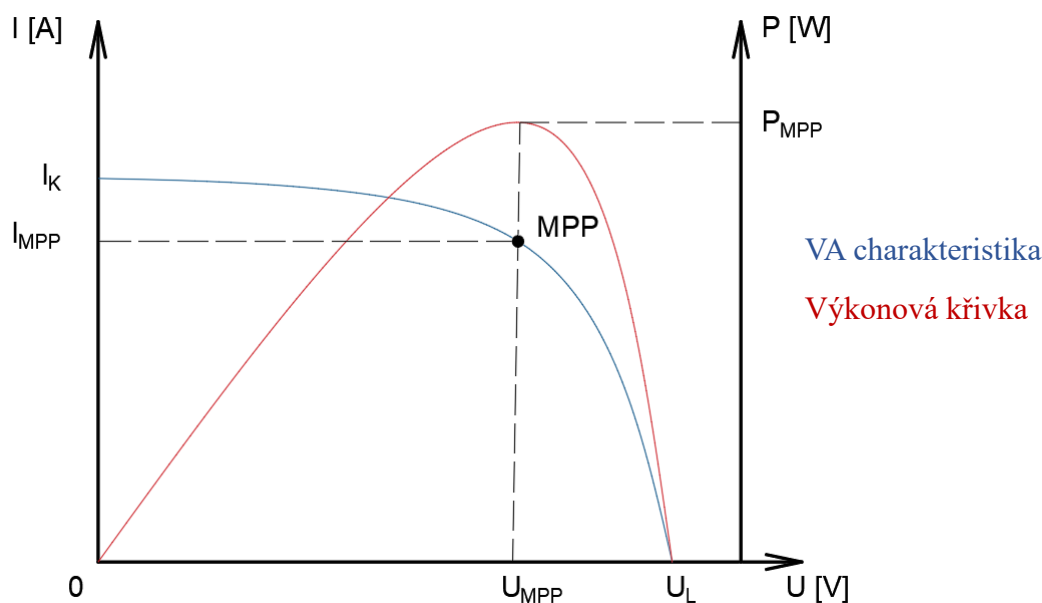
$$P = U \cdot I \quad (8)$$

Kde: P je výkon fotovoltaického panelu [W]

U je napětí [V]

I je proud [A]

Hodnotě maximálního výkonu tedy musí náležet určité hodnoty napětí a proudu. Ty se značí U_{MPP} a I_{MPP} . Jejich hodnoty lze získat z charakteristiky proud-napětí. Tyto hodnoty odpovídají hodnotám největšího obdélníku, jehož levý spodní roh je v nule a horní vrchní roh leží na charakteristické křivce. [9]



Obr. č. 13: VA charakteristika a výkonová křivka

Proud protékající panelem je závislý na množství sluneční energie, které na něj dopadá. Sníží-li se sluneční záření na třetinu, pak poklesne i výkon na třetinu. Napětí odpovídajícího MPP se dosáhne, je-li k fotovoltaice připojen měnič, který nastaví napětí na hodnotu co nejbližší MPP. [9]

2.2.2. Typy panelů

Ač téměř všechny typy článků pracují na podobném principu, rozdíly v materiálech, výrobě a technologii dělají z každého typu článku jedinečnou součástku vhodnou pro různá uplatnění. Pro koncového zákazníka jsou důležité dva parametry: cena a maximální výkon (úzce spjatý s účinností článku a panelu) FV modulu.

V dnešní době jsou na trhu tři hlavní druhy článků. Články používající monokrystalický a polykrystalický křemík a tenkovrstvé články. Každý z těchto druhů se může dále dělit podle způsobu výroby, použitých materiálů a technologie. Jelikož cílem této práce není popsat veškeré typy článků, které trh nabízí, v následujících kapitolách budou popsány jen ty nejrozšířenější a nejzajímavější typy FV článků. [35]

Pro lepší pochopení typů článků je lze seřadit do jednotlivých generací tak, jak byly postupně vyvíjeny [50]:

1. generace – články z monokrystalického a polykrystalického křemíku
2. generace – tenkovrstvé články
3. generace – organické články, články s více přechody, články využívající kvantových teček a další
4. generace – články využívající nanočástice

Informace následujících kapitol jsou čerpány z [44]

Monokrystalické články

Účinnost: 15 až 24 %

Dnes nejrozšířenější typ FV článku vyrobený z jediného krystalu křemíku. Lze jej jednoduše poznat podle homogenní tmavomodré až černé barvy.

Za masovou rozšířeností tohoto typu stojí dlouhá historie, relativně vysoká účinnost a dlouhá životnost. Nevýhodami těchto článků je vysoká cena, teplotní citlivost a vysoké ztráty při výrobě.

Výroba monokrystalických článků je vysoce tepelně a tedy i finančně náročná. Základním stavebním kamenem je velmi čistý křemík (99,99 % čistota), který se získává z křemenného písku nebo z odpadního křemíku v elektronice. Takto získaný křemík se zpracovává tzv. Czochralského metodou. Ta spočívá v ponoření krystalu křemíku do válcové nádoby s roztaveným křemíkem a dopanty a následném vytahování krystalu za pomalého otáčení nádoby. Roztavený křemík při tomto procesu začne tuhnout a získává krystalickou strukturu ponořeného krystalu. Takto vytažený válcový monokrystal křemíku se dále řeže na požadovaný profil článků, čímž je nejčastěji čtverec. Poté se řeže na plátky tzv. wafery. Ty mají tloušťku okolo 0,4 mm. [35]

Velkou nevýhodou tohoto procesu je vysoké procento odpadního materiálu. Někteří výrobci tento problém řeší změnou tvaru článku ze čtverce na šestiúhelník, který má větší využitelnost plochy z kruhu. Pro získání více waferů z jednoho krystalu se výrobci snaží řezat co nejtenčí plátky.

Jelikož fyzikální hranice účinnosti monokrystalických článků, tzv. Shockleyův-Queisserův limit, je okolo 30 % [51], výrobci se pokouší o zavedení nových metod pro zvýšení účinnosti.

Jsou jimi například:

- **PERC články**

Tyto články využívají přídavnou vrstvu pod p vrstvou, která odráží světlo prošlé pn přechodem zpět. Tím se zabráňuje rekombinaci a ohřevu způsobeným dlouhovlnným zářením.

- **HIT články**

Jedná se o monokrystalické články s přídavnými vrstvami amorfního křemíku.



Obr. č. 14: Panel z monokrystalického (vlevo) a polykrystalického křemíku [52]

Polykrystalické články

Účinnost: 10 až 18 %

Dnes na trhu druhý nejrozšířenější typ článků/modulů, který je levnější, ale méně efektivní a s kratší životností⁴ než monokrystalický typ. Lze jej poznat podle třpytící se krystalické struktury.

Nejběžnější proces výroby spočívá v tuhnutí směsi křemíku a dopovacích prvků v grafitovém kelímku. Přičemž vzniká mnoho zárodků, které následně nukleují. Rozdílná krystalografická orientace každého zárodka vytvoří po nařezání třpytící se efekt. Po ztuhnutí je křemík zpracováván stejným způsobem jako monokrystalický křemík.

Existují i efektivnější výrobní metody, např. metoda string ribbon spočívající v tažení pásu postupně tuhajícího křemíku. [35]

Tenkvrstvé články

Účinnost: 5 až 7 %

Třetí nejrozšířenější typ článků, který, mimo velké panely, můžeme najít i v kalkulačkách a jiné elektronice, má i přes výrazně nižší účinnost a životnost, řadu výhod, které jej pro určité aplikace dělají výhodnější alternativou než krystalické články. Od krystalických článků jej dělí odlišná, většinou amorfní, struktura a časté použití jiných materiálů, než je křemík.

Jednou z výhod tenkovrstvých modulů je např. lepší teplotní koeficient, který roste s klesajícím ozářením. Díky tomu mohou tenkovrstvé články vykazovat vyšší účinnost než při STC podmínkách [35]. Mezi další výhody patří možnost nanášení na různé materiály. Nanesení na sklo umožňuje použití článků jako stínícího elementu v oknech budov, kdežto nanesení na umělou hmotu umožní moduly ohýbat.

⁴ Životnost solárního článku je určena mírou degradace, tzn. ztrátou výkonu (průměrně cca. 0,5 % za rok). U polykrystalických článků je udávána životnost 20 až 35 let.

Další nevýhodou je stárnutí vyvolané světlem v prvním roce snižující účinnost článku. Z tohoto důvodu jsou nové články dodávány s výkonem vyšším o 15 % než je jmenovitý výkon P_{MAX} . [35]

Materiály tenkovrstvých článků:

- Amorfni křemík

Amorfni křemík je nejběžnější materiál tenkovrstvých článků vyvinutý v roce 1974 [35], při jehož výrobě se spotřebuje zlomek materiálu oproti výrobě krystalických článků. Velkou výhodou tohoto typu je schopnost využití difuzního (rozptýleného záření). Tato vlastnost dělá z amorfniho křemíku vhodnější alternativu oproti použití monokrystalického křemíku v oblastech s nižším zastoupením přímého záření.

Výroba spočívá v nanášení křemíku v plynné podobě na základový materiál. Oproti ostatním typům článků musí mít amorfni křemík jednu vrstvu navíc. Mezi p a n vrstvu se vkládá tzv. intrinická (nedotovaná) vrstva. V té se odehrává fotoefekt a vrstvy p a n pouze oddělují náboje. Pokud by na sebe p a n vrstvy přiléhaly, náboje by s ohledem na jejich malou tloušťku ihned rekombinovaly. [35]

- Telurid kademnatý
- Dvojselenid mědi-india

Další články

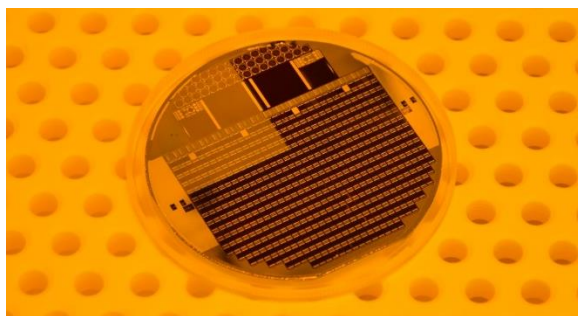
Jsou jimi zvláště články 3. generace, které slibují levnější výrobu a pravděpodobné masové rozšíření v budoucnosti. Většinou jsou založeny na jiném fyzikálním principu, který umožňuje výrobu elektřiny.

Články s více přechody

Účinnost: 36 % a více

Články využívající více pn přechodů jsou v dnešní době ty neúčinnější. Každý pn přechod je tvořen z jiných materiálů, schopných zachytit jinou část slunečního spektra. Podle množství přechodů se odvíjí maximální účinnost.

Nejúčinnější článek zatím vytvořili vědci z německého Fraunhoferova institutu v rámci projektu „50 Percent“, ve kterém se snaží dosáhnout 50% účinnosti. Díky čtyřem pn přechodům a vylepšené antireflektivní vrstvě se jim zatím podařilo získat účinnost 47,6 % při 665 sluncích⁵ [53].



Obr. č. 15: Nejúčinnější fotovoltaický článek [53]

⁵ Hodnota počtu slunců udává, kolikrát silnější záření na článek dopadá oproti běžnému slunečnímu záření. Tedy hodnota 1 slunce je rovná běžnému záření ze Slunce, které dopadá na Zemský povrch (při hodnotě AM=1,5)

Organické články

Účinnost: 9 až 11 %

Využití organických materiálů k výrobě fotovoltaiky může v budoucnosti hrát klíčovou roli, pokud překoná výzvu v podobě nižší účinnosti. Zásadní roli hraje velmi nízká cena materiálu a nízká energetická náročnost výroby článků (oproti anorganickým materiálům, kde je potřeba vysoká chemická čistota křemíku). Mezi další výhody patří flexibilita článků a schopnost využití širšího spektra slunečního záření.

2.2.3. Střídač

Jednou z nejdůležitějších součástí FV systému je střídač, jehož hlavní činností je převod stejnosměrného proudu vyrobeného solárním generátorem na střídavý proud. Kromě převodu proudu střídač zajišťuje stálý provoz fotovoltaiky v bodě maximálního výkonu (MPP) a co nejvyšší efektivitu systému. Pokud je střídač připojen k internetu, umožňuje i vzdálenou kontrolu FV systému. [54]

Vzhledem k rozdílným podmínkám, ve kterých jsou FV systémy provozovány, a různým požadavkům zákazníků, existuje na trhu mnoho druhů FV střídačů. Podle způsobu aplikace lze střídače rozdělit na síťové, ostrovní a hybridní.

Síťové střídače se používají u solárních generátorů připojených přímo na síť bez akumulace a zvládnou přenést největší výkony. Ostrovní střídače jsou vhodné pro systémy s akumulací a bez připojení na síť. Hybridní střídače se používají při připojení na síť s akumulací energie, ale nedokáží přenést vysoké výkony.

Dále lze dělit střídače na jednofázové a třífázové, podle zapojení do sítě, nebo transformátorové a beztransformátorové, nebo podle konstrukce.

Zapojení a typ střídače [55]

Volba druhu střídače je, zvláště v České republice, stěžejní při pořizování fotovoltaiky. Špatně zvolený střídač může ekonomickou efektivitu využití elektřiny závratně snížit.

Od roku 2011 se podle vyhlášky č. 82/2011⁶ Sb., o měření elektřiny a o způsobu stanovení náhrady škody účtuje elektřina po fázích, tzn. každá fáze se měří zvlášť. To je pro malé fotovoltaické projekty nevýhodné, jelikož výkupní cena elektřiny je výrazně nižší než nákupní. Aby se domácnosti co nejvíce vyhnuly prodeji elektřiny a co nejvíce ji spotřebovaly samy, musí pořizovat dražší asymetrické střídače, které dokáží rozdělit výkon do fází tak, aby se elektřina využila ekonomicky efektivně (tzn. využívat co nejvíce vyrobené elektřiny pro provoz domácnosti a do sítě prodat pouze přebytky).

Ve zbytku EU se využívá součtového měření elektřiny, díky čemuž mohou domovní FV elektrárny využívat symetrických střídačů, které rozdělují energii do všech fází rovnoměrně.

Např. pokud solární generátor produkuje 3 kW, symetrický střídač je rovnoměrně rozdělí do fází L₁, L₂ a L₃. Pokud by spotřeba v každé fázi L₁ i L₂ byla 1,5 kW a ve fázi L₃ 0 kW, součtovým měřením by byla celková spotřeba rovna 0 kW. Měřením po fázích by spotřeba byla 1 kW, jelikož do fáze L₁ i L₂ je přiváděn 1 kW a odebíráno 1,5 kW, tzn. musí se dokupovat 0,5 kW na každou fázi. Fáze L₃ by do sítě dodávala 1 kW. Při měření po fázích se v tomto případě tedy prodává i nakupuje po 1 kW, to je ale nevýhodné vzhledem k nízké prodejní a vysoké nákupní ceně. Pro efektivní ekonomické využití elektřiny je tedy vhodný asymetrický střídač, který rozdělí výkon 3 kW do fází tak, aby do L₁ i L₂ šlo 1,5 kW a do fáze L₃ nešla žádná energie.

⁶ Tato vyhláška byla nahrazena vyhláškou č. 152/2016, podle které se stále měří elektřina po fázích

Účinnost střídače

Účinnost střídače udává, jaký výkon stejnosměrného proudu střídač převede na střídavý proud. Jelikož střídač nepracuje se stále stejným zatížením⁷ a účinnost se mění v závislosti na zatížení, celková účinnost se vypočítává podle tzv. Evropské účinnosti η_{EU} v % [35]

$$\eta_{EU} = 0.03 \cdot \eta_{5\%} + 0.06 \cdot \eta_{10\%} + 0.13 \cdot \eta_{20\%} + 0.1 \cdot \eta_{30\%} + 0.48 \cdot \eta_{50\%} + 0.2 \cdot \eta_{100\%}$$

Kde se účinnost pro dané procentuální zatížení vynásobí číslem udávajícím časové zastoupení tohoto zatížení v průběhu provozní doby.

Mimo Evropskou účinnost existuje i CEC účinnost (California Energy Commission) s mírně odlišnými hodnotami. [56]

2.3. Akumulace

Akumulace energie nabývá s rostoucí spotřebou energie stále většího významu. Ostrovní systémy, které nejsou připojeny na síť, se bez akumulované energie neobejdou, a u systémů připojených na rozvodnou síť umožňuje akumulace výrazně ekonomické zefektivnění. O akumulaci se čím dál tím častěji mluví ve spojení s obnovitelnými zdroji energie, protože elektrické energie se nespotřebovává konstantně stejné množství a čas spotřeby se u nich ne vždy kryje s časem výroby. Akumulace energie umožní energii neprodávat a uschovat ji pro pozdější využití a tím zvýšit ekonomickou efektivitu systému. [57]

2.3.1. Funkce

Akumulace energie je proces, při kterém se energie, kterou nelze uschovat přímo, přemění na jiný druh energie, který lze uchovat pro pozdější užití. Elektrická energie se tedy přemění na energii potenciální, kinetickou nebo tepelnou. Takto uskladněnou energii lze později převést zpět na elektrickou energii nebo se užije přímo (např. u tepelné akumulace). [58]

Následující kapitoly pojednávají o principu a typech tří různých způsobů akumulace. Kromě těchto způsobů existují i další, ty ale nebudou nijak v této práci popisovány z důvodu jejich nevhodnosti pro využití energie vyrobené solárními panely. [59]

2.3.2. Chemická a elektrochemická akumulace

Chemická nebo elektrochemická akumulace označuje akumulaci elektrické energie ve formě chemické energie a využívá se v chemických bateriích (obvykle označovaných prostým pojmem "baterie") nebo v akumulátorech. Akumulátory využívají přeměnu elektrické energie na energii chemickou, kterou je možno v případě potřeby transformovat zpět na elektrickou energii. [60]

Akumulátory

Mezi všemi způsoby akumulace energie se baterie a akumulátory dočkaly největšího rozšíření díky své široké paletě uplatnění. Ačkoliv je každý akumulátor odlišný - svým principem, kapacitou, či jiným parametrem, všechny fungují na principu zpětné přeměny elektrické energie na chemickou. [61]

Lithium-iontové akumulátory

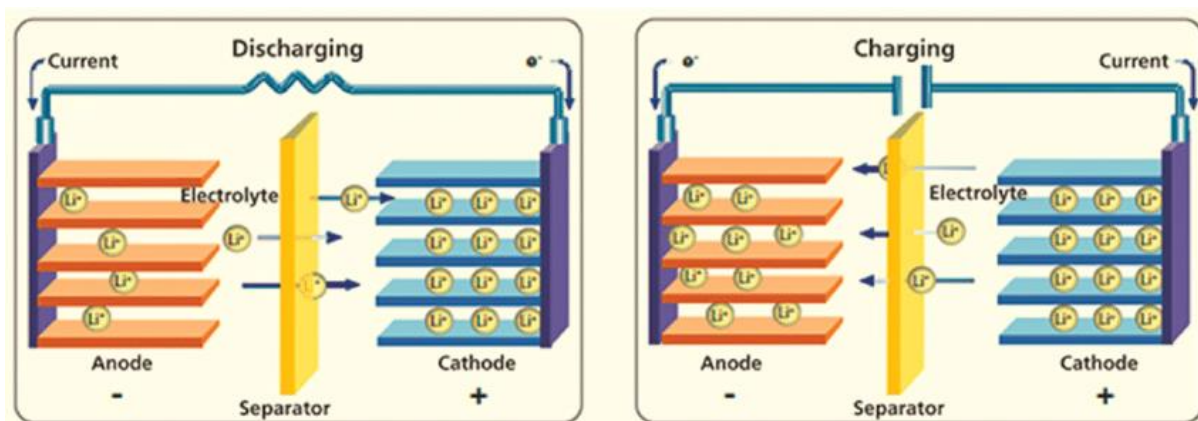
Jinak také Li-ion akumulátory jsou dnes nejrozšířenějším typem akumulace elektrické energie komerčně dostupným od roku 1991 [62]. Tyto akumulátory lze najít jak v přenosné elektronice, tak v elektrických dopravních prostředcích nebo jako akumulátory pro síťové účely

⁷ Fotovoltaický generátor dodává různý výkon v průběhu dne, v závislosti na ozáření.

(80 % všech síťových akumulátorů tvoří li-ion) [63]). Avšak pro každé využití se hodí jiný typ li-ion akumulátoru.

Jednotlivé druhy lithium-iontových akumulátorů se liší použitými materiály jednotlivých částí. Anody se vyrábějí z uhlíku, titanátu lithia a dalších prvků. Katody jsou vyrobeny z materiálů jako je například velmi používaný oxid kobalto-lithný (LiCoO_2) nebo lithium-železo fosfát (LiFePO_4 – LFE). Mimo tyto dva materiály existují ještě další materiály, ze kterých jsou katody li-ion akumulátorů tvořeny. Použití každého z těchto materiálů má své výhody a nevýhody. Proto nelze srovnávat li-ion akumulátory např. mobilních telefonů s li-ion akumulátory elektromobilů. [64]

- **Princip** [62]



Obr. č. 16: Schéma lithium-iontové baterie [65]

Baterii tvoří:

- Anoda – nejčastěji vyrobena z uhlíkového materiálu
- Katoda – podle materiálu se liší typy li-ion baterií
- Elektrolyt – slouží jako prostředník pro přenos lithiových iontů
- Separátor – zábrana, která umožní průchodu iontů lithia, ale ničeho jiného
- Kontakty – slouží jako sběrače elektronů

Princip li-ion akumulátorů využívá schopnosti materiálu anody a katody v sobě vázat ionty lithia.

Při vybíjení se uvolňují kladně nabitě ionty lithia z anody a pomocí elektrolytu prochází přes separátor do katody. Uvolněním lithia z anody vzniknou volné elektrony, které prochází přes kontakty do obvodu a tvoří elektrický proud. V katodě se ionty lithia váží na strukturu katody, přičemž přijímají elektrony. Při nabíjení se cyklus pouze otočí.

Pb-A

Olověné baterie, anglicky lead-acid battery (Pb-A), jsou velmi rozšířeným druhem baterií. Důkazem může být fakt, že 80 % celosvětově vyprodukovaného olova se využije v bateriích [66]. Výhodami tohoto typu akumulátoru je nízká cena za watt hodinu uchovatelné energie, vysoký výstupní proud a recyklovatelnost. Největší nevýhodou Pb-A akumulátorů je jejich váha, způsobená vysokou atomovou hmotností olova. [67]

Ni-Cd

Nikl-kadmiové akumulátory byly oproti dnešku v minulosti široce užívány. Za úpadkem těchto akumulátorů stojí převážně užití toxických a pro životní prostředí škodlivých prvků. Dnes se využívají jen v aplikacích, kde nelze užít jiného typu akumulace. [68]

Mimo to Ni-Cd akumulátory trpí na tzv. paměťový efekt způsobující snížení napětí při poklesu nabití baterie pod poslední úroveň vybití. Proto je nutno tyto baterie zcela vybit a nabít. [69]

Redoxní průtokové baterie

Od ostatních druhů baterií se průtokové baterie liší uchováním energie v kapalných elektrolytech nacházejících se v nádržích. Tyto baterie mají nízkou energetickou hustotu a velmi rychlou reakční dobu (v řádu milisekund), což z nich dělá vhodnou volbu pro síťové aplikace, u kterých nezáleží na rozměrech. [70]

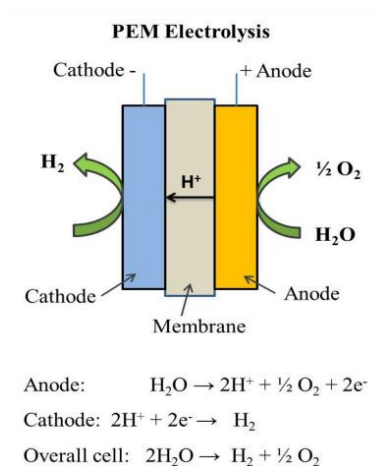
Akumulace energie pomocí vodíku

Velkou výhodou vodíku je možnost uskladnění po delší dobu.

Celosvětově se 95 % vodíku vyrábí ze zemního plynu⁸ a jen 4 % se vyrábí za nízkých teplot pomocí elektrolýzy [61]. Pokud je elektrina využita k elektrolýze vyrobena pomocí OZE (obnovitelný zdroj energie), takto vyrobený vodík se nazývá „Zelený vodík“. Elektrolýza PEM (polymer electrolyt membrane) a články s pevnými oxidy jsou způsobem, jak rodinné domy mohou využít vodík k akumulaci energie vyrobené ze solárního generátoru. [71][72]

Vodík se dnes i přes určité výhody téměř nevyužívá v systémech rodinných domů z důvodu vysokých nákladů na pořízení systému a nízké efektivitě převodu elektřiny na vodík a zpět. Pokud ale majitelé nemovitosti nezáleží na ceně, může být akumulace vodíkem zajímavým způsobem skladování energie. [73]

PEM elektrolýza



Obr. č. 17: Princip PEM elektrolýzy [74]

PEM elektrolýza vody je ekologický způsob získání vodíku používající membránu, která dokáže propouštět pouze vodíkové protony a nepropouští elektrony.

Voda se při dotyku anody rozštěpí na kyslík (O₂), protony vodíku (H⁺) a elektrony e⁻. Protony vodíku mohou projít membránou na katodovou stranu. Zatímco elektrony, které membránou projít nemohou, se musí do katody dostat skrz elektrický obvod, který dodává reakci hnací sílu. Na katodové straně se protony a elektrony rekombinují a vytvoří vodík H₂. [74]

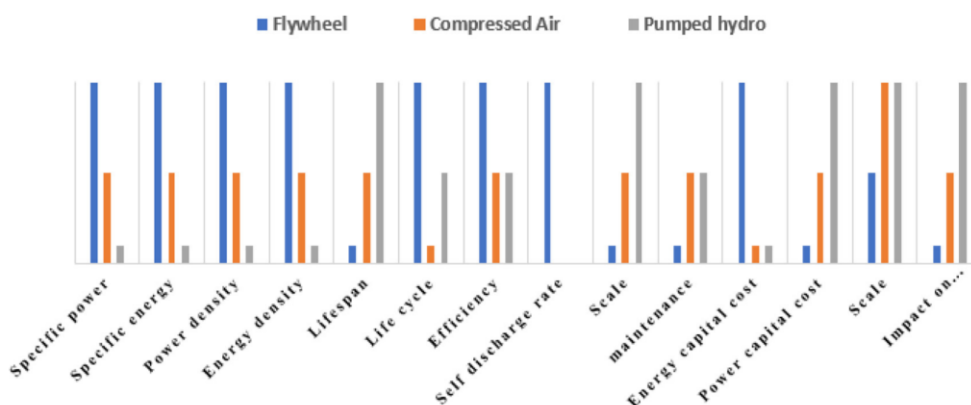
Tato reakce v opačném směru (tzn. při vybití vodíkového akumulátoru) vytváří elektrický proud a teplo. Jediný odpad této reakce je čistá voda (H₂O). [74]

⁸ Takto vyrobený vodík se nazývá „Šedý vodík“ [71]

2.3.3. Mechanická akumulace

Mechanická (nebo jinak také fyzikální) akumulace mění elektrickou energii na energii potenciální nebo kinetickou takovým způsobem, aby se dala mechanická energie zpětně převést na elektrickou. Mechanická akumulace má oproti bateriím výhody v rychlosti odezvy, kdy se nemusí čekat na proběhnutí chemické reakce, v menší ekologické závadnosti a v některých případech i v uskladnění energie po násobně delší dobu. Bohužel se s mechanickou akumulací setkáme výhradně u velkých aplikací, kde začnou převažovat její výhody nad investičními náklady. Pro rodinné domy mechanická akumulace neposkytuje dostatek výhod, které by převážily finanční náročnost instalace [59].

Způsobů mechanické akumulace existuje celá řada a dalo by se říci, že počet možností je omezen kreativitou konstruktérů. Tato práce ovšem popisuje pouze nejpoužívanější typy mechanické akumulace, o kterých lze uvažovat při instalaci do rodinného domu.



Obr. č. 18: Srovnání tří nejpoužívanějších způsobů mechanické akumulace [75]

Setrvačníky

Ukládání energie v setrvačnicích je založené na jednoduchém principu – roztočení setrvačnicku elektromotorem, který zároveň může fungovat jako generátor, vytvářející elektrickou energii na úkor zpomalování setrvačnicku. Velikost kinetické energie uložené v setrvačnicku lze vyjádřit vztahem [61]

$$E_{\text{setrvačnick}} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (9)$$

Kde: $E_{\text{setrvačnick}}$ je energie setrvačnicku [J]

J je moment setrvačnosti [kg·m²]

ω je úhlová rychlost [rad/s]

Velikost uchovatelné energie tedy závisí na tvaru, který určuje moment setrvačnosti, maximálních otáčkách a druhu materiálu. Maximální otáčky jsou závislé na odolnosti materiálu disku, kterým je nejčastěji ocel nebo kompozit. Kromě kinetické energie setrvačnick uchovává malou část energie ve formě elastické deformace vlivem odstředivých sil [61] (ta není v rovnici č. 9 zahrnuta).

Výhody jako je ekologičnost provozu, rychlá odezva na potřebu vysokého výkonu a vysoká hustota energie⁹ dělají ze setrvačnicků zajímavou alternativu akumulace energie. Ačkoliv nejsou setrvačnick masově rozšířené, tato technologie se těší čím dál většimu výzkumu a uplatnění. [75]

⁹ Hustota energie říká, kolik energie lze akumulovat na jednotku hmotnosti nebo objemu

Přečerpávací systémy

Přečerpávací vodní elektrárny ukládají elektrickou energii pomocí přečerpávání vodní masy do vyšších poloh pomocí turbíny, která může pracovat i v čerpadlovém režimu. Čímž akumulují elektrickou energii do potenciální energie vody podle vzorce

$$E_{\text{čp}} = V \cdot \rho \cdot g \cdot h \quad (10)$$

Kde:	$E_{\text{čp}}$	je energie uchovaná přečerpáním vody	[J]
	V	je objem vody	[m ³]
	ρ	je hustota vody	[kg/m ³]
	g	je tíhové zrychlení	[m/s ²]
	$h_{\text{čp}}$	je výška spádu od horní nádrže k turbíně	[m]

tuto potenciální energii lze přeměnit zpět na elektrickou při vypouštění horní nádrže. Voda při průchodu roztáčí turbínu, která pohání generátor vyrábějící elektřinu.

Přečerpávací elektrárny se staly nejpoužívanějším způsobem akumulace síťové energie [70]. Zvláště díky schopnosti vyrovnat poptávku po elektřině v době, kdy je jí přebytek. Navzdory úspěchům takovýchto aplikací se přečerpávací elektrárny pro potřeby domácností spíše nehodí vzhledem k finanční náročnosti instalace. Situace se však může změnit, pokud má investor možnost využití již existujících nádrží. [76][70]

Tlakové systémy

Stlačený vzduch představuje formu potenciální energie, která může být snadno uschována a poté uvolněna dle potřeby. Princip této akumulace spočívá ve stlačení vzduchu do nádrže nebo kaverny¹⁰ pomocí kompresoru. Jakmile je energie potřeba, stlačený vzduch se začne uvolňovat, přičemž pohání turbínu a elektrický generátor. [61]

Akumulace stlačeným vzduchem nedosahuje vysoké účinnosti v důsledku zahřívání vzduchu při kompresi a následnému úniku tepla. Při uvolňování stlačeného vzduchu je navíc potřeba ohřevu, aby nedocházelo ke ztrátám výkonu a námrazám. Řešením tohoto problému se zdá být využití tepla vzniklého při kompresi k ohřevu uvolňovaného vzduchu. Avšak vzhledem k těmto obtížím a nákladnosti systému se akumulace energie stlačením vzduchu v domácích aplikacích nevyužívá. [77][59]

2.3.4. Tepelná akumulace

Ačkoliv princip tepelné akumulace je znám již dlouhou dobu, tento způsob uchování energie se dočkal zvýšené pozornosti až v posledních dekádách s nástupem obnovitelných zdrojů energie a stále prochází vývojem [77]. Uplatnění zatím nachází ve větších aplikacích síťového charakteru, ale pomalu se začínají objevovat systémy tepelné akumulace pro rodinné domy. Největší překážkou použití této technologie jsou tepelné ztráty, kterým se nelze zcela vyhnout.

Základní princip tepelné akumulace neboli tzv. Carnotovy baterie je jednoduchý – elektřina se přemění na teplo, to se efektivně uchová a v době potřeby elektřiny se zpátky převede na elektřinu. Tato technologie se také jinak nazývá P2H2P (Power To Heat To Power). V některých aplikacích ale není nutno převádět teplo, uchované např. vodou v akumulacní nádrži, zpět na elektřinu, ale lze je užít napřímo jako TUV. [78]

¹⁰ Podzemní prostor sloužící k udržení stlačeného vzduchu

Tepelná akumulace se dělí podle způsobů nabíjení, skladování a vybíjení. Jednotlivé metody závisí na druhu materiálu určeného pro skladování tepla. Teplonosné médium lze nabíjet, tzn. ohřívat, přímo (indukčně či odporově) nebo například pomocí tepelného čerpadla. Naopak přeměna tepla na elektřinu se provádí pomocí Rankinova či Braytonova cyklu nebo tepelným výměníkem. Kromě těchto známých metod existují i jiné, experimentální, metody. [78]

Uskladnění tepelné energie

Energie lze tepelně akumulovat několika způsoby. Pomocí citelného tepla, latentního tepla, fyzikálním způsobem (sorpce) nebo termochemicky. V dnešní době jsou dostatečně prozkoumány a vyvinuty pouze první dva způsoby. [78]

Akumulace pomocí citelného tepla znamená prosté ohřátí materiálu, který může být jak v pevném, tak v kapalném skupenství. Výběr materiálu závisí na tepelné kapacitě, rychlosti přenosu tepla a provozních teplotách. Např. voda má nejvyšší tepelnou kapacitu ze všech látek, a to $4182 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, ale použitelný teplotní rozsah jen v rozmezí 5 až 95 °C. Proto se více používají jiné látky, které mají menší tepelnou kapacitu, ale v ostatních parametrech vodu překonávají. [61]

Energii uchovanou pomocí citelného tepla lze vyjádřit vztahem

$$Q = m \cdot c \cdot (t - t_0) \text{ [J]} \quad (11)$$

Kde: Q	je energie uchovaná v citelném teple [J]	
m	je hmotnost ohřívání látky	[kg]
c	je měrná tepelná konstanta	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
t	teplota po dodání tepla	[°C]
t_0	teplota před dodáním tepla	[°C]

Latentní teplo je teplo uchované pomocí fázové přeměny. Systémy využívající latentní teplo mají určité výhody oproti systémům s akumulací pomocí citelného tepla. Jsou menší a dokáží dodávat teplo za stálé teploty, jelikož přeměna probíhá izotermicky. [61]

Například německý systém akumulace FlexTherm Eco pomocí elektrické topné spirály zahřívá látku na bázi anorganické soli, mění její skupenství na kapalné a tím ukládá teplo. Při potřebě teplé vody se látka ochladí a začne krystalizovat, přičemž se uvolňuje energie, která se přes výměník předá TUV. Tento systém zajistí průtok teplé vody o hodnotě až 12,5 litru za minutu. A celkovou akumulaci až 10,5 kWh energie. [79][80]

3. Popis systému RD

3.1. Popis RD a lokalit

Rodinný dům (dále jen RD) zkoumaný touto prací se nachází v Jihlavě v Kraji Vysočina. Jedná se o dvoupatrový RD se sklepem, vybudovaný ve 20. letech minulého století, po rekonstrukci. Částečně zateplený objekt je vytápěn tepelným čerpadlem. Elektřina je odebírána ze sítě a vyráběna vlastní FV generátorem o maximálním výkonu 8,28 kW a akumulována v baterii.

Tepelné čerpadlo bylo spuštěno v dubnu roku 2023 (data zaznamenává od června 2023).

FV generátor byl zapnut v květnu 2023, v srpnu téhož roku bylo umožněno FV generátoru dodávat přetoky do sítě. V době, než došlo k umožnění dodávat přetoky do sítě, byla FV omezována tak, aby dodávala elektřinu jen do RD a k nabíjení baterie.

3.1.1. Střecha s FV panely

Plocha osazená panely je orientována na pravý jih s odchylkou šesti stupňů východně (vypočítáno jako součet magnetické deklinace o hodnotě 5 ° pro Jihlavu a odchylky 1° od magnetického jihu). Sklon střechy, se kterou je rovnoběžně instalováno 16 FV, panelů je 6 °. Kromě střechy o ploše cca 39 m² jsou dva FV panely instalovány vertikálně na stěně mezi okny.



Obr. č. 19: FV panely instalované na objektu RD

3.1.2. Objekt domu

Jedná se o dvoupatrový objekt se stále využívaným a vytápěným 1NP. Polovina prostoru 2NP je využívána jako nevytápěná půda a z druhé poloviny jako občasně využívaný obytný prostor. Dům je větrán přirozeně bez jakéhokoli nuceného větrání nebo rekuperace a je celoročně vytápěn na 21 °C.

Vytápěná plocha domu: 145,5 m²
Nevytápěná plocha domu: 44,5

Tepelné ztráty domu byly určeny pomocí internetové kalkulačky portálu Refsiter [81] ze spotřeby plynu před instalací TČ o průměrné hodnotě 30 MWh. Hodnota ztrát je podle kalkulačky v rozmezí 10 až 11 kW.

3.1.3. Lokalita

Tato kapitola se věnuje popisu lokality zejména z hlediska počasí, které má vliv na funkci tepelného čerpadla nebo fotovoltaiky. Většina údajů není pro Jihlavu dostupná, proto jsou tato data převážně získána z meteorologických stanic v okolí Jihlavy. Zejména ze stanice v Příbyslavi, zařazené do mezinárodní sítě nejvýznamnějších stanic (provozované Českým hydrometeorologickým ústavem [82]), a z meteorologické stanice v Košeticích. Aproximace dat z okolních stanic je způsob, kterým i pokročilé nástroje na výpočet a zhodnocení fotovoltaických systémů získávají data pro simulace. Data jsou těmito nástroji získávána z databází jako je Meteonorm 8, jejichž součástí je i Příbyslavská stanice. Mírné odchylky dat zkoumaného místa od míst meteorologických stanic přinášejí zanedbatelnou chybu při výpočtech.

Teplota

Teplota v průběhu roku má největší vliv na funkci tepelného čerpadla, jeho dimenzování a výsledný SCOP. Pro fotovoltaické panely je teplota vzduchu také důležitá, jelikož okolní vzduch je jejich jediný způsob chlazení. Z lokality také vychází počet topných dní a výpočtová teplota určená normou ČSN 38 3350.

Výpočtová teplota: -15 °C

Počet topných dní pro $t_{em}=13\text{ °C}^{11}$: 257

Graf č. 1 ukazuje průměry teploty venkovního vzduchu (za celý den) získané z teploměru vnější části tepelného čerpadla v časovém rozmezí 1. 6. 2023 až 31. 4. 2024:



Graf č. 1: Průměrné denní teploty naměřené teploměrem TČ¹²

Sluneční záření

Pro návrh FV generátoru a správné určení jeho výkonu je klíčová hodnota ozáření (viz Obr. č. 20). Doplnující hodnoty jako je délka svitu a počet dní se sněhovou pokrývkou, která nepropustí světlo k panelům (pro Jihlavu 60 dní [83]), jsou úzce spjaté s hodnotami ozáření, a pro návrh fotovoltaiky také důležité.

Tab. č. 4 ukazuje průměrné hodnoty ozáření a délky slunečního svitu v průběhu roku:

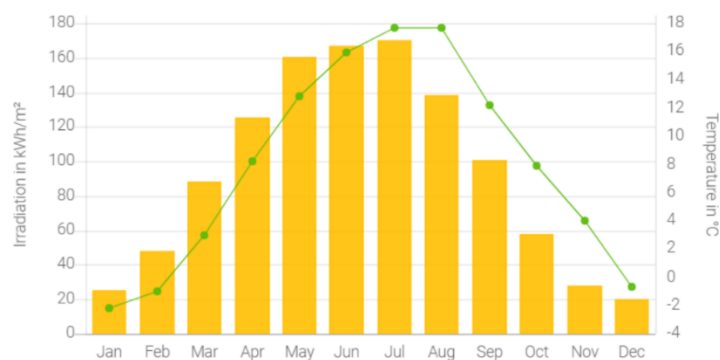
¹¹ Průměrná denní teplota venkovního vzduchu pro zahájení a ukončení dodávky tepla dle vyhlášky č. 194/2007

¹² Naměřené teploty se mírně liší od průměrných teplot v dané oblasti v daný čas. To je způsobeno umístěním čerpadla, které je v dopoledních hodinách zcela zastíněno a v odpoledních hodinách zase osvětleno.

- Zaznamenaná je délka svitu s hodnotou záření vyšší jak 120 W/m^2 [84]
- Průměrné hodnoty ozáření jsou získány ze stránek PV*SOL online¹³ [85]

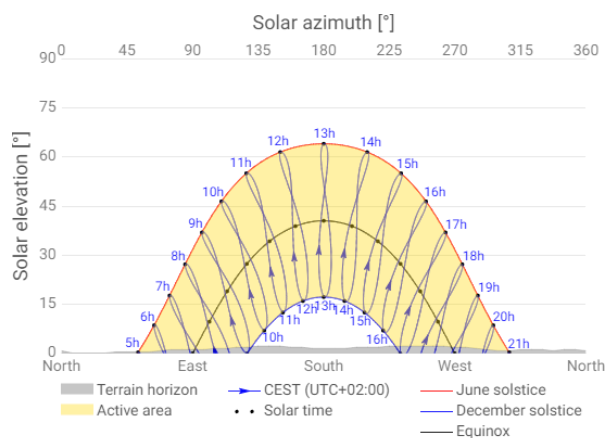
Měsíc	Délka slunečního svitu [hod]	Ozáření [kWh/m^2]
Leden	45.8	25
Únor	70.9	48
Březen	122.5	88
Duben	172.3	125
Květen	210.7	160
Červen	216.2	167
Červenec	227.5	170
Srpen	218.4	139
Září	160	101
Říjen	115.2	58
Listopad	45.3	28
Prosinec	39	20

Tab. č. 4: Délka slunečního svitu a hodnoty ozáření



Obr. č. 20: Ozáření a průměrná teplota [85]

Pohyb Slunce po obloze, znázorněný na Obr. č. 21, je důležitý při projektování a umístění FV systému. Pomocí simulace pohybu Slunce po obloze dokážeme určit, zda bude objekt FV generátoru zastíněn či nikoliv. Pro optimální funkci by se neměl žádný objekt nacházet ve žluté části diagramu



Obr. č. 21: Pohyb slunce po obloze [86]

¹³ PV*SOL online je bezplatný nástroj pro výpočet FV systémů, umožňující základní funkce pokročilejších systémů PV*SOL a PV*SOL Premium

3.2.Součásti nově instalovaného systému

V následujících kapitolách se práce bude zabývat popisem použitých komponentů v systému.

Systém fotovoltaika - tepelné čerpadlo - akumulace byl instalován za účelem ekonomického zefektivnění provozu objektu, snížení závislosti na zemním plynu a zvýšení tepelného komfortu. Mimo tento systém zůstalo vytápění v objektu stejné jako s předchozím plynovým kotlem.

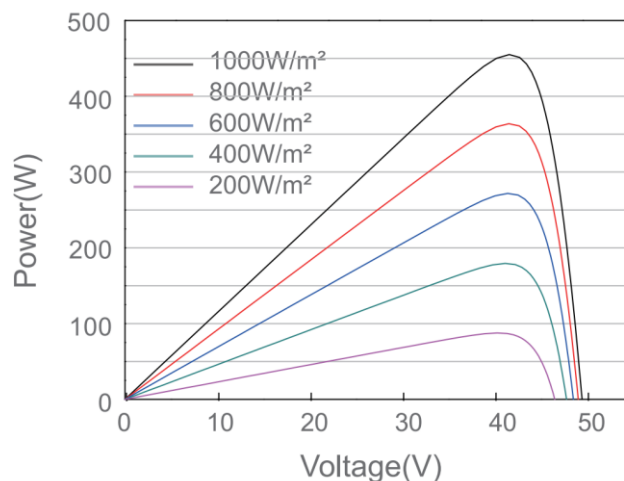
Fotovoltaické panely JA Solar JAM72S20-460/MR

Informace v této kapitole jsou převzaty z technického listu panelu [87]

Panely od výrobce JA Solar s P_{MPP} o hodnotě 460 W (při STC) jsou instalované ve dvou větvích (8 a 10 panelů). Jednotlivé PERC články panelu jsou vyrobené pomocí technologií multi-busbar¹⁴ a half-cell¹⁵. Tyto technologie umožňují vyšší celkový výkon panelu, lepší výkonnost v závislosti na teplotě, nižší vliv zastínění na výrobu energie, menší riziko vzniku hot spotu a větší odolnost proti mechanickému zatížení.

Výrobce prodává tyto panely se zárukou 84,8 % původního výkonu po 25 letech. Účinnost modulů je 20,7 %.

Počet článků:	144
Rozměry:	2112±2×1 052±2×35±1 mm
Teplotní koeficient výkonu:	-0,35 %/°C
Teplotní koeficient napětí:	-0,272 %/°C
Teplotní koeficient proudu:	+0,044 %/°C
Maximální výkon (NOCT ¹⁶):	348 W



Obr. č. 22: Charakteristika FV panelu [87]

¹⁴ Počet kontaktů na přední straně je zvýšen, tím se dosáhne lepšího výkonu [105]

¹⁵ Články jsou rozpůleny a tím je jejich proud snížen na polovinu. To zajistí menší ztráty a lepší výkon při zastínění článku [105]

¹⁶ Nominal operating Cell Temperature – jiné testovací podmínky než STC

Střídač ThinkPower EPH8KTL

Informace v této kapitole jsou převzaty z technického listu střídače [88].

Třífázový, beztransformátorový, asynchronní, hybridní střídač o nominálním výkonu 8 kW se primárně stará o přeměnu stejnosměrného proudu na střídavý a rozděluje proud mezi síť a baterii podle určeného módu. Střídač má funkci sledování dvou MPP – každý pro jednu větev a evropskou účinnost 97,5 %. Umožňuje komunikaci přes Wifi, což ulehčuje sledování správné funkce systému a umožňuje úpravy i opravy střídače přes internet. Střídač má také LCD displej pro zobrazení aktuálních údajů.

Záruka od výrobce je 5 let.

Maximální vstupní (DC) výkon: 12 000 W



Obr. č. 23: Střídač EPH8KTL [88]

Baterie Cooli CLH10KWH-192

O akumulaci energie vyrobené FV generátorem se stará jeden LiFePO₄ (lithium-železo-fosfátový) akumulátor.

Kapacita: 50 Ah

Nominální napětí: 192 V

Životnost: 4 500 až 6 000 cyklů



Obr. č. 24: Baterie CLH10KWH-192 [89]

Tepelné čerpadlo Mitsubishi PUD-SHWM120YAA/EHSD-YM9ED

Informace v této kapitole jsou převzaty z technického listu tepelného čerpadla [90] a materiálů získaných od dodavatele [107].

Tepelné čerpadlo typu split, o výkonu 12 kW, se skládá z venkovní jednotky PUD-SHWM120YAA a vnitřní jednotky EHSD-YM9ED. Je schopné monovalentního provozu až do $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a velmi nízkého akustického výkonu. Maximální výstupní teplota topné vody je $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($55\text{ }^{\circ}\text{C}$ při $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$). TČ disponuje možností ukládání provozních dat a nastavení na SD kartu nebo použití Wifi modulu pro vzdálenou správu. Velkým plusem je vynikající energetický štítek. Čerpadlo využívá chladivo R32 (GWP 675) a SCOP čerpadla, pro průměrnou klimatickou oblast při $P_{\text{design}} = 12\text{ kW}$, podle EN 14 825 dosahuje hodnoty 4,51.

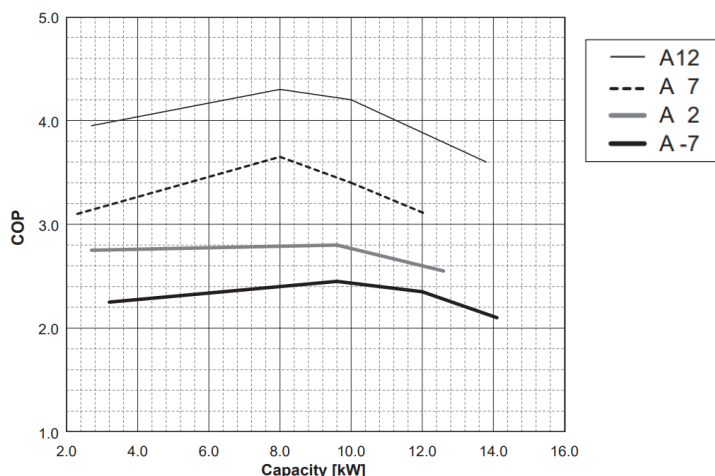
O chod venkovní jednotky se stará ventilátor s průtokem vzduchu $50\text{ m}^3/\text{min}$ a lamelový výměník. Ve vzdálenosti 1 m od jednotky je akustický výkon 46 dB.

Vnitřní jednotka, starající se o předání tepla v deskovém výměníku, dokáže dodat až $28,7\text{ l/min}$ ohřáté vody. O bivalentní provoz se stará elektrická topná patrona o maximálním výkonu 9 kW.

Obr. č. 26 ukazuje hodnoty COP při teplotě výstupní vody $45\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obr. č. 25: Venkovní jednotka tepelného čerpadla



Obr. č. 26: COP tepelného čerpadla

Akumulační nádrž OKC 250 NTR/BP

Akumulační nádrž o objemu 242 litrů je do systému instalována za účelem akumulace teplé vody, což zajistí její dostatek, a snížení četnosti zapínání kompresoru TČ (prodlouží se tak jeho životnost). Akumulační nádrž nedisponuje topným tělesem pro dodatečný ohřev vody. Statické ztráty nádrže činí 87 W. [91]

Otopná tělesa

Objekt je ve všech místnostech vytápěn pouze otopnými tělesy.

Kamna Jøtul F 3 TD

Kamna s nominálním výkonem 6,5 kW a účinností 79 % [92] jsou v objektu používána zejména těsně před začátkem a po konci topné sezóny podle potřeby rychlého dodatečného tepelného komfortu.

Spotřebiče v domácnosti

Spotřebič	Typ	Maximální příkon [W]
Lednice	Siemens	90
Varná deska	Electrolux CIR60433	7 200
Trouba	Electrolux EOD5H70X	2 990
Pračka	LG F94J7VY1W	2 100
Myčka	Fagor 1VF-56IX	2 550

Tab. č. 5: Spotřebiče v optimalizovaném RD

4. Energetická bilance

4.1. Spotřeba dřeva

Spotřeba dřeva za jednu topnou sezónu činí 0.8 PRMR (prostorový metr rovnaný). Všechno dřevo je spáleno v kamnech s účinností 79 %.

Výhřevnost listnatého dřeva: 1541,6 kWh/PRMR [93]

Celková získaná energie ze dřeva:

$$E_D = V_r \cdot H \cdot \eta_k = 0.8 \cdot 1541,6 \cdot 0.79 = 974.3 \text{ kWh} \quad (12)$$

Kde: E_D je energie získaná spálením dřeva [kWh]

V_r je rovnaný objem dřeva [PRMR]

H_D je výhřevnost dřeva [kWh/PRMR]

η_k je účinnost kamen [-]

4.2. Spotřeba vody

Spotřeba vody, podle vyhlášky č. 120/2011 Sb., na jednoho obyvatele rodinného domu je 36 m³/rok.

Pro výpočet spotřeby vody se počítá se 3 stálými obyvateli domu a jedním přechodným. Spotřeba vody přechodného uživatele v druhém bydlišti je 18,5 m³/rok.

$$V_{rok} = n_{obyv} \cdot V_{obyv} + n_{jinde} \cdot (V_{obyv} - V_{jinde}) \quad (13)$$
$$V_{rok} = 3 \cdot 36 + 1 \cdot (36 - 18,5) = 125,5 \text{ m}^3/\text{rok}$$

Kde: V_{rok} je spotřeba vody za rok [m³]
 n_{obyt} je počet stálých obyvatel domu [-]
 n_{jinde} je počet přechodných obyvatel domu [-]
 V_{obyt} je množství vody na obyvatele rodinného domu [m³]
 V_{jinde} je množství vody spotřebované mimo rodinný dům [m³]

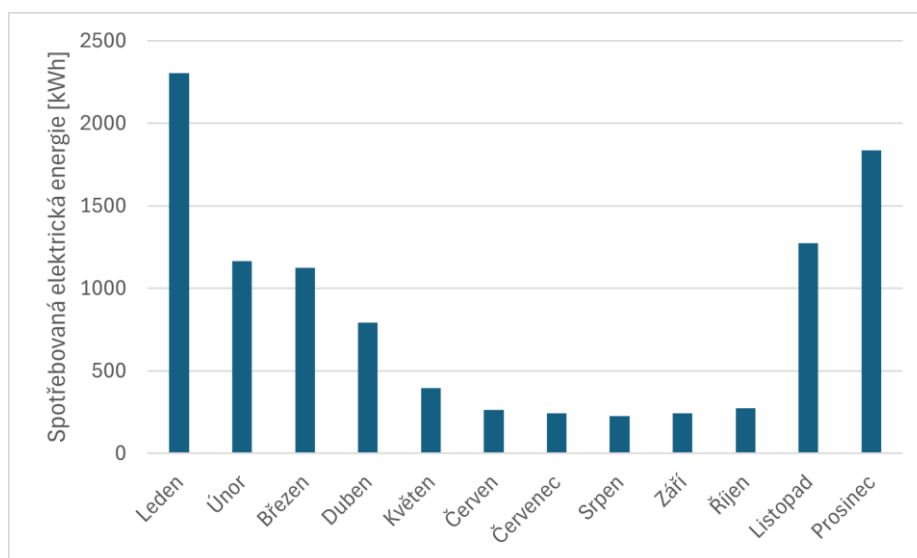
4.3. Elektřina

Všechna data o elektrické energii jsou získána ze snímače v měniči a vyhodnocena v programu MS Excel. Data získaná z měniče mají mírnou odchylku od hodnot z vyúčtování elektřiny. Tyto odchylky jsou natolik marginální, že je možné je zanedbat.

RD využívá dvoutarifovou sazbu D57d pro domácnosti s tepelným čerpadlem. Sazba umožňuje využívat tzv. nízký tarif po dobu 20 hodin denně, zbytek času je aktivní vysoký tarif [94]. Tab. č. 6 a Graf č. 1 udává hodnoty spotřeby elektrické energie v průběhu roku.

Měsíc	Spotřeba el. energie [kWh]
Leden	2 304,4
Únor	1 165,4
Březen	1126
Duben	791,7
Květen	397,7
Červen	263,1
Červenec	243,2
Srpen	227,1
Září	242,7
Říjen	274,9
Listopad	1 274
Prosinec	1 836,3
Celkem	10 146,5

Tab. č. 6: Spotřeba elektřiny



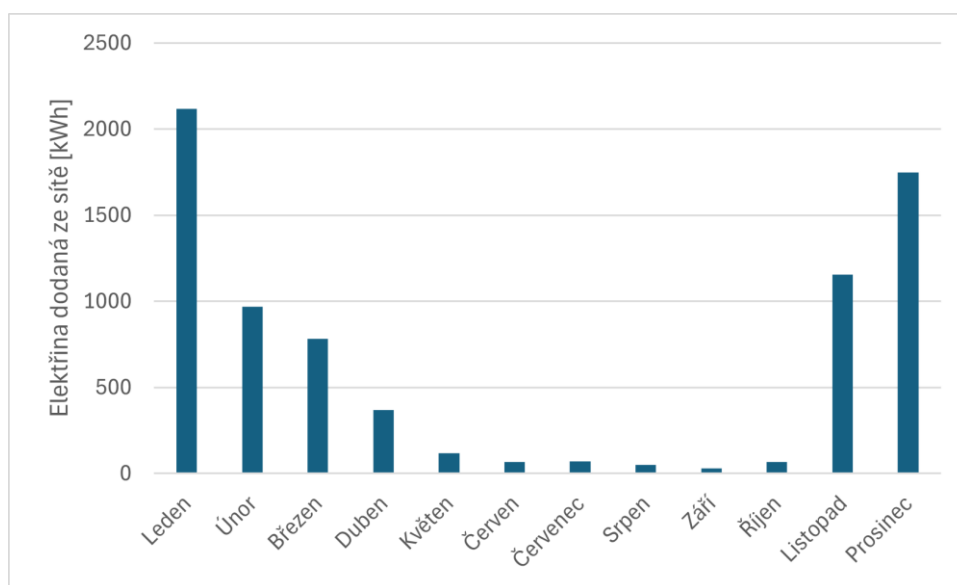
Graf č. 2: Spotřeba elektřiny

4.3.1. Elektřina ze sítě

Elektřina ze sítě se odebírá v době, kdy FV generátor není schopen dodávat dostatečné množství energie a baterie je vybitá. Z grafu č. 3 je vidět, kdy FV generátor s baterií dokázal pokrýt téměř veškerou spotřebu domu.¹⁷

Měsíc	Spotřeba el. energie [kWh]
Leden	2 117,3
Únor	968,6
Březen	781,2
Duben	367,8
Květen	119,8
Červen	68,1
Červenec	69,4
Srpen	49,5
Září	30,5
Říjen	68,2
Listopad	1 154,4
Prosinec	1 749,3
Celkem	7 544,1

Tab. č. 7: Elektřina dodaná ze sítě



Graf č. 3: Elektřina dodaná ze sítě

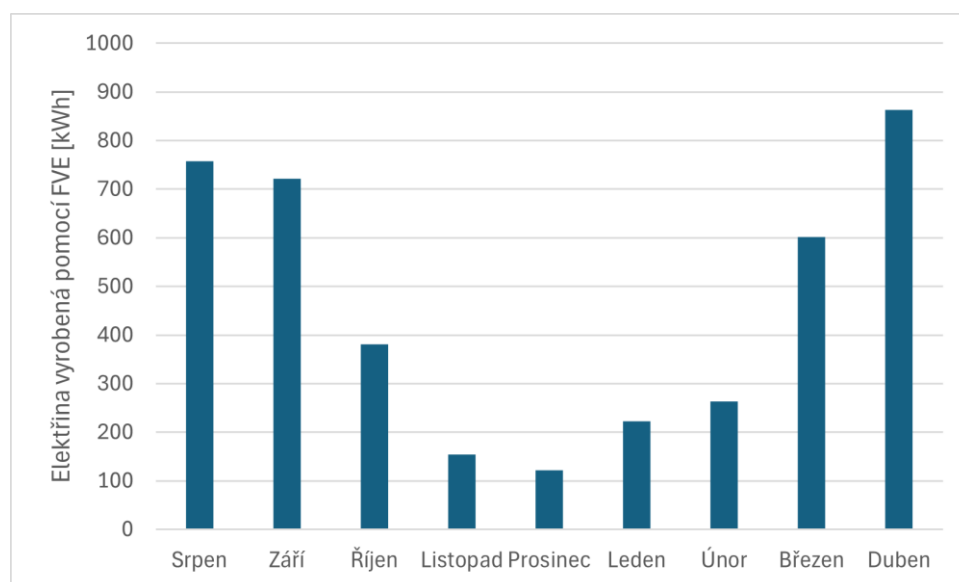
¹⁷ Jelikož FV generátor dodává elektřinu primárně rovnou k odběru nebo nabíjí baterii, tak je pro zhodnocení množství elektřiny, získané ze sítě, irelevantní fakt, že byla do srpna 2023 FV omezována, aby nedodávala přetoky do sítě.

4.3.2. Elektřina vyrobená pomocí FV

Tato kapitola se zabývá dobou od srpna 2023, kdy došlo k plnému zprovoznění FV generátoru, který přestal být omezován tak, aby nedodával přetoky do sítě, do dubna 2024. Více dat nebylo možné získat, kvůli termínu odevzdání práce.

Měsíc	Elektřina vyrobená pomocí FV [kWh]
Srpen	757,8
Září	721,7
Říjen	380,4
Listopad	153,8
Prosinec	122,2
Leden	222,6
Únor	262,7
Březen	601
Duben	863
Celkem	4877,6

Tab. č. 8: Elektřina vyrobená pomocí FV



Graf č. 4: Elektřina vyrobená pomocí FV

Z Tab. č. 8 je vidět, že FV generátor vyrobil více elektřiny v dubnu než-li v srpnu, což je v rozporu s daty v Obr. č. 20 a s nasimulovanými daty v Tab. č. 12. Tento jev je pravděpodobně zaviněn optimalizací FV generátoru, popsanou v kapitole 5.2.1, jež byla provedena v listopadu 2023.

4.4. Teplo získané pomocí tep. čerpadla - tepelné výkony pro různá období roku

Data v této kapitole jsou získána ze snímačů v tepelném čerpadle, které ukládá data minutově. Tato data jsou zatížena mírnou chybou, jelikož TČ ukládá data o vyrobené energii pouze jako celá čísla.

Vzhledem k tomu, že dům využívá jako primární zdroj tepla elektřinu, hodnoty vyrobeného tepla velmi kopírují spotřebu elektřiny (viz. Tab. č. 6).

Data bylo možné získat jen za 11 měsíců, jelikož TČ začalo zaznamenávat data až v červnu 2023 a datum odevzdání práce neumožňuje získat data za celý květen 2024. Pro získání hodnoty energie, kterou TČ vyrobilo za květen se využije odhad.

Odhad využívá dva okolní měsíce, pro získání průměrného množství elektřiny využitě na vytápění, a TF vypočítaný v kapitole 5.1 jako průměr všech měsíčních TF.

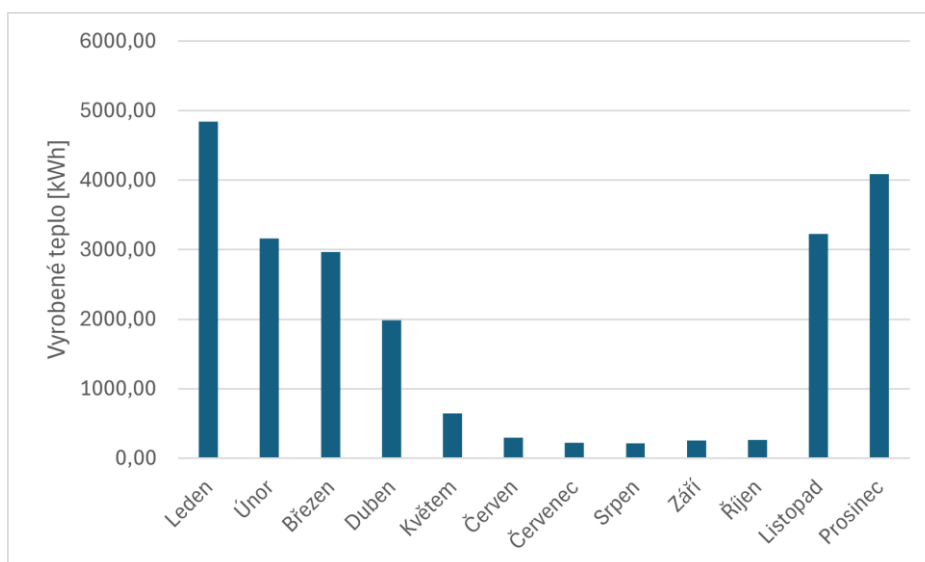
$$E_{TČk} = \frac{(E_{TČd}/E_{ld}) + (E_{TČč}/E_{lč})}{2} \cdot TF_{pr} \cdot E_{lk} \quad (14)$$

$$E_{vTČk} = \frac{\frac{543,88}{791,7} + \frac{94,97}{263,1}}{2} \cdot 3,08 \cdot 397,7 = 641,81 \text{ kWh}$$

Kde:	$E_{vTČk}$	je energie dodaná TČ v květnu	[kWh]
	E_{ld}	je celková el. energie spotřebovaná v dubnu	[kWh]
	$E_{lč}$	je celková el. energie spotřebovaná v červnu	[kWh]
	E_{lk}	je celková el. energie spotřebovaná v květnu	[kWh]
	$E_{TČd}$	je energie spotřebovaná TČ v dubnu	[kWh]
	$E_{TČč}$	je energie spotřebovaná TČ v červnu	[kWh]
	TF_{pr}	je průměrný topný faktor z kap. 5.1	[-]

Měsíc	Energie dodaná tepelným čerpadlem [kWh]
Leden	4 841,25
Únor	3 162,58
Březen	2 967,68
Duben	1 981,48
Květen	641,81
Červen	293,67
Červenec	222,63
Srpen	216,03
Září	256,28
Říjen	262,09
Listopad	3 228,33
Prosinec	4 090,73
Celkem	22 164,58

Tab. č. 9: Teplo vyrobené pomocí TČ



Graf č. 5: Teplo vyrobené pomocí TČ

4.5. Celková energie

Jelikož RD nevyužívá jiný zdroj energie, než je elektřina a dřevo, tak celková energie spotřebovaná na vytápění a ohřev TUV je součet energie dodané spalováním dřeva a energie vyrobené tepelným čerpadlem.

$$E_{celková} = E_D + E_{TČ} = 974,3 + 22\,164,58 = 23\,138,88 \text{ [kWh]} \quad (15)$$

Kde: $E_{celková}$ je celková energie využitá pro vytápění domu [kWh]

E_D je energie dodaná spalováním dřeva [kWh]

$E_{TČ}$ je energie dodaná pomocí tepelného čerpadla [kWh]

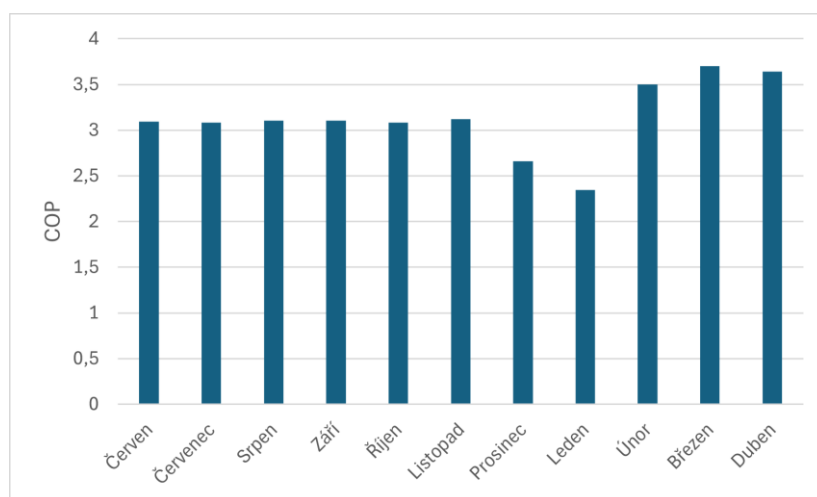
5. Optimalizace toků energií a návrh akumulace

5.1. Tepelné čerpadlo – průměrný topný faktor

Tab. č. 10 a Graf č. 6 ukazují průměrný topný faktor v průběhu roku vypočítaný z poměru vyrobeného tepla ku spotřebované elektřině za celý měsíc.

Měsíc	Spotřebovaná elektřina [kWh]	Vyrobené teplo [kWh]	COP
Leden	2 063,25	4 841,25	2,35
Únor	903,8	3 162,58	3,50
Březen	801,55	2 967,68	3,70
Duben	543,88	1 981,48	3,64
Květen	-	-	-
Červen	94,96	293,67	3,09
Červenec	72,21	222,63	3,08
Srpen	69,62	216,03	3,10
Září	82,60	256,28	3,10
Říjen	85,07	262,09	3,08
Listopad	1 033,79	3 228,32	3,12
Prosinec	1 539,15	4 090,73	2,66
Celkem	7 289,88	21 522,74	2,95

Tab. č. 10: Topný faktor v průběhu roku



Graf č. 6: COP v průběhu roku

Celkový průměrný topný faktor je vypočítán jako poměr celkové vyrobené elektřiny ku celkové spotřebované elektřině. Tento výsledek je ale silně zkreslen měsíci prosinec a leden, jejichž společná spotřeba vytváří téměř polovinu veškeré spotřeby a zároveň v těchto měsících pracuje TČ s nejnižším TF.

Pokud bychom počítali celkový TF jako průměr dílčích nezaokrouhlených měsíčních topných faktorů (mimo květen), tak by vyšel celkový TF = 3,08.

5.2. Výkon fotovoltaického generátoru

Tato kapitola se zabývá zhodnocením očekávaných a reálných výkonů FV generátoru. A také simulací FV generátoru pro získání dat o výrobě elektřiny i za měsíce, kdy data nebyla naměřena.

Nejdříve bude výkon FV srovnán s předpokládaným výkonem, který by měl generátor dodávat v závislosti na datech, která naměřila stanice Košetice¹⁸ [95]. A dále je nasimulován FV generátor pomocí programu PV*SOL premium, od firmy Valentin Software GmbH, který se využívá při projektování systémů fotovoltaiky.

Srovnání výroby elektřiny z FV generátoru s daty ze stanice Košetice

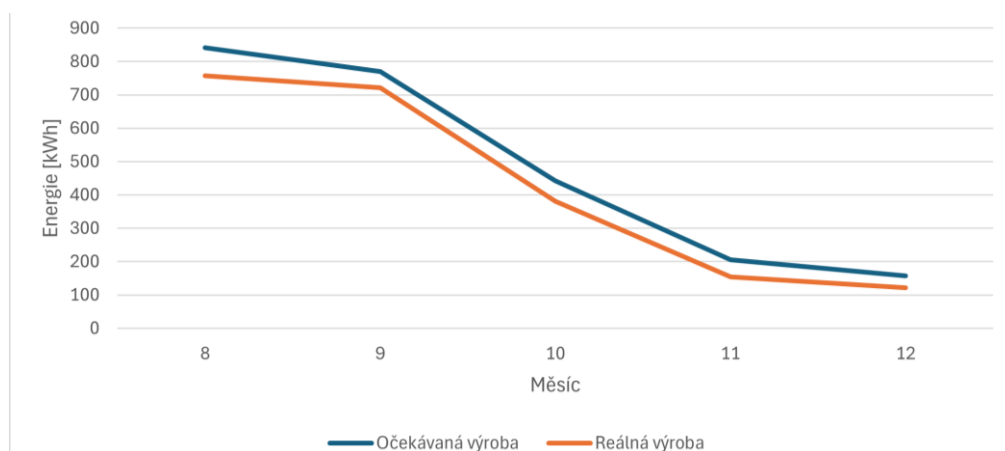
Srovnání dostupné sluneční energie a reálné výroby ukáže, jak efektivně FV generátor pracuje. Do výpočtu dostupné energie byly zahrnuty ztráty vlivem sklonu, systémem a panelem. Tento výpočet je však pouze orientační, jelikož jsou zahrnuty pouze základní ztráty.

$$E_{o\check{c}} = R_i \cdot A_p \cdot \eta_{modul} \cdot \eta_{syst\acute{e}m} \cdot \eta_{sklon} \quad (16)$$

Kde:	$E_{o\check{c}}$	je dostupná energie ze slunečního záření	[kWh]
	R_i	je ozáření v jednotlivých dnech	[kWh/m ²]
	A_p	je plocha panelů	36 [m ²]
	$\eta_{syst\acute{e}m}$	je účinnost systému	0,95 [-]
	η_{modul}	je účinnost panelu	0,207 [-]
	η_{sklon}	je účinnost panelu vlivem sklonu	0,88 [-]

Měsíc	Ozáření R_i [kWh/m ²]	$E_{o\check{c}}$ [kWh]	Vyrobená energie [kWh]	Rozdíl [%]
Srpen	135,1	841,7	757,8	9,97
Září	123,7	770,3	721,7	6,31
Říjen	70,9	441,5	380,4	13,85
Listopad	33	205,9	153,8	25,29
Prosinec	25,2	156,8	122,2	22,05

Tab. č. 11: Srovnání očekávané a vyrobené elektřiny



Graf č. 7: Srovnání očekávané a skutečně vyrobené elektřiny

¹⁸ Nejbližší stanice Jihlavě, která měří záření

Rozdíly mezi očekávanou a skutečně vyrobenou energií ukazují, že celý systém FV elektrárny má ztráty, které se práce v dalších kapitolách pokusí najít.

Simulace v programu PV*SOL premium

Program PV*SOL premium [96] v testovací verzi umožňuje detailní návrh a ekonomické zhodnocení různých typů FV systémů v závislosti na zadaných parametrech generátoru, lokality a cenách energií. Výstupem simulace je energetické a finanční zhodnocení společně s prezentací, která obsahuje všechny výstupy, např. včetně schématu zapojení.

Program PV*SOL premium je zvolen z důvodu možnosti 3D simulace zastínění panelů okolními objekty. Jelikož z časových důvodů není možné získat hodnoty množství vyrobené energie, je využití simulačního programu nejlepší řešení, jak získat data pro navazující kapitoly. Mimo to je v této kapitole program využit pro určení zastínění FV panelů.

Simulace je zatížena určitou chybou. Odchyłka simulace od reality je primárně v použití jiného typu měniče při simulaci, než ve skutečnosti instalovaného - simulovaný měnič se svými parametry velmi blíží k použitému měniči. Použití jiného měniče než instalovaného, je z důvodu absence instalovaného měniče v databázích PV*SOL.

Simulace

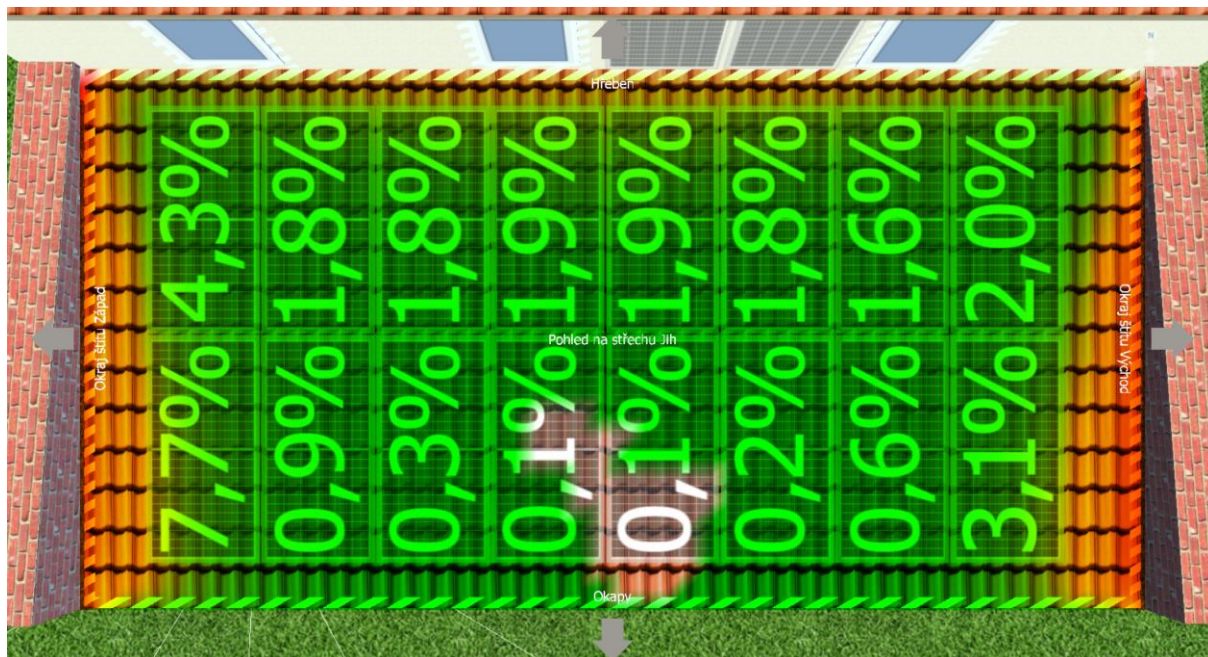
V programu PV*SOL premium byl vytvořen model objektu, na kterém je FV generátor instalován. Objekt RD nebyl modelován celý, nýbrž jen jeho části, které mají vliv na účinnost fotovoltaiky.



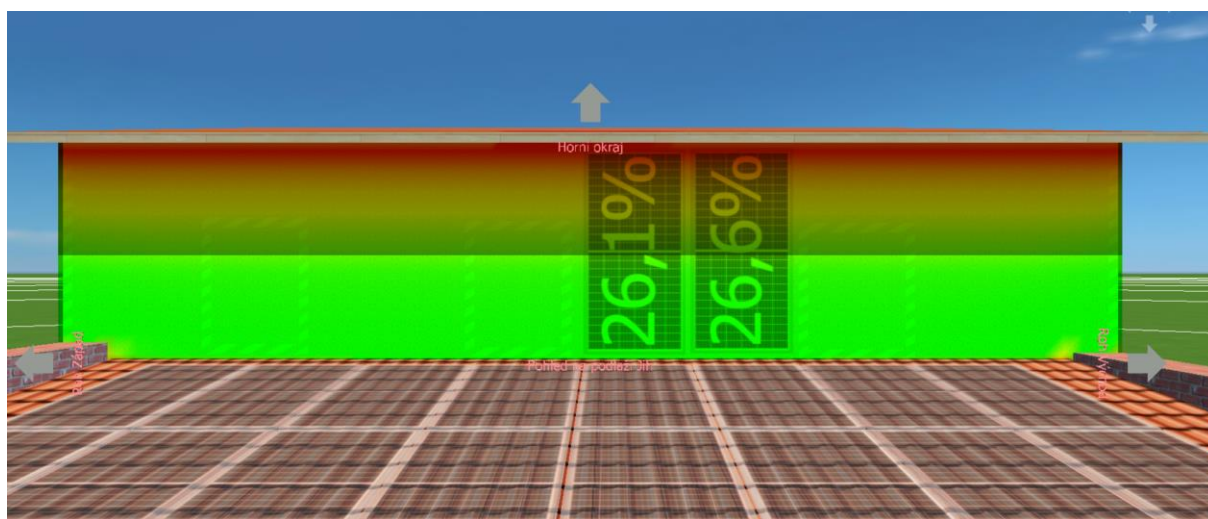
Obr. č. 27: Model RD vytvořený v programu PV*SOL

Po vytvoření modelu byla provedena simulace zastínění v průběhu roku. Její výstupy jsou na obrázcích č. 28 a 29. Ty ukazují, že zastínění panelů na střeše garáže vlivem bočních zdí je malé a zasahuje panely tak, že zasažené části mohou být přemostěny obtokovými diodami. Naopak dva vertikálně umístěné panely jsou v průběhu roku silně zastíněny kvůli přečnívající střeše. Nejvíce jsou vertikální panely zastíněny v létě, kdy je Slunce na obloze nejvýše. Naopak v zimě, kdy je Slunce na obloze nízko, jsou panely zastíněny přesahující střechou jen minimálně.

Vzhledem ke spotřebě elektřiny, která je nejvyšší v zimě, je instalace panelů na vertikální stěnu výhodná i z toho důvodu, že se na vertikálních panelech nadržuje sníh. Avšak při celkovém zhodnocení je umístění těchto panelů diskutabilní.



Obr. č. 28: Simulace zastínění FV panelů instalovaných na střeše



Obr. č. 29: Simulace zastínění FV panelů instalovaných na zdi

Po provedení celé simulace program spočítá celkovou roční a měsíční energetickou bilanci FV generátoru. Ta je na Obr. č. 30.

Globální záření - horizontální	1 157,56 kWh/m²	
Odchyška od standardního spektra	-11,58 kWh/m ²	-1,00 %
Odraz od země (Albedo)	13,29 kWh/m ²	1,16 %
Vyrovnaní a sklon úrovně modulu	6,50 kWh/m ²	0,56 %
Odstínění podle modulu	-61,83 kWh/m ²	-5,30 %
Odraz na povrchu modulu	-14,69 kWh/m ²	-1,33 %
Globální záření na modul	1 089,25 kWh/m²	
	1 089,25 kWh/m ²	
	x 40,144 m ²	
	= 43 727,15 kWh	
FV globální záření	43 727,15 kWh	
Znečištění	0,00 kWh	0,00 %
STC konverze (jmenovitá účinnost modulu 20,63 %)	-34 707,00 kWh	-79,37 %
FV jmenovitá energie	9 020,15 kWh	
Specifické dílčí stínění modulu	-880,55 kWh	-9,76 %
Chování za nízké intenzity světla	-116,73 kWh	-1,43 %
Odchyška od jmenovité teploty modulu	-64,11 kWh	-0,80 %
Diody	-11,12 kWh	-0,14 %
Nesrovnalost/Nesoulad (údaje výrobce)	-158,95 kWh	-2,00 %
Nesrovnalost/Nesoulad (zapojení/stínění)	-228,43 kWh	-2,93 %
FV energie (DC) bez sestupné regulace měničem	7 560,25 kWh	
Pokles pod výchozí výkon DC	-3,10 kWh	-0,04 %
Sestupná regulace z důvodu napětového rozsahu MPP	-416,71 kWh	-5,51 %
Sestupná regulace z důvodu max. DC proudu	0,00 kWh	0,00 %
Sestupná regulace z důvodu max. DC výkonu	-147,97 kWh	-2,07 %
Sestupná regulace z důvodu max. AC výkonu/cos phi	0,00 kWh	0,00 %
Přízpůsobení MPP	-9,03 kWh	-0,13 %
FV energie (DC)	6 983,44 kWh	
Energie na vstupu měniče	6 983,44 kWh	
Odchyška vstupního napětí od jmenovitého	-27,03 kWh	-0,39 %
Převod DC/AC	-247,72 kWh	-3,56 %
Spotřeba v provozní pohotovosti (Střídač)	-84,11 kWh	-1,25 %
Ztráty v kabelech celkem	0,00 kWh	0,00 %
FV energie (AC) minus pohotovostní spotřeba	6 624,59 kWh	
Energetický výnos FVE (AC síť)	6 708,70 kWh	

Obr. č. 30: Energetická bilance FV generátoru ze simulace pomocí programu PV*SOL premium

Výsledek energetického zhodnocení, na snímku obrazovky z programu PV*SOL premium (Obr. č. 30), ukázal, že FV generátor má schopnost dosáhnout roční výroby okolo 6,7 MWh. Dále Tab. č. 12 ukazuje simulovanou výrobu po měsících.

Měsíc	Energetický výnos podle PV*SOL [kWh]
Leden	160,9
Únor	306,5
Březen	561,6
Duben	787,4
Květen	893,4
Červen	925,2
Červenec	913,7
Srpen	841,8
Září	616,7
Říjen	376,7
Listopad	182,4
Prosinec	142,4

Tab. č. 12: Očekávaný energetický výnos podle simulace

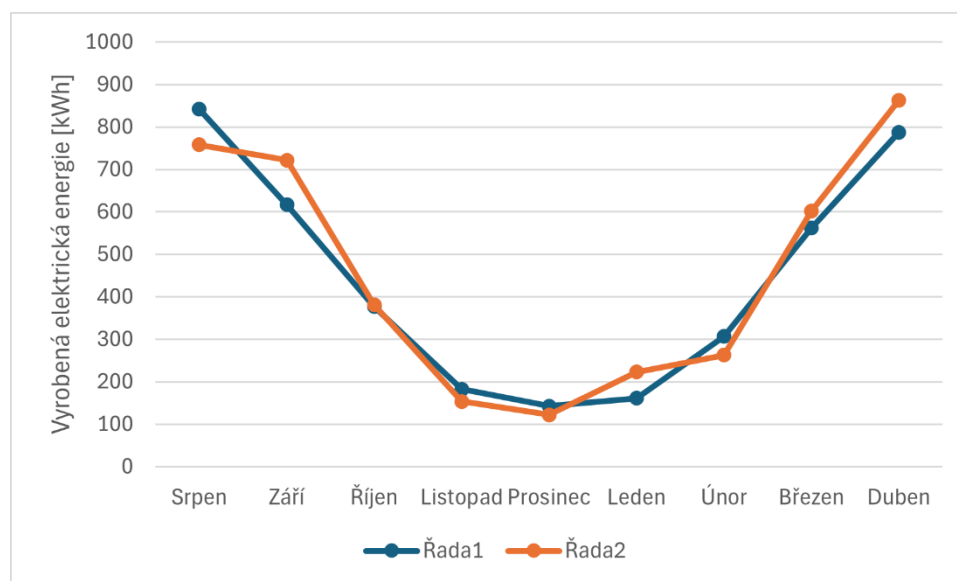
Kontrola simulace pomocí dostupných naměřených dat

Pro kontrolu dat získaných simulací FV generátoru je vhodné srovnat tato data s daty reálnými.

Měsíc	Naměřená vyrobená elektřina [kWh]	Elektřina vyrobená pomocí simulace [kWh]	Rozdíl simulované výroby ku reálné [%]
Srpen	757,8	841,8	9,98
Září	721,7	616,7	-17,03
Říjen	380,4	376,7	-0,98
Listopad	153,8	182,4	15,68
Prosinec	122,2	142,4	14,19
Leden	222,6	160,9	-38,35
Únor	262,7	306,5	14,29
Březen	601,5	561,6	-7,1
Duben	863	787,4	-9,6
Celkem	3 976,4	4 085,7	-2,75

Tab. č. 13: Kontrola simulace

Simulace se svými výsledky dle Tab. č. 13 blíží k reálným datům jednotlivých měsíců a pro celé kontrolované období má chybu jen 2,75 % – ta může být způsobena ozářením, které bylo za měřenou dobu vyšší, než je průměr (viz data ze stanice Košetice [95]). Jelikož je chyba relativně malá, budou data získaná simulací dále v práci využívána. Graf č. 8 ukazuje, že i když hodnoty simulace kolísají kolem reálných hodnot, tak vždy sledují trend reálné výroby.



Graf č. 8: Srovnání reálné a nasimulované výroby elektřiny FV generátorem

5.2.1. Umístění a sklon panelů, zastínění

Sklon panelů, umístění a instalace

Všechny panely jsou orientovány na jih s mírnou odchylkou, což je téměř nejlepší možná orientace panelu. Přichycení panelů ke střeše je realizováno tak, že panely jsou odsazeny dostatečně daleko od střechy, aby byly dobře odvětrávány vzduchem.

Sklon 16 panelů z celkových 18 činí 6°. Zbylé dva panely jsou instalované vertikálně na stěně. Pro panely se sklonem 6° jsou dle [97] celoroční ztráty vlivem nedostatečného sklonu 10 %. Pro vertikální panely je ztráta 35 % ročně vůči optimálnímu sklonu.

Další problém s malým sklonem panelů je zhoršená schopnost samočištění pomocí deště. Jako největší problém se jeví rám panelu. Ten je natolik vysoký, že v kombinaci s nízkým sklonem panelu vytváří prostor na spodním okraji panelu, kde se drží voda. Ta obsahuje nečistoty, které společně s ní stečou z celé plochy panelu. Po odpaření vody tyto nečistoty zůstávají na spodním okraji panelu a zasahují nad jednotlivé články, což snižuje jejich účinnost. Jelikož články jsou spojeny sériově za sebe, toto snížení účinnosti zasáhne i skupinu ostatních článků, které jsou na stejné obtokové diodě. Obtokové diody jsou umístěny paralelně k řadám jednotlivých článků podél delší strany panelu [98], a proto je snížen výkon velké části panelu. Jediným řešením je pravidelné čištění panelů.



Obr. č. 31: Znečištění FV panelů

Zastínění

Zastínění panelů je v místě FVE způsobeno okolními stíny nebo špínou, která ulpí na panelech.

Při analýze pohybu Slunce po obloze bylo zjištěno, že v dopoledních hodinách jsou panely z části zastíněny stromem. Ten byl pokácen 18. 11. 2023.

Následuje výpočet zvýšení účinnosti panelů po pokácení. Výpočet využívá dat nasbíraných šest dní před a po pokácení stromu¹⁹, tzn. od 12. 11. 2023 do 24. 11. 2023. Dále je započítána průměrná teplota v době slunečního svitu a hodnoty ozáření ze stanice Košetice.

Po pokácení stromu - η_{po}			
i	$\varnothing t_i$ [°C]	R_i [kWh/m ²]	E_i [kWh]
19	4,81	0,77	3,6
20	8,97	0,68	5,2
21	7,03	1,02	4,8
22	-0,09	0,20	1,4
23	3,61	0,89	6,6

Tab. č. 14: Hodnoty ozáření a teplot po pokácení stromu

¹⁹ Delší časový úsek pro získání dat nebylo možné získat, jelikož první sníh napadl sedmý den po pokácení stromu

Před pokácením stromu - $\eta_{před}$			
i	$\varnothing t_i$ [°C]	R_i [kWh/m ²]	E_i [kWh]
13	3,15	0,57	3,1
14	9,25	0,72	4
15	7,94	0,58	3,4
16	7,56	1,25	5,5
17	4,1	1,01	5,9

Tab. č. 15: Hodnoty ozáření a teplot před pokácením stromu

$$\eta = \frac{1}{n - m} \sum_{i=m}^n \frac{E_i * 100}{\eta_{účinnosti} \cdot A_p \cdot R_i \cdot \frac{100}{100 + (\varnothing t_i - t_{src}) \cdot (\beta_{voc}) + (\varnothing t_i - t_{src}) \cdot (\alpha_{isc})}} \quad (17)$$

$$\eta_{účinnosti} = \eta_{systém} \cdot \eta_{modul} \cdot \eta_{sklon} \quad (18)$$

$$\eta_{po} = 105,05 \%$$

$$\eta_{před} = 90,79 \%$$

Kde: η_{po}	je účinnost FV po pokácení stromu	[%]
$\eta_{před}$	je účinnost FV před pokácením stromu	[%]
$\eta_{účinnosti}$	je celková účinnost	[-]
E_i	je energie vyrobená FV generátorem	[kWh]
$\varnothing t_i$	je průměrná denní teplota	[°C]
β_{voc}	je teplotní koeficient pro napětí	[%/°C]
α_{isc}	je teplotní koeficient pro proud	[%/°C]

$$\Delta\eta = \eta_{po} - \eta_{před} = 105,05 - 90,79 = 14,26 \% \quad (19)$$

Kde: $\Delta\eta$ je rozdíl účinností FV před a po skácení stromu [%]

Výpočtem bylo zjištěno, že pokácení stromu zvýšilo účinnost FV generátoru zhruba o 14 %. Hodnota účinnosti po pokácení stromu přesahující 100 % znamená, že bylo denní ozáření v Jihlavě vyšší než na stanici v Košeticích. To může být způsobeno např. rozdílnou oblačností.

5.3. Návrh akumulace energie

Akumulace energie je klíčovým parametrem při provozu RD s fotovoltaikou. Jelikož by FV generátor měl v průběhu roku vyrobit cca 6,7 MWh energie a spotřeba domu je cca 10,1 MWh, tak by si dům měl obstarat zhruba 67 % veškeré elektrické energie.

To se ale neděje, jelikož většina elektřiny je vyrobena v létě, a naopak spotřebována v zimě. Akumulátor, který je v systému RD instalován, má dostatečnou kapacitu pro akumulaci množství energie, která je potřeba na den. Jakmile se akumulátor nabije, veškerá vyrobená elektřina, která není v danou chvíli spotřebovávána, putuje ve formě přetoků do sítě.

Přetoky do sítě jsou prodávány buď za ceny na spotovém trhu nebo za předem stanovené ceny. Tyto ceny ale nejsou nikdy srovnatelné s cenami nakupované elektřiny. Proto se vyplatí co nejvíce elektřiny spotřebovat ihned, nebo akumulovat. Tím se dosáhne menších prodejů a ekonomicky výhodnějšího užití elektřiny.

Nejdeálnější možností by bylo veškerou vyrobenou elektřinu akumulovat a později spotřebovat v systému RD. V následujících dvou kapitolách se práce zabývá zhodnocením takové akumulace elektrické energie pomocí virtuální baterie a převedením na teplo, které se uchová a následně využije k vytápění domácnosti.

5.3.1. Virtuální baterie

Virtuální baterie je služba, kterou na našem území provozují dva distributoři, a to E.ON Energie a.s. a ČEZ, a.s. Jedná se o službu, kdy se přebytečná vyrobená elektřina posílá do sítě a při její potřebě si ji zákazník zase ze sítě bere zpět. Nevýhodou této služby je to, že zákazník stále musí platit za distribuční část ceny a ostatní poplatky a daně. Zákazník tedy ušetří na tzv. obchodní ceně elektřiny.

Každý poskytovatel této služby má svá pravidla pro využívání virtuální baterie. Společnost E.ON poskytuje možnost virtuální baterie pouze zákazníkům, kteří si nechali zhotovit FV elektrárnu od nich. Z tohoto důvodu se dále tato práce nebude zabývat službou virtuální baterie od společnosti E.ON. [99]

Pravidla společnosti ČEZ jsou mírnější. Jejich služba virtuální baterie nazvaná *Elektřina pro soláry* je dostupná zákazníkům, kteří mají mimo jiné instalovaný výkon FV elektrárny do 10 kW, data výroby i spotřeby jsou evidována pod jedním²⁰ identifikačním EAN kódem a odběr elektřiny od společnosti ČEZ. Je tedy potřeba si ohlídat, aby FV elektrárna splňovala tyto parametry už ve fázi návrhu²¹. [100]

Výpočet

Úkolem výpočtu je zjistit, kolik prostředků by se ušetřilo, pokud by se všechny přetoky ukládaly do virtuální baterie od společnosti ČEZ, a.s. pomocí služby *Elektřina pro soláry*.

Díky virtuální baterii se při získávání energie ze sítě do limitu dodané elektřiny neplatí obchodní část ceny. Ta u aktuálního ceníku ČEZ pro smlouvu na 3 roky vychází na 3 980,90 Kč/MWh v tarifní sazbě D57d [101].

²⁰ Běžně si majitelé zřizují dva EAN kódy. Kód EAN pro výrobu totiž umožní majiteli FV elektrárny prodávat vyrobenou elektřinu na běžném trhu.

²¹ Jakmile je registrován EAN kód pro výrobu i spotřebu, tak nelze zrušit, jelikož EAN kód zaniká s místem výroby či spotřeby.

Výpočet bude rozdělen na dvě období z důvodu zprovoznění plného výkonu FV až v srpnu minulého roku. Tedy pro období mezi srpnem minulého roku až duben aktuálního roku bude výpočet využívat naměřených dat a pro zbytek roku budou využita data získaná simulací.

Období srpen až duben

Data získaná ze snímače v měniči

Měsíc	Přetoky [kWh]
Srpen	492,5
Září	419,4
Říjen	110,1
Listopad	3,1
Prosinec	16,6
Leden	9,9
Únor	32,6
Březen	178,7
Duben	327,4
Celkem	1 609,5

Tab. č. 16: Přetoky v plně měřeném období

Za měřené období tedy bylo do sítě dodáno $E_{přetok1} = 1\,609,5$ kWh el. energie.

Období květen až červenec

V tomto období FV generátor vyráběl elektřinu, ale byl nastavený tak, aby se vypnul ve chvíli, kdy nedodával elektřinu do objektu, který by ji rovnou spotřeboval nebo nenabíjel baterii. To znamená, že FV generátor vyrobil veškerou elektřinu, která by se i za plného výkonu dodala do objektu nebo akumulátoru, pouze nevyráběl elektřinu, která by se za normálních okolností stala přetoky.

Pro výpočet přetoků do sítě tedy stačí odečíst veškerou vyrobenou elektřinu v období květen až červenec od celkové elektřiny vyrobené v daném období podle simulace provedené v kapitole 5.2.

Měsíc	Vyrobena (spotřebovaná) energie [kWh]	Vyrobitelná energie podle simulace [kWh]	Přetoky [kWh]
Květen	332,3	893,4	561,1
Červen	242,1	925,2	683,1
Červenec	217,5	913,7	696,2
Celkem	791,9	2732,3	1 940,4

Tab. č. 17: Dupočet přetoků

Podle výpočtu pro období, kdy nebylo možné získat reálná data o přetocích, bylo díky simulaci zjištěno, že do sítě by se dodalo $E_{přetok2} = 1\,940,4$ kWh el. energie.

Výsledek

Pro získání celkových přetoků za celý rok stačí sečíst přetoky z obou období dohromady.

$$E_{\text{přetok}} = E_{\text{přetok1}} + E_{\text{přetok2}} = 1\,609,5 + 1\,940,4 = 3\,549,9 \text{ kWh} \quad (20)$$

Kde: $E_{\text{přetok}}$ jsou celkové přetoky do sítě za rok [kWh]

$E_{\text{přetok1}}$ jsou celkové přetoky do sítě za období srpen až duben [kWh]

$E_{\text{přetok2}}$ jsou celkové přetoky do sítě za období květen až červenec [kWh]

Celkové ušetřené náklady při využití virtuální baterie na ceně²² elektřiny bez stálých plateb oproti nákupu energie ze sítě se spočítají jako součin přetoků a ušetřené ceny (tzn. obchodní části ceny elektřiny, která je dle [100] 3 980,9 Kč/MWh)

$$U_v = E_{\text{přetok}} \cdot C_o = 3,5499 \cdot 3\,980,9 = 14\,131,8 \text{ Kč} \quad (21)$$

Kde: U_v jsou úspory při využití virtuální baterie [Kč]

$E_{\text{přetok}}$ jsou celkové přetoky do sítě za rok [MWh]

C_o je cena obchodní části elektřiny [Kč/MWh]

Pro zhodnocení výdělku při výkupu elektřiny byl zvolen obchodník E.ON s ceníkem SimplePROvýroba, který nabízí fixní cenu pro výkup elektřiny 2 000 Kč/MWh. [102]

$$F = E_{\text{přetok}} \cdot C_v = 3549,9 \cdot 2 = 7\,099,8 \text{ Kč} \quad (22)$$

Kde: F jsou finance získané prodejem elektřiny [Kč]

C_v je cena za výkup elektřiny [Kč/kWh]

Ušetřené náklady při využití virtuální baterie oproti výkupu za fixní ceny (bez stálých plateb) by tedy byly:

$$S = U_v - F = 14\,131,8 - 7\,099,8 = 7\,032 \text{ Kč} \quad (23)$$

Kde: S jsou úspory při využití virtuální baterie oproti výkupu [Kč]

Při využití virtuální baterie od společnosti ČEZ, a.s. pomocí služby *Elektřina pro soláry* by tedy bylo možné ročně ušetřit 7 032 Kč oproti výkupu elektřiny za fixní cenu při zanedbání ostatních plateb.

Srovnání s jinými možnostmi prodeje elektřiny

V období vypracování práce (květen 2024) žádný obchodník na českém trhu s elektřinou nevykupuje elektřinu za fixní cenu vyšší než 3 980,9 Kč/MWh. To znamená, že virtuální baterie je v současnosti ekonomicky efektivnější možností, než prodej elektřiny, pokud neuvažujeme stálé platby. To dokazuje srovnání s výkupem elektřiny společností E.ON. V této kapitole ale nejsou započítány ostatní náklady spojené s virtuální baterií, které její výhodnost snižují. Tyto náklady budou započítány v ekonomické bilanci. Výkup za spotové ceny není v této práci uvažován s ohledem na vysokou fluktuaci cen (z důvodu zaměření práce technickým, ne ekonomickým směrem).

²² V tomto výpočtu se počítá se samotnou cenou elektřiny, nejsou zde započteny stálé platby. Ty jsou při službě virtuální baterie značně vyšší než při výkupu elektřiny (ceny jsou rozepsány v kapitole 6. Ekonomická bilance)

5.3.2. Akumulace tepla

Tato kapitola se zabývá přímou akumulací tepla vyrobeného pomocí tepelného čerpadla z přebytečné elektřiny vyrobené FV generátorem. Výhodou tohoto způsobu akumulace by byla možnost výroby tepla tepelným čerpadlem v době, kdy TČ dosahuje vysokého TF a zároveň FVE vyrábí více energie, než stíhá RD spotřebovat a spotřeby akumulovaného tepla v době, kdy TČ pracuje s nízkým TF – zejména v prosinci a lednu (viz. Tab. č. 10).

Pro výpočet bude uvažován smyšlený aparát (dále jen akumulátor) na akumulaci tepelné energie s různými účinnostmi. Cílem této kapitoly je zjistit, jakých úspor by bylo možné dosáhnout při různých účinnostech akumulátoru.

Výpočet

Jako množství veškeré využitelné energie se uvažují všechny přetoky, tzn. 3 549,9 kWh elektřiny. Pomocí elektřiny se v tepelném čerpadle s TF 3,08 (průměrný topný faktor vypočtený jako průměr měsíčních TF) převede všechna elektřina na teplo. To je dále akumulováno a s určitými účinnostmi uloženo.

Podle množství celkové uložené energie, která se bude lišit podle účinnosti, se bude ve výpočtu uvažovat s uvolňováním tepla nejdříve v lednu, kdy TČ pracuje s nejnižším TF, pak v prosinci a v poslední řadě se bude uvažovat využití tepla v listopadu.

Podle TF v těchto měsících (Tab. č. 19) se určí ušetřené finance. Pro přesnější výsledky bude ušetřená elektřina rozdělena do vysokého a nízkého tarifu, kvůli rozdílným cenám.

Celkové získané teplo:

$$E_{ohřev} = E_{přetok} \cdot TF = 3\,549,9 \cdot 3,08 = 10\,933,69 \text{ kWh} \quad (24)$$

Kde: $E_{ohřev}$ je vyrobená energie pomocí TČ [kWh]

$E_{přetok}$ je energie, která se využije pro pohon TČ [kWh]

Uložená energie dle účinností:

$$E_{využitelná} = E_{ohřev} \cdot \eta_{akumulace} \quad (25)$$

Kde: $E_{využitelná}$ je celková využitelná energie po započtení účinnosti [kWh]

$\eta_{akumulace}$ je celková účinnost akumulace [-]

$\eta_{akumulace}$ [-]	$E_{využitelná}$ [kWh]
0,5	5 466,85
0,6	6 560,22
0,7	7 653,58
0,8	8 746,95
0,9	9 840,32
1	10 933,69

Tab. č. 18: Využitelná energie při různých účinnostech

Topné faktory v nejzatíženějších měsících:

Měsíc	Průměrný TF v daném měsíci
Listopad	3,12
Prosinec	2,66
Leden	2,35

Tab. č. 19: Průměrný TF v nejzatíženějších měsících

Ušetřená tepelná energie při daných účinnostech:

Účinnost	Leden [kWh]	Prosinec [kWh]	Listopad [kWh]
0,5	4 841,25	625,59	-
0,6	4 841,25	1 718,96	-
0,7	4 841,25	2 812,33	-
0,8	4 841,25	3 905,70	-
0,9	4 841,25	4 090,73	908,34
1	4 841,25	4 090,73	2 001,70

Tab. č. 20: Ušetřená tepelná energie v závislosti na měsíci a účinnosti

Čísla jsou pro měsíc leden, u vyšších účinností i v prosinci, stejná, jelikož není více energie v daném měsíci potřeba. To je vidět z Tab. č. 9.

Ušetřená elektrická energie:

$$E_{\eta m} = \frac{Q_{m\eta}}{TF_m} \quad (26)$$

Kde: $E_{\eta m}$ jsou úspory el. energie pro daný měsíc [kWh]

Q_m je tepelná energie využita v daném měsíci [kWh]

TF_m je topný faktor pro daný měsíc z Tab. č. 19 [-]

Celkové úspory E_η se vypočtou jako součet měsíčních úspor:

Účinnost	Úspory el. energie [kWh]			Celkové úspory E_η [kWh]
	Leden	Prosinec	Listopad	
0,5	2 063,25	235,38	-	2 298,63
0,6	2 063,25	646,77	-	2 710,01
0,7	2 063,25	1 058,15	-	3 121,40
0,8	2 063,25	1 469,53	-	3 532,78
0,9	2 063,25	1 539,15	290,87	3 893,27
1	2 063,25	1 539,15	640,99	4 243,40

Tab. č. 21: Úspory elektrické energie

Finanční úspory:

U tarifní sazby D57d je nízký tarif účtován 20 hodin denně a 4 hodiny denně je účtován vysoký tarif. Pro výpočet rozdělení elektřiny, která byla spotřebována ve vysokém, či nízkém tarifu stačí vynásobit celkové úspory poměrem časového zastoupení tarifu v průběhu dne.²³

Ceny energií jsou převzaty z ceníku E.ON Variant PRO s fixací ceny na dva roky 4/24 [102] a jsou včetně DPH

Cena elektřiny ve vysokém tarifu: $C_{VT} = 4\,627,55$ Kč/MWh

Cena elektřiny v nízkém tarifu: $C_{NT} = 4\,205,42$ Kč/MWh

$$U_{NT\eta} = E_{\eta} \cdot \frac{20}{24} \cdot C_{NT} \quad (27)$$

Kde: $U_{NT\eta}$ jsou úspory v nízkém tarifu pro danou účinnost [Kč]

E_{η} jsou celkové úspory el. energie akumulací pro danou účinnost [MWh]

C_{NT} je cena za elektřinu ve vysokém tarifu [Kč/MWh]

$$U_{VT\eta} = E_{\eta} \cdot \frac{4}{24} \cdot C_{VT} \quad (28)$$

Kde: $U_{VT\eta}$ jsou úspory ve vysokém tarifu pro danou účinnost [Kč]

C_{VT} je cena za elektřinu ve vysokém tarifu [Kč/MWh]

Celkové úspory financí (včetně DPH) díky akumulaci tepelné energie:

$$S_{\eta akum} = U_{NT\eta} + U_{VT\eta} \quad (29)$$

Kde: $S_{\eta akum}$ jsou celkové roční úspory pro danou účinnost [Kč]

Účinnost	$U_{NT\eta}$ [Kč]	$U_{VT\eta}$ [Kč]	Úspory akumulací pro danou účinnost $S_{\eta akum}$ [Kč]
0,5	8 055,59	1 772,84	11 892,39
0,6	9 497,29	2 090,12	14 020,77
0,7	10 939,99	2 407,40	16 149,14
0,8	12 380,70	2 724,69	18 277,51
0,9	13 644,04	3 002,72	20 142,58
1	14 871,06	3 272,76	21 954,01

Tab. č. 22: Úspory akumulací tepelné energie

Z výpočtu vychází roční úspora na energiích mezi 11 892,39 až 21 954,01 Kč v závislosti na účinnosti systému, což je úspora v rozmezí 26 až 48 % oproti platbám za energie při aktuálním systému (vypočtených v rovnici č. 32). Avšak v praxi je vypočítaný systém zatím nerealizovatelný pro obyčejný rodinný dům. A roční úspory peněz by pravděpodobně nedokázaly zajistit návratnost takového systému vzhledem k jeho ceně v rámci rozumného časového horizontu.

²³ Tento jednoduchý způsob rozdělení je poměrně přesný. Přesnost byla kontrolována srovnáním výpočtu s vyúčtováním elektřiny

5.4. Optimalizace toků energií

Optimalizace toků energií RD je rozhodující parametr ekonomiky provozu. Pokud se nebude využívat co nejvíce vyrobené elektřiny v objektu, ale bude se prodávat a např. TČ bude elektřinu na svůj provoz brát ze sítě, tak se výrazně sníží možné výnosy. Jednoduchou optimalizaci umožňuje samotný měnič FV, který rozhoduje o tom, jakým způsobem se bude elektřina vyrobená z FV využívat v rámci rozdělení energie mezi baterií s domem (podle nastaveného režimu měniče). Toto řízení ale nezahrnuje mnoho dalších parametrů, kterými se využívání domu vyznačuje.

Častým způsobem řízení toků energií bývá manuální ovládání majitelem nemovitosti. To je ale mentálně i časově náročné a hlídat si např. kdy budou spuštěny spotřebiče v závislosti na slunečním záření je v dlouhodobém měřítku téměř neudržitelné.

Jako ideální řešení se jeví automatizované řízení toků energií v domácnosti. Tuto možnost nabízí například produkt Infigy. Ten dokáže řídit celý systém RD a optimalizovat toky energií jednotlivým komponentům tak, aby celý systém pracoval co nejefektivněji. Využívá k tomu data o užívání domu, spotových cenách nebo o počasí (předpověď). Tímto systémem je možné efektivně využít až o 40 % více vyrobené energie. [103]

6. Ekonomická bilance

Ekonomická bilance pro systém tepelné čerpadlo – fotovoltaika – akumulace znamená hlavně výpočet návratnosti oproti předchozímu způsobu vytápění, čímž byl plynový kotel. Ten by se musel, kvůli svému stáří, vyměnit za nový. Do výpočtu návratnosti lze tedy započítat náklady na nový kondenzační kotel (včetně stavebních úprav) jako nutnou investici.

Pro výpočty jsou hodnoty uvedeny za rok. Data o spotřebě při využití kondenzačního kotle jsou stanovena z vyúčtování v období, kdy se pro vytápění využíval plynový kotel.

Pro cenu elektřiny volím ceník E.ON Variant PRO na 2 roky 4/24 [102]

Pro cenu plynu volím ceník E.ON Variant PRO na 2 roky 4/24 [102]

Pro cenu vykupované elektřiny volím ceník E.ON SimplePRO výroba [102]

Cena systému

Cena tepelného čerpadla:	$C_{T\check{c}}$	204 289	Kč
Cena FV elektrárny a baterie:	C_{FVE}	431 687	Kč
Dotace Nová zelená úsporám:	$D_{NZ\check{U}}$	200 000	Kč

Ceny za energie

Elektřina dodaná ze sítě NT:	E_{SNT}	6 286,75	kWh
Cena elektřiny NT:	C_{NT}	4,20542	Kč/kWh
Elektřina dodaná ze sítě VT:	E_{SVT}	1 257,35	kWh
Cena elektřiny VT:	C_{VT}	4,62755	Kč/kWh
Stálé platby za elektřinu ²⁴ :	K_{D57d}	571,01	Kč/měsíc
POZE:	Z	0,59895	Kč/kWh
Množství spáleného dřeva:	V_r	0,8	PRMR
Cena dřeva:	C_D	1 500	Kč/PRMS
Koeficient pro přepočítání PRMS na PRMR:	k_D	1,7	-

Výkup elektřiny

Množství přetoků:	$E_{přetok}$	3 549,9	kWh
Výkupní cena přetoků společností E.ON:	C_V	2	Kč/kWh

Alternativní výdaje při využití kondenzačního kotle²⁵

Cena kotle a stavebních úprav ²⁶ :	C_K	113 900	Kč
Roční spotřeba plynu:	E_P	28	MWh
Úspora plynu díky kondenzačnímu kotli [104]:	U_{PK}	0,15	-
Cena plynu:	C_P	1 695,23	Kč/MWh
Stálé platby za plyn:	K_P	451,51	Kč/měsíc
Spotřeba elektřiny:	E_{ELP}	2 000	kWh
Cena elektřiny při vytápění plynem:	C_{ELP}	6,21808	Kč/kWh
Stálé platby za elektřinu při vytápění plynem ²⁷ :	K_{D02d}	222,01	Kč/měsíc
POZE	Z	0,59895	Kč/kWh

²⁴ Počítáno s jističem 3x25 A

²⁵ Hodnoty spotřeby a ceny dřeva jsou totožné jako u nově instalovaného systému

²⁶ Vypočteno z internetové kalkulačky [106]

²⁷ Počítáno s jističem 1x25 A

Výpočet prosté návratnosti nově instalovaného systému

Cena nově instalovaného systému při odečtení nákladů, které by byly nutné při vytápění plynem a dotací

$$C_{syst} = C_{T\check{c}} + C_{FVE} - D_{NZ\check{U}} - C_K \quad (30)$$
$$C_{syst} = 204\,289 + 431\,687 - 200\,000 - 113\,900 = 322\,076 \text{ Kč}$$

Kde: C_{syst} je cena za nově nainstalovaný systém vytápění při odečtu nutných nákladů a dotací [Kč]

Platby za energie při využití kondenzačního kotle

$$C_{plyn} = (1 - U_{Pk}) \cdot E_P \cdot C_P + E_{ELP} \cdot (C_{ELP} + Z) + 12 \cdot (K_P + K_{D02d}) + V_r \cdot C_D \cdot k_D \quad (31)$$

$$C_{plyn} = (1 - 0,15) \cdot 28 \cdot 1\,695,23 + 2\,000 \cdot (6,21808 + 0,59895) + 12 \cdot (451,51 + 222,02) + 0,8 \cdot 1\,500 \cdot 1,7$$

$$C_{plyn} = 64\,102,98 \text{ Kč}$$

Kde: C_{plyn} jsou roční platby za energie (a s nimi spojené) při využití plynu [Kč/rok]

Platby za energie při využití nainstalovaného systému

$$C_{T\check{c},FVE,ak} = E_{SNT} \cdot (C_{NT} + Z) + E_{SVT} \cdot (C_{VT} + Z) + 12 \cdot K_{D57d} + V_r \cdot C_D \cdot k_D \quad (32)$$

$$C_{T\check{c},FVE,ak} = 6\,286,75 \cdot (4,20542 + 0,59895) + 1\,257,35 \cdot (4,62755 + 0,59895) + 12 \cdot 571,01 + 0,8 \cdot 1\,500 \cdot 1,7$$

$$C_{T\check{c},FVE,ak} = 45\,667,53 \text{ Kč}$$

Kde: $C_{T\check{c},FVE,ak}$ jsou roční platby za energie (a s nimi spojené) nového syst. [Kč/rok]

Výdělky z FV prodejem přetoků dle rovnice č. 22

$$F = E_{přetok} \cdot C_V = 3549,9 \cdot 2 = 7\,099,8 \text{ Kč}$$

Návratnost nově instalovaného systému oproti vytápění plynem

$$T = \frac{C_{syst}}{C_{plyn} - C_{T\check{c},FVE,ak} + F} \quad (33)$$

$$T = \frac{322\,076}{64\,102,98 - 45\,667,53 + 7\,099,8} = 12,61 \text{ let}$$

Kde: T je čas návratnosti systému oproti vytápění plynem [rok]

Prostá návratnost nově instalovaného systému (z hlediska investice soukromé osoby nemá cenu uvažovat časovou hodnotu peněz) je zhruba 12,6 let oproti vytápění a ohřevu vody kondenzačním kotlem. Vzhledem k poměrně krátké době návratnosti, nepravidelnému znečištění panelů, velmi krátké době pozorování (která není náklonná přesnosti) a získání části pozorování simulací (jejíž přesnost také není 100%), nebylo nutné počítat s časovou degradací panelů, která je dle výrobce garantovaná na 0,55 %/rok na dobu 25 let [87]. Po uplynutí doby návratnosti tedy budou mít panely 93,06 % své původní účinnosti. Zahrnutí degradace by umožnilo získat přesnější výsledky. Návratnost by po započtení degradace byla mírně delší. Kromě těchto faktorů nelze předvídat budoucí ceny energií, a proto nelze návratnost určit přesně.

Kromě finanční stránky je nutno do zhodnocení zahrnout i ostatní důvody investice, jako jsou enviromentální důvody či geopolitická situace. Tyto důvody ale nelze vyčíslit a je na každém člověku, aby jejich důležitost zvažil sám.

Návratnost při využití virtuální baterie

Tato kapitola se zabývá návratností systému při využití virtuální baterie. Výpočty z této kapitoly se od výpočtů předchozí liší jen v tom, že veškeré přetoky se v poměru, v jakém jsou v průběhu dne zastoupeny, odečtou od elektrické energie spotřebované ve vysokém a nízkém tarifu. Ceny pro el. energii jsou tentokrát brány z ceníku ČEZ [100].

Celkové přetoky:	$E_{přetok}$	3 549,9 kWh
Cena elektřiny v NT při využití virtuální baterie:	C_{NTv}	4,81768 Kč/kWh
Cena elektřiny ve VT při využití virtuální baterie:	C_{VTv}	5,05226 Kč/kWh
Obchodní část ceny elektřiny:	C_O	3,9809 Kč/kWh
Stálé platby za elektřinu při využití virtuální baterie:	K_{D57dv}	999,63 Kč/měsíc

Platby za energii při využití nainstalovaného systému

$$C_{TČ,FVE,virt} = E_{SNT} \cdot (C_{NT} + Z) + E_{SVT} \cdot (C_{VT} + Z) - E_{přetok} \cdot C_O + 12 \cdot K_{D57dv} + V_r \cdot C_D \cdot k_D \quad (34)$$

$$C_{TČ,FVE,virt} = 6\,286,75 \cdot (4,20542 + 0,59895) + 1\,257,35 \cdot (4,62755 + 0,59895) - 3\,549,9 \cdot 3,9809 + 12 \cdot 999,63 + 0,8 \cdot 1\,500 \cdot 1,7$$

$$C_{TČ,FVE,ak\ virt} = 36\,640,74 \text{ Kč}$$

Kde: $C_{TČ,FVE,virt}$ jsou roční platby za energii (a s nimi spojené) s virt. baterií [Kč/rok]

Návratnost nově instalovaného systému oproti vytápění plynem při využití virtuální baterie

$$T_{virt} = \frac{C_{syst}}{C_{plyn} - C_{TČ,FVE,virt}} = \frac{322\,076}{64\,102,98 - 36\,640,74} = 11,73 \text{ let} \quad (35)$$

Kde: T_{virt} je čas návratnosti systému s virt. baterií oproti vytápění plynem [rok]

Nově instalovaný systém si na sebe vydělá za 11,7 let oproti vytápění a ohřevu vody kondenzačním kotlem, pokud místo prodeje elektřiny využije virtuální baterii. Ze stejných důvodů jako ve výpočtu návratnosti bez virtuální baterie neuvažují amortizaci panelů

Srovnání virtuální baterie a prodeje elektřiny – bod zvratu

Tato kapitola se zabývá zjištěním ceny elektřiny, při které by její prodej byl výhodnější, než-li využití virtuální baterie.

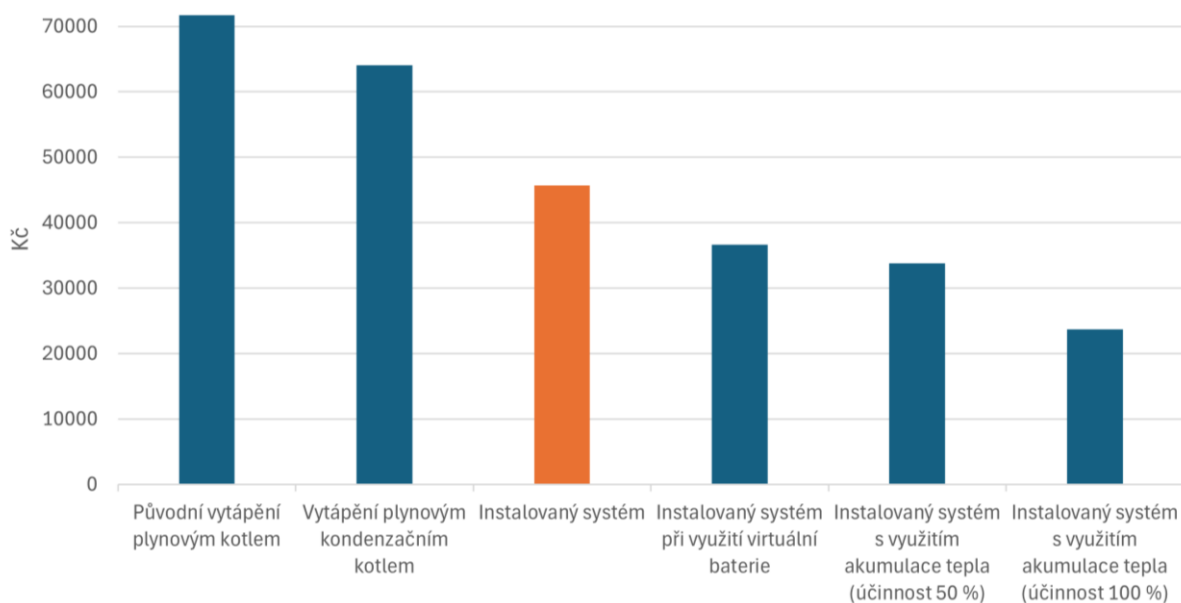
$$C_{ZV} = \frac{(C_{syst}/T_{virt}) - C_{plyn} + C_{T\check{c},FVE,ak}}{E_{p\check{r}etok}} \quad (36)$$

$$C_{ZV} = \frac{(233\,076/11,73) - 64\,102,98 + 45\,667,53}{3\,549,9} = 2,543 \text{ Kč}$$

Kde: C_{ZV} je bod zvratu ceny prodejní elektřiny [Kč/kWh]

Srovnání plateb za energie při různých systémech

Graf č. 1 Graf č. 9 vizualizuje srovnání ročních nákladů na energie různých systémů a jejich konfigurací. Díky nově instalovanému systému se ušetří okolo 36% ročních nákladů oproti původnímu systému vytápění plynovým kotlem.



Graf č. 9: Srovnání plateb za energie

7. Závěr

Úvodní část práce se věnuje rešerši jednotlivých součástí systému tepelné čerpadlo-fotovoltaika-akumulace z pohledu principu fungování, typů, součástí a faktorů ovlivňujících jejich účinnost.

Volně navazující praktická část práce je věnována zhodnocení nově instalovaného systému vytápění tepelným čerpadlem, získávání elektřiny fotovoltaickým generátorem s akumulací do baterie ve starším rodinném domě, jehož vytápění bylo dosud plně závislé na zemním plynu. Jelikož tepelné čerpadlo zaznamenává data až od června roku 2023 a fotovoltaice bylo umožněno fungovat s plným výkonem až v srpnu 2023, nebylo možno získat veškerá data v rámci celého roku, z důvodu termínu odevzdání práce. Pro chybějící data z tepelného čerpadla byla provedena aproximace pomocí okolních měsíců. Chybějící data z fotovoltaické elektrárny nebylo možno aproximovat stejným způsobem, a proto bylo využito simulace výkonu fotovoltaického generátoru v programu PV*SOL premium. Data získaná prostřednictvím simulace se ukázala být v souladu s daty získanými během měsíců, kdy probíhalo měření fotovoltaické elektrárny.

Tato data umožnila simulovat roční výkon fotovoltaického systému a provést jeho zhodnocení. Následovala optimalizace systému s využitím virtuální baterie a akumulace tepla. Varianta s akumulací tepla by mohla přinést větší finanční úspory, avšak v současnosti neexistuje metoda uchování tepla, která by byla aplikovatelná v rodinném domě v takovém rozsahu, jaký je v této práci předpokládán.

Poslední část práce se zabývá zjištěním návratnosti celého nově instalovaného systému při odečtení nákladů na pořízení kondenzačního kotle, který by jinak musel být instalován. Návratnost aktuálního systému podle výpočtu vychází na 12,6 let. Pokud by byla využita virtuální baterie, tak by návratnost klesla o 11 měsíců na 11,7 let. Zajímavým zjištěním je, že rozdíl návratnosti při prodeji nadbytečně vyrobené elektrické energie a při uchování téže energie pomocí virtuální baterie není v současnosti zase tolik výrazný při výkupní ceně elektřiny 2 Kč/kWh. Prodej elektřiny by se oproti virtuální baterii vyplatil při výkupní ceně vyšší než 2,54 Kč/kWh. Lze tedy konstatovat, že pro starší částečně zateplený rodinný dům je instalace uvedeného systému tepelné čerpadlo-fotovoltaická elektrárna-akumulace výhodná z hlediska spotřeby energií celého rodinného domu.

8. Seznam použitých zdrojů

- [1] DVOŘÁK, Zdeněk, Luděk KLAZAR a Jiří PETRÁK. *Tepelná čerpadla*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987, 339 s. : il. TČ: L12-B3-IV-31/22902.
- [2] *Galerie osobností - Muzeum Novojičínska* [online]. 2022, 7.12.2022 [cit. 2023-11-08]. Dostupné z: <https://galerieosobnosti.muzeumnj.cz/peter-von-rittinger>
- [3] ZOGG, Martin. *Geschichte der Wärmepumpe - Schweizer Beiträge und internationale Meilensteine* [online]. CH-3414. Oberburg: Oberburg, Zogg - Verfahrens- und Energietechnik, 2009, 2009 [cit. 2023-11-07]. ISBN 978-3-033-02154-9. Dostupné z: <https://www.zogg-engineering.ch/>
- [4] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Global heat pump sales continue double-digit growth* [online]. 2023, 31 March 2023 [cit. 2023-11-08]. Dostupné z: <https://www.iea.org/commentaries/global-heat-pump-sales-continue-double-digit-growth>
- [5] SRDEČNÝ, Karel a Jan TRUXA. *Tepelná čerpadla*. Brno: ERA, 2005. 21. století. ISBN 80-736-6031-8.
- [6] Heat Pump COP and SCOP: What They Mean and Why They Matter. MOUSDELL, Jonathan. H2X. *H2xengineering* [online]. c2023 [cit. 2023-11-09]. Dostupné z: <https://www.h2xengineering.com/blogs/heat-pump-cop-and-scop-what-they-mean-and-why-they-matter/>
- [7] ŠTĚTINA, Josef. VUT: FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ: ENERGETICKÝ ÚSTAV. *OBĚHY CHLADÍCÍCH ZAŘÍZENÍ* [PDF]. 31.8.2020. 2020, 16 s. [cit. 2023-11-19]. Přednáška.
- [8] KREJSA, Petr. *TEPELNÉ ČERPADLO VZDUCH - VODA*. Brno, 2017. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ, ENERGETICKÝ ÚSTAV.
- [9] QUASHNING, Volker. *Renewable energy and climate change*. 2nd ed. Hoboken, New Jersey, USA : Wiley ; Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2020. ISBN 978-1-119-51486-2.
- [10] ELECTRICALWORKBOOK. *What is Scroll Compressor? Working, Construction & Diagram* [online]. 2021 [cit. 2024-01-23]. Dostupné z: <https://electricalworkbook.com/scroll-compressor/>
- [11] *8th International Conference on compressors and their Systems 2013: 9-10 September 2013, City University, London UK*. Oxford: Woodhead Publishing, 2013. ISBN 978-178-2421-696.
- [12] QUASCHNING, Volker a Václav BARTOŠ. *Obnovitelné zdroje energií*. Praha: Grada, 2010, 296 s. : il., mapy. ISBN 978-80-247-3250-3.
- [13] GEELLEN, Charles a René VAN GERWEN. *Natural refrigerants in heat pumps: Study into the current position of natural refrigerants in heat pumps and the expectations for the future*. 2021. Dostupné také z:

https://topsectorenergie.nl/documents/610/Natural_refrigerants_in_heat_pumps_ENG_version_-_december_2022.pdf

- [14] MOTA-BABILONI, Adrián, Joaquín NAVARRO-ESBRÍ, Pavel MAKHNATCH a Francisco MOLÉS. *Refrigerant R32 as lower GWP working fluid in residential air conditioning systems in Europe and the USA* [PDF]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 80. 2017 [cit. 2023-11-14]. ISSN 1364-0321. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117308559?via%3Dihub>
- [15] ŽERAVÍK, Antonín. *Stavíme tepelné čerpadlo: [návratnost i za jeden rok]*. Přerov: Antonín Žeravík, 2003, 311 s. : il. ISBN 80-239-0275-X.
- [16] POSPÍŠIL, Jiří. VUT, FSI. *Výukové materiály z předmětu Obnovitelné zdroje energie* [online]. 2015 [cit. 2024-01-23].
- [17] THE INTERNATIONAL ADSORPTION SOCIETY. What is Adsorption? THE INTERNATIONAL ADSORPTION SOCIETY. *Welcome to the web site of the International Adsorption Society (IAS)* [online]. [2022] [cit. 2024-02-23]. Dostupné z: <https://www.int-ads-soc.org/what-is-adsorption/>
- [18] DEMIR, Hasan, Moghtada MOBEDI a Semra ÜLKÜ. A review on adsorption heat pump: Problems and solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008, **2008**(Volume 12, 9), 2381-2403. ISSN 1364-0321.
- [19] *Globální oteplování země*. Brno: VUTIUM, 2008. ISBN 978-80-214-3498-1.
- [20] RYŠKA, Jiří. Vrty do horninového masivu - zdroj energie pro tepelná čerpadla (V): Horniny jako zdroj tepla. *Alternativní energie*. 2005, **2005**(5), Kapitola 5.
- [21] VYUŽITÍ TEPLA ZEMĚ. *Transformační technologie* [online]. c2020, n/a(n/a), 5 [cit. 2024-02-23]. ISSN 1804-8293. Dostupné z: https://www.transformacni-technologie.cz/08_vyuziti-tepla-zeme_1-cast.pdf
- [22] ALLAERTS, K, M COOMANS a R SALENBIEN. Hybrid ground-source heat pump system with active air source regeneration. *Energy Conversion and Management*. 2015, **2015**(90), 230-237. ISSN 0196-8904.
- [23] ČVUT KATEDRA TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV. PRINCIP TEPELNÉHO ČERPADLA. ČVUT. *Katedra technických zařízení budov K11125* [online]. b.r. [cit. 2023-11-29]. Dostupné z: <https://tzb.fsv.cvut.cz/podklady/vyt/tepcerp/>
- [24] TECHNICKÝ TÝDENÍK. Geotermální energie: stojíme v České republice o teplo z hlubin? *Technický týdeník* [online]. 2006 [cit. 2023-11-29]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/geotermalni-energie-stojime-v-ceske-republice-o-teplo-z-hlubin_18884.html
- [25] ENERGY SAVER. Heat Pump Systems. *ENERGY.GOV* [online]. n/a [cit. 2024-02-23]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/energysaver/heat-pump-systems>
- [26] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE). *Air-Source Heat Pumps* [online]. [2023] [cit. 2024-01-22]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/energysaver/air-source-heat-pumps>

- [27] Monobloc heat pump with R-32 refrigerant. *World Pumps*. 2021, **2021**, 4. ISSN 0262-1762.
- [28] GUSTAFSSON, Ola, Caroline HAGLUND STIGNOR a Jan-Olof DALENBÄCK. Heat exchanger design aspects related to noise in heat pump applications. *Applied Thermal Engineering*. 2016, **2016**(93), 742-749. ISSN 1359-4311.
- [29] HEN, Jiubing, Zhaojun QIAN, Ziwen XING, Yue YU a Meicai GE. A review of the defrosting methods of air source heat pumps using heat exchanger with phase change material. *Energy Procedia*. 2019, **2019**(160), 491-498. ISSN 1876-6102.
- [30] KREJSA, PETR. *PLYNOVÁ TEPELNÁ ČERPADLA*. Brno, 2015. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ, ENERGETICKÝ ÚSTAV.
- [31] KUSALA, Jaroslav. SKUPINA ČEZ. *Bequerelové* [online]. 2006 [cit. 2024-01-26]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/eede/content/microsites/solarni/f6.htm>
- [32] FRITTS, Charles E. On a New Form of Selenium Cell, and Some Electrical Discoveries Made by Its Use. *American Journal of Science*. 1883, **1883**(s3-26 (156), 465-472.
- [33] BOJEK, Piotr. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Solar PV* [online]. 2023, Last update on 11 July 2023 [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv#tracking>
- [34] TURGEON, Andrew, Elizabeth MORSE a Mary CROOKS, EVERS, Jeannie a EMDASH EDITING, ed. NATIONAL GEOGRAPHIC SOCIETY. *Solar Energy* [online]. 2023, October 19, 2023 [cit. 2024-01-27]. Dostupné z: <https://education.nationalgeographic.org/resource/solar-energy/>
- [35] HASELHUHN, Ralf. *Fotovoltaika: budovy jako zdroj proudu*. Ostrava: HEL, 2011. ISBN 978-80-86167-33-6.
- [36] NATIONAL TECHNOLOGY AND ENGINEERING SOLUTIONS OF SANDIA, LLC. Air Mass. NATIONAL TECHNOLOGY AND ENGINEERING SOLUTIONS OF SANDIA, LLC. *SCANDIA.GOV* [online]. c2024 [cit. 2024-02-23]. Dostupné z: <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-guide/1-weather-design-inputs/irradiance-insolation/air-mass/>
- [37] CIHELKA, Jaromír. *Solární tepelná technika*. Praha: Nakladatelství T. Malina, 1994. ISBN 80-900759-5-9.
- [38] HOJCSKOVÁ, Pavlína. Fotoelektrický jev. *Webový portál PET - SPECT* [online]. c2009 [cit. 2024-02-23]. Dostupné z: <http://pet-spect.fbmi.cvut.cz/spect/index.php/fyzikalni-zakony/interakce-fotonu-s-hmotou/fotoelektricky-jev.html>
- [39] KHAN ACADEMY. Fotoelektrický jev. KHAN ACADEMY. *Khan Academy* [online]. c2024 [cit. 2024-02-23]. Dostupné z: <https://cs.khanacademy.org/science/obecna-chemie/xefd2aace53b0e2de:atomy-a-jejich-vlastnosti/xefd2aace53b0e2de:fotoelektronova-spektroskopie/a/photoelectric-effect>
- [40] MURTINGER, Karel, Jiří BERANOVSKÝ a Milan TOMĚŠ. *Fotovoltaika, elektřina ze slunce*. 2. vyd. Brno: ERA, 2008. ISBN 978-80-7366-133-5.

- [41] JIHOČESKÁ UNIVERZITA. *Přechod PN* [online]. c2024 [cit. 2024-01-27]. Dostupné z: <https://old.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/prof/SERYM/principy/polovodice/polovodice02.html>
- [42] NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. Interactive Best Research-Cell Efficiency Chart. NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. *National Renewable Energy Laboratory* [online]. 2023, 28.1.2024 [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/pv/interactive-cell-efficiency.html>
- [43] ZANATTA, A.R. The Shockley–Queisser limit and the conversion efficiency of silicon-based solar cells. *Results in Optics*. 2022, **2022**(9), n/a. ISSN 2666-9501.
- [44] PASTUSZAK, J. a P. WĘGIEREK. Photovoltaic Cell Generations and Current Research Directions for Their Development. *Materials: Advances in Photovoltaic Materials*. 2022, **2022**(15), 5542. ISSN 1996-1944.
- [45] IKERI, H.I a Augustine ONYIA. Investigation Of Optical Characteristics Of Semiconductor Quantum Dots For Multi Junction Solar Cells Applications. *International Journal of Scientific & Technology Research*. 2019, **2019**(8,10), 3531-3535. ISSN 2277-8616.
- [46] MEKHILEF, S., R. SAIDUR a M. KAMALISARVESTANI. Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012, **2012**(Volume 16, 5), 2920-2925. ISSN 1364-0321.
- [47] RAYYAN, A.M. WIND EFFECT ON SOLAR PANELS. AE ALTERNATIVE ENERGY GMBH. *AESOLAR* [online]. c2022 [cit. 2024-02-23]. Dostupné z: <https://aesolar.com/wind-effect-on-solar-panels/>
- [48] PANJWANI, Manoj Kumar a Ghous Bukshsh NAREJO. Effect of Humidity on the Efficiency of Solar Cell (photovoltaic). *International Journal of Engineering Research and General Science*. 2014, **2014**(Volume 2, 4), 499-503. ISSN 2091-2730.
- [49] DUBEY, Swapnil, Jatin Narotam SARVAIYA a Bharath SESHADRI. ENERGY PROCEDIA. *Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World – A Review* [online]. 2013. Volume 33. Singapore, 2013, 311-321 [cit. 2024-01-28]. ISSN 1876-6102. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.072>.
- [50] DAMBHARE, Mugdha V, Bhavana BUTEY a S V MOHARIL. Solar photovoltaic technology: A review of different types of solar cells and its future trends. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, **2021**(1913), 012053.
- [51] KHARE, Ayush. A critical review on the efficiency improvement of upconversion assisted solar cells. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021, **2020**(821), 153214. ISSN 0925-8388.
- [52] What is the Difference Between Polycrystalline and Monocrystalline Solar Panels. In: NATURE'S GENERATOR. *Nature's Generator* [online]. 2023 [cit. 2024-02-01]. Dostupné z: https://naturesgenerator.com/cdn/shop/articles/Mon...Polycrystalline_Panel.jpg?v=1680199748&width=1000

- [53] Fraunhofer ISE Develops the World's Most Efficient Solar Cell with 47.6 Percent Efficiency. In: FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS ISE. *Fraunhofer ISE* [online]. 2022, 30.5.2022, 30.5.2022 [cit. 2024-02-02]. Dostupné z: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2022/fraunhofer-ise-develops-the-worlds-most-efficient-solar-cell-with-47-comma-6-percent-efficiency.html>
- [54] EB, Kamran, Waqar UDDIN, Muhammad Adil KHAN, Zunaib ALI, Muhammad UMAIR ALI, Nicholas CHRISTOFIDES a H.J. KIM. A comprehensive review on inverter topologies and control strategies for grid connected photovoltaic system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018, **2018**(94), 1120-1141. ISSN 1364-0321.
- [55] MAULE, P. Hodnocení fotovoltaických systémů a jejich zapojení MAULE, P. *Energie-21*. 2019, **2019**(5), 14 až 16. ISSN 1803-0394.
- [56] THE PENNSYLVANIA STATE UNIVERSITY. Efficiency of Inverters. *Penn State* [online]. c2023 [cit. 2024-02-26]. Dostupné z: <https://www.e-education.psu.edu/eme812/node/738>
- [57] ROGALEV, Nikolay, Andrey ROGALEV, Vladimir KINDRA, Vladimir NAUMOV a Igor MAKSIMOV. Comparative Analysis of Energy Storage Methods for Energy Systems and Complexes. *Energies* [online]. 2022, **15**(24) [cit. 2024-02-26]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en15249541
- [58] VOJTA, Jan. *Přehled technologií pro akumulaci energie*. Plzeň, 2022. Bakalářská práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ, KATEDRA VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY A STROJŮ.
- [59] BLABLA, Ondřej. *AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE PRO RD*. Brno, 2016. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ, ENERGETICKÝ ÚSTAV.
- [60] *Dictionnaire de l'energie*. Paříž: Jouve systemes d'information, 1992. ISBN 9782909832005.
- [61] HUGGINS, Robert A. (Robert Alan) a Robert A HUGGINS. *Energy storage: fundamentals, materials and applications*. Second edition. Cham ; Heidelberg ; New York ; Dordrecht ; London: Springer, 2016, xxxviii, 509 stran : ilustrace ; 24 cm. ISBN 978-3-319-21238-8.
- [62] UNIVERSITY OF WASHINGTON, CLEAN ENERGY INSTITUTE. Lithium-Ion Battery. *Clean Energy Institute - University of Washington* [online]. c2020 [cit. 2024-02-26]. Dostupné z: <https://www.cei.washington.edu/research/energy-storage/lithium-ion-battery/>
- [63] Key Challenges for Grid-Scale Lithium-Ion Battery Energy Storage. HUANG, Y. a J. LI. *Advanced Energy Materials* [online]. 2022, **2022**(12), n/a [cit. 2024-02-12]. ISSN 1614-6832. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1002/aenm.202202197>
- [64] HUJŇÁK, Jan. *STUDIE MATERIÁLŮ PRO LI-ION AKUMULÁTORY POMOCÍ ELEKTRONOVÉ MIKROSKOPIE*. BRNO, 2020. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ, ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE.

- [65] CHAWLA, Neha, Neelam BHARTI a Shailendra SINGH. Recent Advances in Non-Flammable Electrolytes for Safer Lithium-Ion Batteries. *Batteries*. 2019, **2019**(5), a/n.
- [66] KATO, M., B. SABATINI, S. KASHIWAKURA, S. KOSAI a E. YAMASUE. Lead-acid batteries (LABs) and the thermogravimetric analysis of Pb metal reduction from PbO₂ via microwave heating at 2.45 GHz. *Cleaner Engineering and Technology* [online]. **2023**(vol. 13), n/a [cit. 2024-03-01]. ISSN 26667908. Dostupné z: doi:10.1016/j.clet.2023.100619
- [67] PAVLOV DETCHKO. *Lead-Acid Batteries - Science and Technology - A Handbook of Lead-Acid Battery Technology and its Influence on the Product*. Ilustrováno. Elsevier, 2011. ISBN 0444528822.
- [68] KOEHLER, Uwe, JÜRGEN, Jürgen a Klaus BRANDT, ed. *Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications: Uwe Koehler; Chapter 2 - General Overview of Non-Lithium Battery Systems and their Safety Issues*. Elsevier, 2018. ISBN 9780444637772.
- [69] MANIMEKALAI, P., R. HARIKUMAR a S. RAGHAVAN. An Overview of Batteries for Photovoltaic (PV) Systems. *International Journal of Computer Applications*. 2013, **2013**(Volume 82, 12), 28-32.
- [70] LOURENSSEN, Kyle, James WILLIAMS, Faraz AHMADPOUR, Ryan CLEMMER a Syeda TASNIM. Vanadium redox flow batteries: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*. 2019, **2019**(25), n/a. ISSN 2352-152X.
- [71] JI, Mengdi a Jianlong WANG. Review and comparison of various hydrogen production methods based on costs and life cycle impact assessment indicators. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021, **2021**(Volume 46, 78), 38612-38635. ISSN 0360-3199.
- [72] KNOSALA, Kevin, Leander KOTZUR, Fritz T.C. RÖBEN, Peter STENZEL, Ludger BLUM, Martin ROBINIUS a Detlef STOLTEN. Hybrid Hydrogen Home Storage for Decentralized Energy Autonomy. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021, **2021**(Volume 46, 42), 21748-21763. ISSN 0360-3199.
- [73] KEINER, Dominik, Christian THOMA, Dmitrii BOGDANOV a Christian BREYER. Seasonal hydrogen storage for residential on- and off-grid solar photovoltaics prosumer applications: Revolutionary solution or niche market for the energy transition until 2050? *Applied Energy*. 2023, **2023**(340), n/a. ISSN 0306-2619.
- [74] SHIVA KUMAR, S. a V. HIMABINDU. Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies*. 2019, **2019**(Volume 2, 3), 442-454. ISSN 2589-2991.
- [75] BAMISILE, Olusola, Zhou ZHENG, Humphrey ADUN, Dongsheng CAI, Ni TING a Qi HUANG. Development and prospect of flywheel energy storage technology: A citespace-based visual analysis. *Energy Reports*. 2023, **2023**(Volume 9, Supplement 10), 494-505. ISSN 2352-4847.
- [76] NICHOLAS GILMORE, Nicholas Gilmore, Thomas Britz THOMAS BRITZ, Erik Maartensson ERIK MAARTENSSON, Carlo Orbegoso-Jordan CARLO ORBEGOSO-JORDAN, Sebastian Schroder SEBASTIAN SCHRODER a Martino Malerba MARTINO

- MALERBA. Continental-scale assessment of micro-pumped hydro energy storage using agricultural reservoirs. *Applied Energy*. 2023, **2023**(349), n/a. ISSN 0306-2619.
- [77] MARTINÁK, Rostislav. *VYUŽITÍ STLAČENÉHO VZDUCHU PRO AKUMULACI ELEKTRICKÉ ENERGIE*. BRNO, 2010. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ, ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY.
- [78] BAŠTA, Vít, Jan ŠPALE, Miroslav RATHAN, Martin HOFMAN, Michal KASAN a Václav NOVOTNÝ. Skladování elektřiny prostřednictvím tepla aneb Carnotovy baterie 1. díl – principy a přehled. *Tzbinfo* [online]. 2020 [cit. 2024-02-14]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elekriny/21610-skladovani-elekriny-prostrednictvim-tepla-aneb-carnotovy-baterie-1-dil-principy-a-prehled>
- [79] *FlexTherm Eco – kompaktní tepelná baterie pro akumulaci tepelné energie k přípravě teplé vody* [online]. 2023 [cit. 2024-02-14]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/priprava-teple-vody/25157-flextherm-eco-kompaktni-tepelna-baterie-pro-akumulaci-tepelne-energie-k-priprave-teple-vody>
- [80] AALBERTS NV. *FlexTherm Eco* [online]. c2024 [cit. 2024-02-14]. Dostupné z: <https://flamco.aalberts-hfc.com/cz/pageid/landingpage-flextherm-eco>
- [81] KOTEK, Petr. TEPELNÁ ZTRÁTA DOMU ZE SPOTŘEBY PLYNU. REFSITE. *Tepelné ztráty* [online]. n/a [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: <https://tools.refsite.info/tepelne-ztraty.html>
- [82] OMES, Michael. HŘIŠTĚ. *Přibyslav* [online]. 2007, 31.3.2024 [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: <https://www.pribyslav.cz/hriste/d-56660>
- [83] INMETEO, S.R.O. Jihlava. *In-počasí* [online]. c2024 [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: <https://www.in-pocasi.cz/archiv/jihlava/>
- [84] Přibyslav. *In-počasí* [online]. c2024 [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: <https://www.in-pocasi.cz/archiv/pribyslav/>
- [85] VALENTIN SOFTWARE GMBH. *PV*SOL online* [online]. 2023 [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: <https://pvsol-online.valentin-software.com/#/>
- [86] Projekt detail - Jihlava. SOLARGIS. *GLOBAL SOLAR ATLAS* [online]. c2024 [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: <https://globalsolaratlas.info/detail?c=48.283193,14.644775,7&s=49.398463,15.5896&m=site&pv=small,180,36,1>
- [87] JA SOLAR. *JAM72S20 445-470/MR/1500V: 470 W MBB Half-Cell Module* [PDF]. N/a. n/a. Dostupné také z: <https://www.jasolar.com/uploadfile/2023/0208/20230208050346724.pdf>
- [88] THINKPOWER. *Three Phase Hybrid Inverter* [online]. N/a. n/a [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: <https://www.thinkpower.com.cn/uploads/EPH4KTL-EPH12KTL-Spec.pdf>
- [89] *CLH10KWH-192* [online]. n/a [cit. 2024-04-29]. Dostupné z: <https://mysolaris.gr/PDF/Cooli-192V50AH-Datasheet.pdf>

- [90] Ecodan DATABOOK R32. MITSUBISHI. *Mitsubishi electric* [online]. c2024 [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: https://library.mitsubishielectric.co.uk/pdf/book/ATW_Databook_R32_2020#page-80-81
- [91] ZÁSObNÍKY TEPLÉ VODY - STACIONÁRNÍ NEPŘÍMOTOPNÉ. *Koupelny Ptáček* [online]. c2016-2021 [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: https://www.koupelny-ptacek.cz/amfilerating/file/download/file_id/9795366/
- [92] JØTUL. JØTUL F 3 TD. *Jøtul* [online]. 2017 [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: https://intl.jotul.com/sites/importers/files/products/Manual_F_3TD_10025494_P07_311017.pdf
- [93] Výhřevnosti a měrné jednotky palivového dřeva. *Tzbinfo* [online]. c2001-2024 [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/12-vyhrevnosti-a-merne-jednotky-palivoveho-dreva>
- [94] HODBOŇ, Josef. K získání sazby elektřiny D57d pro tepelné čerpadlo a elektrické vytápění vede více cest. *Tzb-info* [online]. c2001-2024 [cit. 2024-04-15]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/24249-k-ziskani-sazby-elektriny-d57d-pro-tepelne-cerpadlo-a-elektricke-vytapani-vede-vice-cest>
- [95] ČHMÚ. Měsíční a roční data dle zákona 123/1998 Sb. *Český hydrometeorologický ústav* [online]. [2023] [cit. 2024-04-16]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/denni-data/Denni-data-dle-z.-123-1998-Sb>
- [96] PV*SOL premium. *Valentin Software* [online]. n/a [cit. 2024-05-01]. Dostupné z: <https://valentin-software.com/en/products/pvsol-premium/>
- [97] Optimální orientace a sklon solárních panelů. In: *Solární Experti* [online]. 2023 [cit. 2024-04-16]. Dostupné z: <https://www.solarniexperti.cz/idealni-orientace-a-sklon-solarnich-panelu/>
- [98] JA SOLAR PV MODULES INSTALLATION MANUAL. *JA SOLAR* [online]. c2020 [cit. 2024-04-16]. Dostupné z: <https://www.jasolar.com/index.php?m=content&c=index&a=lists&catid=70>
- [99] E.ON ENERGY, A.S. Virtuální baterie k fotovoltaice. *E.ON* [online]. [2024] [cit. 2024-04-29]. Dostupné z: <https://www.eon.cz/domacnosti/usporne-technologie/solar/virtualni-baterie-k-fotovoltaice/>
- [100] ČEZ, A.S. Elektřina pro soláry. *Skupina ČEZ* [online]. c2024 [cit. 2024-04-29]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/technologie/fotovoltaika/elektrina-pro-solary#lead>
- [101] Ceníky - ČEZ. *ČEZ* [online]. c2024 [cit. 2024-04-29]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/podpora/ceniky.html?commodity=ele>
- [102] Ceníky - E.ON. *E.ON* [online]. [2024] [cit. 2024-04-29]. Dostupné z: <https://www.eon.cz/vyrobci-elektriny/zakaznicka-pece/ceniky/>
- [103] *Infígy* [online]. c2024 [cit. 2024-04-29]. Dostupné z: <https://infigy.cz/>

- [104] VALENTA, Vladimír. Kondenzační kotel pro každého. *Tzbinfo* [online]. c2001-2024 [cit. 2024-05-01]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-plynem/904-kondenzacni-kotel-pro-kazdeho-v>
- [105] IBC SOLAR. New module technologies: LHS, half-cut, MBB. *IBC SOLAR Blog* [online]. c2024 [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: <https://blog.ibc-solar.com/2018/09/new-module-technologies-lhs-half-cut-mbb/>
- [106] Kalkulačka. VEISSMAN, SPOL. S R.O. *ChciKotel* [online]. c2024 [cit. 2024-05-01]. Dostupné z: <https://www.chcikotel.cz/kalkulacka/>
- [107] HVÍŽĎALA, Jiří. SD do tep. čerpadla [elektronická pošta]. Message to: honzaboj@gmail.com. 10. 11. 2023 13:59 [cit. 2024-05-23]. Osobní komunikace

9. Seznam použitých zkratek a symbolů

Seznam zkratek

Označení	Legenda
TČ	Tepelné čerpadlo
TF	Topný faktor
COP	Coefficient of Performance – topný faktor
SCOP	Seasonal Coefficient of Performance – topný faktor v průběhu celé topné sezóny
GWP	Global Warming Potential – potenciál globálního oteplování
TUV	Teplá užitková voda
GHP	Gas Heat Pump – plynová tepelná čerpadla
FV	Fotovoltaika
FVE	Fotovoltaická elektrárna
AM	Air Mass – vzduchová hmota
MPP	Maximum Power Point – bod maximálního výkonu
RD	Rodinný dům
NP	Nadzemní podlaží
PRMR	Prostorový metr rovnáný
PRMS	Prostorový metr sypaný
NT	Nízký tarif
VT	Vysoký tarif
POZE	Podporované zdroje energie

Seznam symbolů

Označení	Legenda	Jednotka
ε	hodnota topného faktoru	[-]
Q	vyprodukované teplo	[kW]
$E_{př}$	příkon TČ	[kW]
E_K	elektřina pro pohon kompresoru	[kW]
E_V	elektřina pro pohon ventilátoru	[kW]
$E_{\check{c}}$	elektřina pro pohon jednotky	[kW]
θ_z	úhel mezi imaginární osou spojující měřené místo na Zemi se Sluncem a imaginární osou kolmou na zemský povrch	[°]
E_f	energie fotonu	[J]
h	Planckova konstanta	[J·s]
N	frekvence fotonu	[Hz]
η	účinnost fotovoltaického panelu	[%]
P_{MAX}	maximální výstupní elektrický výkon	[W]
ϕ	vstupní energie slunečního záření	[W]
U_{MAX}	maximální napětí	[V]
I_{MAX}	maximální proud	[A]
e	hodnota slunečního záření	[W/m ²]
A	plocha článku	[m ²]
η_C	účinnost při nové teplotě článku	[%]
η_{REF}	účinnost naměřená při STC podmínkách	[%]
β_{REF}	teplotní koeficient závislý na materiálu	[1/°C]
t_C	teplota FV článku	[°C]
t_{STC}	STC teplota	[°C]
$t_{\eta=0}$	teplota při které je účinnost článku rovna nule	[°C]
P	Výkon fotovoltaického panelu	[W]
U	napětí	[V]
I	proud	[A]
η_{EU}	Evropská účinnost střídače	[%]
$\eta_{i\%}$	účinnost pro dané procentuální zatížení	[%]
$E_{setrvačnick}$	energie setrvačnicku	[J]
J	moment setrvačnosti	[kg·m ²]
ω	úhlová rychlost	[rad/s]
$E_{\check{c}p}$	energie uchovaná přečerpáním vody	[J]
V	objem vody	[m ³]
ρ	hustota vody	[kg/m ³]
g	tíhové zrychlení	[m/s ²]
$h_{\check{c}p}$	výška spádu od horní nádrže k turbíně	[m]
Q	energie uchovaná v citelném teple	[J]
m	hmotnost ohřívané látky	[kg]
c	měrná tepelná konstanta	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
t	teplota po dodání tepla	[°C]
t_0	teplota před dodáním tepla	[°C]
E_D	energie získaná spálením dřeva	[kWh]
V_r	rovnaný objem dřeva	[PRMR]
H_D	výhřevnost dřeva	[kWh/PRMR]
η_k	účinnost kamen	[-]

Označení	Legenda	Jednotka
V_{rok}	spotřeba vody za rok	[m ³]
n_{obyt}	počet stálých obyvatel domu	[-]
n_{jinde}	počet přechodných obyvatel domu	[-]
V_{obyv}	množství vody na obyvatele rodinného domu	[m ³]
V_{jinde}	množství vody spotřebované mimo rodinný dům	[m ³]
$E_{vTČk}$	energie dodaná TČ v květnu	[kWh]
E_{ld}	celková el. energie spotřebovaná v dubnu	[kWh]
$E_{ič}$	celková el. energie spotřebovaná v červnu	[kWh]
E_{lk}	celková el. energie spotřebovaná v květnu	[kWh]
$E_{TČd}$	energie spotřebovaná TČ v dubnu	[kWh]
$E_{TČč}$	energie spotřebovaná TČ v červnu	[kWh]
TF_{pr}	průměrný topný faktor	[-]
$E_{celková}$	celková energie využitá pro vytápění domu	[kWh]
E_D	energie dodaná spalováním dřeva	[kWh]
$E_{TČ}$	energie dodaná pomocí tepelného čerpadla	[kWh]
$E_{oč}$	dostupná energie ze slunečního záření	[kWh]
R_i	ozáření v jednotlivých dnech	[kWh/m ²]
A_p	plocha panelů	[m ²]
$\eta_{systém}$	účinnost systému	[-]
η_{modul}	účinnost panelu	[-]
η_{sklon}	účinnost panelu vlivem sklonu	[-]
η_{po}	účinnost FV po pokácení stromu	[%]
$\eta_{před}$	účinnost FV před pokácením stromu	[%]
$\eta_{účinnosti}$	celková účinnost	[-]
E_i	energie vyrobená FV generátorem	[kWh]
Φt_i	průměrná denní teplota	[°C]
β_{VOC}	teplotní koeficient pro napětí	[%/°C]
α_{ISC}	teplotní koeficient pro proud	[%/°C]
$\Delta\eta$	rozdíl účinností FV před a po skácení stromu	[%]
$E_{přetok}$	celkové přetoky do sítě za rok	[kWh]
$E_{přetok1}$	celkové přetoky do sítě za období srpen až duben	[kWh]
$E_{přetok2}$	celkové přetoky do sítě za období květen až červenec	[kWh]
U_v	úspory při využití virtuální baterie	[Kč]
C_O	cena obchodní části elektřiny	[Kč/MWh]
F	finance získané prodejem elektřiny	[Kč]
C_V	cena za výkup elektřiny	[Kč/MWh]
S	úspory při využití virtuální baterie oproti výkupu	[Kč]
$E_{ohřev}$	vyrobená energie pomocí TČ	[kWh]
$E_{využitelná}$	celková využitelná energie po započtení účinnosti	[kWh]
$\eta_{akumulace}$	celková účinnost akumulace	[-]
$E_{\eta m}$	úspory el. energie pro daný měsíc	[kWh]
$Q_{m\eta}$	tepelná energie využitá v daném měsíci pro danou účinnost	[kWh]
TF_m	topný faktor pro daný měsíc z Tab. č. 19	[-]
C_{VT}	cena elektřiny ve vysokém tarifu	Kč/MWh
C_{NT}	cena elektřiny v nízkém tarifu	Kč/MWh
$U_{NT\eta}$	úspory v nízkém tarifu pro danou účinnost	[Kč]
E_{η}	celkové úspory el. energie akumulací pro danou účinnost	[MWh]

Označení	Legenda	Jednotka
$U_{VT\eta}$	úspory ve vysokém tarifu pro danou účinnost	[Kč]
$S_{\eta akum}$	celkové roční úspory pro danou účinnost	[Kč]
$C_{T\check{c}}$	cena tepelného čerpadla	[Kč]
C_{FVE}	cena FV elektrárny a baterie	[Kč]
$D_{NZ\acute{U}}$	dotace Nová zelená úsporám	[Kč]
E_{SNT}	elektřina dodaná ze sítě v NT	[kWh]
E_{SVT}	elektřina dodaná ze sítě VT	[kWh]
K_{D57d}	stálé platby za elektřinu	[Kč/měsíc]
Z	cena POZE	[Kč]
C_D	cena dřeva	[Kč/PRMS]
k_D	koeficient pro přepočet PRMS na PRMR	[-]
C_K	cena kotle a stavebních úprav	[Kč]
E_P	roční spotřeba plynu	[MWh]
U_{PK}	úspora plynu díky kondenzačnímu kotli	[-]
C_P	cena plynu	[Kč/MWh]
K_P	stálé platby za plyn	[Kč/měsíc]
C_{ELP}	cena elektřiny při vytápění plynem	[Kč/kWh]
K_{D02d}	stálé platby za elektřinu při vytápění plynem	[Kč/měsíc]
C_{syst}	cena za nově nainstalovaný systém vytápění při odečtu nutných nákladů a dotací	[Kč]
C_{plyn}	roční platby za energie (a s nimi spojené) při využití plynu	[Kč/rok]
$C_{T\check{c},FVE,ak}$	roční platby za energie (a s nimi spojené) nového systému	[Kč/rok]
T	čas návratnosti systému oproti vytápění plynem	[rok]
C_{NTv}	cena elektřiny v NT při využití virtuální baterie	[Kč/kWh]
C_{VTv}	cena elektřiny ve VT při využití virtuální baterie	[Kč/kWh]
K_{D57dv}	stálé platby za elektřinu při využití virtuální baterie	[Kč/měsíc]
$C_{T\check{c},FVE,virt}$	roční platby za energie (a s nimi spojené) s virt. baterií	[Kč/rok]
T_{virt}	čas návratnosti systému s virt. baterií oproti vytápění plynem	[rok]
C_{ZV}	bod zvratu ceny prodejní elektřiny	[Kč/kWh]