

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ**

KATEDRA TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV



MODELOVÁNÍ ENERGETICKÝCH STŘEDISEK

DIPLOMOVÁ PRÁCE

JOSEF KUŘÁTKO

Vedoucí práce:

doc., Ing. Bohumír Garlík, CSc.

2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kuřátko Jméno: Josef Osobní číslo: 424317
Zadávací katedra: K125 - Katedra technických zařízení budov
Studijní program: Inteligentní budovy
Studijní obor: _____

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Modelování energetických středisek
Název diplomové práce anglicky: Energy hub modeling

Pokyny pro vypracování:

Rešerše problematiky energetických středisek. Matematický model GAMS.
Podmínky a proces řešení městských energetických středisek.
Návrh energetického střediska pro konkrétní vybranou oblast.

Seznam doporučené literatury:

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Bohumír Garlík, CSc.

Datum zadání diplomové práce: 20. 2. 2020 Termín odevzdání diplomové práce: 17. 5. 2020
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a podkladů.

České Budějovice, 24. 5. 2020

Josef Kuřátko

Poděkování

Děkuji doc. Ing. Bohumíru Garlíkovi, CSc. za odborné vedení této diplomové práce, poskytnuté podklady, materiály a konzultace při zpracování této diplomové práce.

Velké díky patří také mé mým rodičům, rodině a přátelům za podporu během mého studia.

Obsah

Anotace.....	4
1. Úvod.....	5
2. Současná energetická situace a možný vývoj.....	5
2.1. Centralizované energetické systémy	9
2.2. Decentralizované energetické systémy	10
2.2.1. Nevyhnutelnost decentralizované výroby	12
2.2.2. Obnovitelné zdroje energie v modelu decentralizovaného energetického systému	13
2.2.3. Potřebná změna role distribuční sítě v decentralizovaném energetickém systému	13
2.3. Pasivní distribuční sítě energií.....	16
2.3.1. Pasivní distribuční sítě elektrické energie.....	16
2.3.2. Pasivní distribuční sítě tepla	17
2.4. Aktivní distribuční sítě energií.....	18
2.4.1. Aktivní distribuční sítě tepla	19
2.4.2. Aktivní distribuční sítě elektrické energie.....	21
2.4.3. Smart Grid	25
3. Komunitní energetické systémy	26
3.1. Integrované komunitní energetické systémy jako místní alternativa pro dodávky energií	29
3.2. Modelovací rámec integrovaných komunitních energetických systémů	32
4. EnergyHub	34
4.1. Úvod do EnergyHub	34
4.2. Obecný model EnergyHub	34
4.3. Komponenty EnergyHubu	40
4.3.1. Zdroje a výrobní komponenty.....	40
4.3.2. Konverzní komponenty	41
4.4. Matematický model	42
4.4.1. Objektivní funkce	42
4.4.2. Omezení	42
4.5. Optimalizace.....	44
5. Obecný algebraický modelovací systém - GAMS	45
5.1. Výchozí matematický model EnergyHubu	45
5.1.1. Popis výchozího modelu EnergyHubu	45

5.1.2.	Komponenty výchozího modelu EnergyHubu a matematický popis jejich fungování.....	46
5.1.3.	Rovnice matematického výchozího modelu EnergyHubu	50
5.2.	Výchozí matematický model EnergyHubu v GAMS.....	57
5.2.1.	Vstupní data cen energií a poptávek.....	57
5.2.2.	Vstupní data komponent EnergyHubu.....	58
5.2.3.	Kód programu modelu EnergyHubu v GAMS.....	59
5.2.4.	Report a vyhodnocení výsledků	63
6.	Návrh optimálního modelu EnergyHubu pro konkrétní oblast	65
6.1.	Zkoumaná lokalita	65
6.2.	Budovy ve zkoumané oblasti	66
6.3.	Popis stavebních konstrukcí	66
6.3.1.	Budovy postavené v letech 1921 – 1946	66
6.3.2.	Budovy postavené v letech 1946 – 1960	67
6.3.3.	Popis technických zařízení těchto budov	68
6.4.	Spotřeba energií	72
6.4.1.	Spotřeba tepla na vytápění	72
6.4.2.	Spotřeba tepla na teplou užitkovou vodu.....	73
6.4.3.	Spotřeba plynu	74
6.4.4.	Spotřeba elektrické energie	75
6.5.	Ceny energií	78
6.5.1.	Cena elektrické energie	78
6.5.2.	Cena plynu	78
6.5.3.	Cena tepelné energie	78
6.6.	Denní náklady na energie ve stávající situaci	79
6.6.1.	Denní náklady na tepelnou energii	79
6.6.2.	Denní náklady na plyn	80
6.6.3.	Denní náklady na elektrickou energii.....	80
6.7.	Navrhované varianty EnergyHubu pro danou oblast.....	80
6.7.1.	Varianta 1	81
6.7.2.	Varianta 2	81
6.7.3.	Varianta 3	82
6.7.4.	Varianta 4	83
6.7.5.	Varianta 5	84
6.7.6.	Přidané komponenty navrhovaných modelů EnergyHubu a matematický popis jejich fungování	85

6.7.7. Připojení na distribuční síť tepelné energie.....	88
6.8. Úprava matematického modelu EnergyHubu	89
6.8.1. Varianta 1.....	89
6.8.2. Varianta 2.....	91
6.8.3. Varianta 3.....	91
6.8.4. Varianta 4.....	92
6.8.5. Varianta 5.....	93
6.9. Nalezení neoptimálnější varianty EnergyHubu pomocí GAMS.....	94
6.9.1. Vstupní data	94
6.9.2. Kódy programu modelu v EnergyHubu v GAMS.....	97
6.9.3. Výsledky jednotlivých variant EnergyHubu	103
6.10. Vyhodnocení výsledků.....	118
7. Závěr	119
Bibliografie	120
Seznam obrázků.....	128
Seznam tabulek.....	130
Seznam grafů	131
Přílohy	132

Anotace

Diplomová práce se zabývá současným stavem spotřeb energií, vývojem distribučních sítí a integrovaných komunitních energetických systémů. Předně je tato diplomová práce zaměřena na problematiku a optimalizaci fungování EnergyHubů – energetických center pomocí matematického modelu v GAMS. Získané znalosti byly následně aplikovány na konkrétní oblast pro nalezení optimální varianty EnergyHubu.

Klíčová slova: spotřeby energií, pasivní distribuční sítě energií, aktivní distribuční sítě energií, integrovaný komunitní energetický systém, EnergyHub, energetické centrum, matematický model, GAMS

Abstract

This diploma thesis deals with the current state of energy consumption, the development of distribution networks and integrated community energy systems. The focus of this diploma thesis is mainly on problematics and optimization of EnergyHub – energy center with help of the mathematic model in GAMS. Such gained knowledge were applied on the specific urban area to find the optimal variant of the EnergyHub.

Keywords: energy consumption, passive distribution networks, active distribution networks, integrated community energy system, EnergyHub, energy center, mathematic model, GAMS

1. Úvod

S rostoucí spotřebou energií a snahou o snížení emisí skleníkových plynů, rozvojem obnovitelných zdrojů energií a redukcí využití fosilních paliv ze strany Evropské unie je třeba nalézt řešení pro snížení spotřeb energií.

Jednou z těchto možností je rozvoj integrovaných komunitních energetických systémů a jejich efektivní napojení na distribuční sítě energií. Jednou z variant efektivního napojení těchto komunitních systémů na distribuční sítě je i využití EnergyHubů neboli energetických center.

Cílem této práce je tedy analýza současného stavu na poli spotřeb energií, představení dostupných možností vývoje distribučních soustav, využití decentralizovaných zdrojů energií, shrnutí výhod integrovaných komunitních energetických systémů a hlavně představení problematiky EnergyHubů pro možné snížení spotřeb energií, efektivní využití energetických zdrojů a výhod spojených s možnostmi konverze energií mezi nosiči těchto energií. Velká část této diplomové práce se věnuje také matematickému modelu EnergyHubů v programu GAMS, který za pomoci lineárního programování umožňuje nalézt optimální variantu a chování EnergyHubu v průběhu času.

Zjištěné poznatky jsou aplikovány v praktické části této diplomové práce, kde je pomocí matematického modelu v programu GAMS nalezena optimální varianta EnergyHubu pro zadanou oblast M. J. Lermontova – Ve Struhách, Praha 6.

2. Současná energetická situace a možný vývoj

Jednou z největších výzev pro současnou společnost je zvyšující se tendence spotřeby energií. S tím je nutné se vypořádat nejenom na poli dodávky a výroby, ale i výměny, přenosu a spotřeby energií samotných. Díky růstu populace, rozvoji elektromobility a s tím související zvětšující se globální poptávky po energiích, pravděpodobnému nedostatku fosilních paliv v blízké nebo vzdálenější budoucnosti a

zejména v poslední době naléhavé téma ochrany životního prostředí, je energetická bezpečnost velice aktuální a kritický problém pro všechny země na světě. Vztah mezi energiemi a ekonomickými, společenskými, environmentálními a bezpečnostními aspekty velmi umocňuje důležitost a prioritu tohoto problému [1]. Pojem energetická bezpečnost lze v problematice spotřeby energií vyjádřit jako spravedlivě dosažitelná, cenově dostupná, efektivní, spolehlivá, šetrná k životnímu prostředí, aktivně řízená a sociálně přijatelná energetická služba pro koncové uživatele. Energetické služby jsou všudypřítomné komponenty moderního života potřebné pro provoz dopravy, lehkého i těžkého průmyslu, pěstování potravin, výroby a distribuci produktů a pro vytápění a chlazení obydlí [2]. Ekonom Schumacher se zmiňuje o energetických službách v moderní společnosti tak, že nejsou jen další komodita, nýbrž předpoklad všech komodit. Dále se Schumacher o energetických službách zmiňuje tak, že tyto služby jsou základním faktorem rovným se vzduchem, vodou a zemí. Ve skutečnosti energetická bezpečnost poskytuje ucelený koncept národní bezpečnosti, udržitelného vývoje, bezpečnosti osob a lidských práv. Z tohoto důvodu se tedy dosažení udržitelných energetických systémů spolu se snížením spotřeby energií v blízké budoucnosti stalo velkou výzvou pro státy kolem celého světa [1].

Velké tepelné elektrárny byly donedávna hlavním zdrojem energií ve většině zemí. Pro tyto elektrárny jsou stěžejní paliva fosilní, jejichž přeměnou, většinou s nevalnou efektivitou, získáváme zejména energii elektrickou, ale i tepelnou. Takto vyrobená elektrická energie je následně přenášena na velké vzdálenosti z místa výroby na místo spotřeby přenosovou soustavou a dále rozváděna mezi koncové spotřebitele na koncová odběrná místa komplexní distribuční sítí (1). V případě tepelné energie je tato vzdálenost omezena díky tepelným ztrátám teplovodů a využití této energie, vyrobené z fosilních paliv, je pro spotřebu uživatelů značně omezeno. Pro dodávky tepelné energie z fosilních paliv, která je určena zejména pro otop budov a ohřev TUV, se využívají teplárny a výtopny, případně menší plynové kotelny. Z důvodu omezených vzdáleností, na které je výhodné tepelnou energii přenášet, jsou tato zařízení umístěna blíže spotřebním místům. Jde zejména o velká a větší města. Ačkoliv je hlavním úkolem těchto zařízení produkce tepelné energie pro otop a ohřev TUV, v případě tepláren jde o kombinovanou výrobu tepelné a elektrické energie, která je následně využita pro

provoz tohoto zařízení nebo dodávána do veřejné elektrické distribuční sítě. Kombinovaná výroba elektřiny a tepla se může také využít v případě plynových kotlen, kde je místo plynové kotle instalována kogenerační jednotka. V případě vytopen se kombinovaná výroba elektřiny a tepla nevyužívá a výtopna vyrábí pouze energii tepelnou [3].

Dle zprávy agentury EEA při Evropské Unii byly domácnosti v roce 2017 na druhé příčce ve spotřebě energií s 27 % hned za dopravou, která spotřebovala 31 % energií. Na průmysl připadla třetí příčka s 25 % a zbylé služby spotřebovaly 15 %. Spotřeba energií domácnostmi byla v roce 2017 oproti roku 2005 o 0,6 % nižší. Tato změna byla způsobena větší energetickou efektivitou obydlí (zlepšení tepelně technických vlastností obálek budov, efektivnější tepelné zdroje), ale zároveň byla tato pozitivní změna vyvážena větší spotřebou zvyšujícím se počtem domácích spotřebičů a v rostoucí podlahové ploše domácností [4]. Snaha o snižování spotřeby energií a produkce emisí domácnostmi je dále také vyžadována směrnicí Evropské Unie č. 2010/31/EU o energetické náročnosti budov, která byla do české legislativy transponována zákonem č. 318/2012, a která říká, že všechny nově postavené budovy musí mít téměř nulovou spotřebou energie. Tato povinnost započala pro budovy ve vlastnictví či užívání orgánem veřejné moci již v roce 2016. Od 1. 1. 2020 je povinnost dodržet téměř nulovou spotřebu energie nových budov vyžadována u všech, pro které je podána žádost o stavební povolení [5].

Podle zprávy agentury EEA při Evropské Unii můžeme vidět klesající tendenci ve spotřebě energií domácnostmi. Tato tendence je dále podporována nejenom samotnou Evropskou unií, která svými směrnicemi tlačí a podporuje domácnosti ke zlepšení tepelně technických vlastností jejich obydlí, užívání efektivnějších zdrojů tepla, ale i samotnými uživateli, kteří se svým uvědoměným chováním snaží svou osobní spotřebu energií redukovat. Tato motivace je dána nejenom možnou úsporou financí, ale především zmenšením ekologické stopy samotného uživatele [6].

Změna klimatu a ochrana životního prostředí se stala významným ekonomickým, environmentálním a společenským problémem, který vyžaduje rozsáhlou pozornost a zájem nejenom na poli politiky a vědy, ale i celé společnosti [7]. Evropská unie se v oblasti ochrany klimatu zavázala plnit cíle takzvaného Klimaticko-energetického

balíčku z prosince roku 2008. Jde o soubor právních předpisů, které stanovují cíle Evropské unie v oblasti energetiky a ochrany klimatu do roku 2020. Jde zejména o tyto tři hlavní body:

- snížení emisí skleníkových plynů o 20 % oproti roku 1990
- dosažení 20 % podílu obnovitelných zdrojů energie
- snížení konečné spotřeby energie o 20 %

Dle dostupných informací došlo na úrovni Evropské unie v letech 1990–2016 ke snížení emisí skleníkových plynů o 22 %. Cíl byl tedy v oblasti snižování emisí skleníkových plynů naplněn, nicméně data z posledních let ukazují mírný nárůst. EU je také na dobré cestě k naplnění cílů v oblasti energetické účinnosti a v oblasti obnovitelných zdrojů [8].

Tento klimatický balíček byl následně nahrazen a rozšířen klimatickým a energetickým rámcem, který stanovuje cíle do roku 2030.

Klíčové cíle pro rok 2030:

- Redukce emisí skleníkových plynů o 40 % oproti roku 1990
- Podíl obnovitelné energie alespoň 32 %
- Zlepšení energetické efektivity alespoň o 32,5 %

Tento rámec byl přijat Evropskou radou v roce 2014 a v roce 2018 byl následně zpřísněn na současnou podobu [9].

Evropská komise dále stanovila dlouhodobou strategii, která cílí na to, aby měla Evropská unie do roku 2050 klimaticky neutrální hospodářství s nulovými čistými emisemi skleníkových plynů [10].

Problematika snižování emisí skleníkových plynů, v současnosti velmi aktuální téma, je také přímo spjata s debatou ohledně uspokojení vysoké energetické náročnosti moderní současné společnosti. Tato debata se zabývá výhradně tím, jak a co v budoucnosti nahradí dosavadně hojně využívané fosilní zdroje. Otázka nahrazení fosilních zdrojů ovšem není jediným důležitým problémem, kterým by se tyto debaty měli zabývat. Další neméně důležitou otázkou je také nastavení celého energetického

systému, velikostí a početností zdrojů a k tomu odpovídající přizpůsobení fungování celé energetické soustavy [11].

Jednou z možností, jak řešit otázku vhodného fungování energetické soustavy, je její decentralizace. Ta přináší řadu výhod, které lze uplatnit jak v nynější převážně centralizované energetické soustavě, zejména díky menším systémovým ztrátám, tak v energetické soustavě s použitím obnovitelných zdrojů. Koncept decentralizované energetické soustavy lépe vyhovuje rozptýlenému charakteru obnovitelných zdrojů [11].

2.1. Centralizované energetické systémy

Centralizované energetické systémy jsou v současnosti velmi rozšířenou formou dodávek energie. K rozvoji centralizovaných energetických zdrojů došlo v průběhu dvacátého století, zatímco ve století devatenáctém využívali lidé zdroje zejména ze svého blízkého okolí. V oblasti dodávek elektrické energie tato centralizovaná forma přímo dominuje. Většina elektrické energie je vyráběna ve velkých tepelných elektrárnách, kterých je například na území České republiky jen několik. Následně je takto vyrobená elektrická energie přenášena na velké vzdálenosti v řádech stovek kilometrů až ke koncovým spotřebitelům. K centralizaci dodávek tepelné energie nedochází v tak velké míře jako v případě výroby energie elektrické. Velká a větší města sice postupem času zavedla centrální zásobování teplem, nicméně převaha individuální výroby tepelné energie zůstala. Stejná situace jako s dodávkami elektrické energie je na poli dodávek fosilních paliv pro výrobu tepla či elektrické energie. Fosilní paliva jako uhlí, ropa nebo zemní plyn, se těží jen na omezeném počtu míst na světě. K jejich dalšímu zpracování se využívá jen několika málo zařízení, například rafinérie, a následně jsou upravené a připravené komodity ke spotřebě zákazníkem dodávány ve velkých objemech ropovody, plynovody či velkými tankery [11].

Centralizovaná není jenom samotná struktura energetických soustav, ale i jejich vlastnická forma. Od těžby a zpracování paliv přes jejich dodávku až k samotné výrobě energie jsou tato odvětví ovládána jen několika málo velkými společnostmi, které jsou zpravidla ze strategických důvodů pod vedením státu. Dobrým příkladem takovéto společnosti může být například firma Gazprom nebo EDF [11].

Centralizovaný energetický systém se zdá být na první pohled funkční, velké energetické firmy jsou stabilními společnostmi s velkým kapitálem a know-how, jež umožňuje spolehlivé dodávky energií a úspěšné řešení možných provozních problémů. Avšak i tento model energetických systémů má svoje nevýhody, které mohou ohrozit jejich stabilitu a funkčnost. Některé potenciální hrozby těchto systémů je možné omezit nebo až eliminovat, a to právě decentralizací. [11].

2.2. Decentralizované energetické systémy

Argumenty k postupnému přechodu na decentralizovaný systém [11]:

- Změny struktury zdrojů
 - o Model centralizovaného energetického systému je nesporně postaven pro potřeby využití energetických zdrojů spalujících fosilní paliva a také pro potřeby využití velkých jaderných a vodních elektráren. Využívání těchto energetických zdrojů je však limitováno jejich geologickými zásobami a negativním vlivem na životní prostředí (toto se týká zejména zařízení spalující fosilní paliva). Poslední dobou roste tlak na větší využívání obnovitelných zdrojů, které jsou místně roztroušené, a s výhodou tohoto faktu je můžeme využít v energetických soustavách s menší mírou centralizace.
- Vysoká zranitelnost centralizovaných systémů při mimořádných událostech
 - o Slabým místem centralizovaných energetických systémů je možná hrozba výpadku důležitého místa v systému, který může zasáhnout vyšší počet koncových spotřebitelů najednou. Příkladem takovéto hrozby mohou být živelné katastrofy, během kterých se bez elektrické energie ocitne i několik tisíc lidí. Další z možných mimořádných událostí v případě dodávky elektrické energie je například výpadek elektrárny, nenadálý nárůst odběru elektrické energie nebo naopak její přebytek například z důvodu náhlé velké produkce elektrické energie z větrných elektráren. Všechny tyto důvody mohou mít za následek rozsáhlé přerušení dodávek elektrické energie. Další velkou hrozbou centralizovaného energetického systému je pak riziko koordinovaného teroristického útoku na

energetickou infrastrukturu (plynovod, ropovod, elektrická síť). V případě postihnutí decentralizovaného energetického systému nějakou z výše uvedených hrozeb by následky neměly tak velký rozsah a počet dotčených spotřebitelů by byl razantně menší.

- Cenová nejistota, politická nestabilita a dovozní závislost
 - o Hlavní rizika evropského centralizovaného energetického systému vyvstávají z významné závislosti na dodávkách plynu, uhlí, ropy a jaderného paliva. Prvním z těchto rizik je skutečnost, že se odběratel stává do určité míry rukojmím dodavatelů, kteří mohou využívat omezení dodávek těchto klíčových komodit k politickému tlaku. Druhým rizikem je potom cena těchto komodit, jelikož ji ze strany odběratele nelze žádným způsobem ovlivnit. V případě rostoucí poptávky po těchto komoditách v různých částech světa se může jejich cena vyšplhat až k velmi vysokým částkám. V takovém případě nemá odběratel v podstatě jinou šanci než dané částky zaplatit. Decentralizovaný energetický systém je na tyto situace lépe připravený a není v těchto ohledech tak citlivý, jelikož se více spoléhá na lokální zdroje.
- Podpora lokálních ekonomik
 - o Nespornou výhodou decentralizovaných energetických systémů je podpora místních ekonomik. Na fungování celého decentralizovaného energetického systému se podílí více menších lokálních firem, což má za následek ekonomické a sociální přínosy. Praktické zkušenosti s decentralizovanými energetickými systémy ukazují, že decentralizace fyzických zdrojů a odlišná vlastnická struktura těchto firem se pozitivně odráží v regionální ekonomice. Spotřebitelé neplatí za poskytnuté dodávky energie často zahraničním společností, ale místním menším podnikům, které mohou sami mít eventuálně spoluvlastnit. Peníze spotřebitelů vyplacené za dodané energie tedy neodcházejí do zahraničí, podporují místní rozvoj a zůstávají v regionu.
- Nová místa na trhu práce
 - o Decentralizované energetické systémy dále přinášejí pozitivní dopad na zaměstnanost. Větší počet menších firem podílejících se na výrobě a

dodávce energií, fungování i správě decentralizované energetické soustavy vede k vytvoření vyššího počtu pracovních míst i v oblastech s vyšší nezaměstnaností. Vytvoření nových pracovních míst platí i pro oblast zásobování palivy, což zvyšuje poptávku po pracovní síle především v oblasti zemědělství.

- Cenový vývoj
 - o Riziko rostoucích cen fosilních paliv může uživatel výrazně snížit využitím obnovitelných zdrojů v kombinaci s decentralizovaným energetickým systémem. Počáteční investice jsou pro uživatele v tomto případě větší, nicméně následné provozní investice jsou minimální. Pro příklad můžeme uvést systém pro fototermitický ohřev teplé vody. Počáteční investice jsou v pořízení a montáži tohoto systému, avšak uživatel si může dodavatelskou firmu vybrat, tím má své finance pod svojí kontrolou. Následně dodaná energie systémem je již bez placení, tím uživatel omezil riziko rostoucích cen fosilních paliv. Ostatní uživatelé, kteří jsou odkázáni na dodávky energií z centrálních zdrojů, nemohou předvídat ani ovlivňovat ceny za dodávané energie.

2.2.1. Nevyhnutelnost decentralizované výroby

Budoucí využívání centralizovaného energetického systému je omezené zásobami uhlí a zemního plynu. Z hlediska jaderné energetiky připadají v úvahu jaderné elektrárny čtvrté a vyšší generace. Nepochybně budou na území Evropy vznikat decentralizované zdroje energie počínaje těmi, které dobře známe už teď. Příkladem těchto zdrojů mohou být teplárny, závodní elektrárny, vodní, větrné a fotovoltaické elektrárny. Dále budou vznikat i menší fotovoltaické elektrárny na střechách budov, a i menší moderní technologie, které budou moci mít uživatelé v domácnosti a jejichž výkony budou řádově desetiny a jednotky kilowattů. Uživatelé přestanou být pouhým pasivním odběratelem, ale stanou se naopak aktivním spoluvýrobcem a členem decentralizované energetické soustavy. Pro bezproblémové fungování tohoto modelu decentralizované energetické soustavy bude nutné, aby elektrická soustava fungovala jako vyrovnávací prvek mezi právě vyráběnou elektřinou domácnostmi a elektřinou spotřebovávanou právě zapnutými spotřebiči. V situaci, kdy by výroba domácností převyšovala jejich

spotřebu, by elektrickou energii odebírala. Naopak v době, kdy by výroba domácností byla nižší než jejich spotřeba, elektrickou energii by tyto domácnosti dodávaly. Velká energetika nemůže s touto tendencí dlouhodobě bojovat. Budoucnost energetiky je v partnerství mezi velkými systémovými elektrárnami a malými elektrárnami, které budou patřit mezi běžné technické zařízení nových nebo rekonstruovaných budov. Zejména půjde o objektové kogenerační, eventuálně tri-generační zdroje. Tri-generační zdroje jsou schopné oproti kogeneračním, které vyrábí teplo a elektrickou energii, vyrábět také chlad. V současnosti jsou na evropském trhu dostupné kogenerační jednotky zejména pro bytové domy a administrativní budovy. Instalace těchto jednotek v rodinných domech si oblibu zatím nezískala, a to především díky vysoké pořizovací ceně. Populárními se naopak staly malé fotovoltaické elektrárny, které se díky stále příznivější ceně staly dostupnější i pro vlastníky rodinných domů. V nabídce dodavatelů jsou i malé větrné elektrárny, které je možno instalovat na střechy domů. Další možností v poskytování podpůrných služeb elektrické síti by také v budoucnu mohli být vodíkové palivové články zaparkovaných automobilů, ovšem pouze za předpokladu rozvinutí vodíkové energetiky [11].

2.2.2. Obnovitelné zdroje energie v modelu decentralizovaného energetického systému

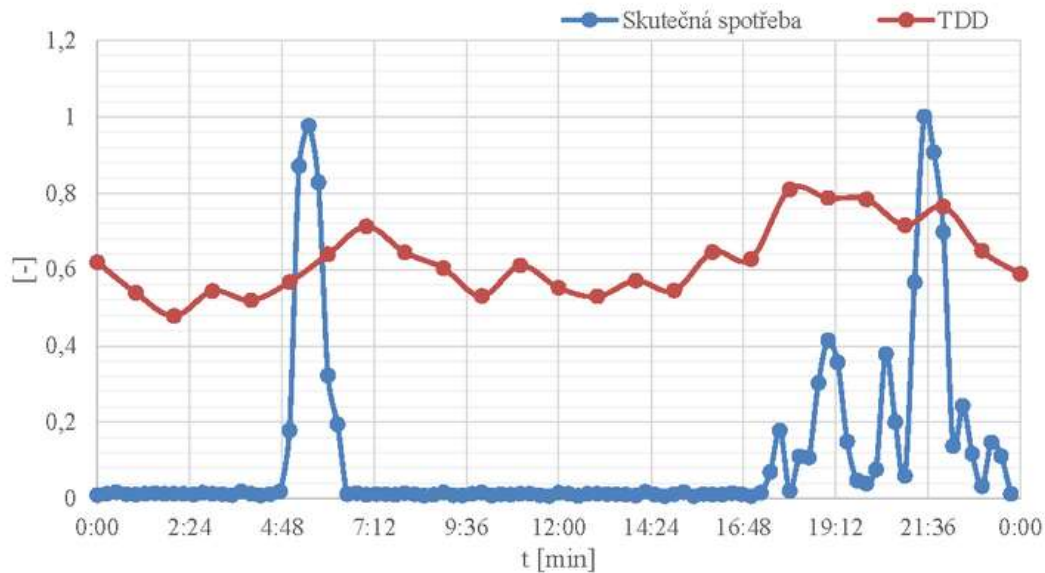
Pro úspěšné připojení obnovitelných zdrojů energie o menších výkonech do soustavy bude nutné najít jejich optimální způsob zapojení. V případě využití těchto zdrojů bude nutné účelně předvídat a regulovat dodávky do sítě zejména na regionální (obecní, městské) úrovni. Při větším zapojení těchto obnovitelných zdrojů do energetické soustavy bude muset nynější centralizovaná energetická soustava doznat určitých změn. Zřejmě vznikne pozice lokálních nebo regionálních energetických správců, kteří budou řídit dodávky do soustavy a zastupovat lokální mikrovýrobce [11].

2.2.3. Potřebná změna role distribuční sítě v decentralizovaném energetickém systému

Decentralizovaný energetický model ovšem neznamená soustavu zcela samostatných „ostrovních“ jednotek. Spojení jednotlivých zdrojů energie pomocí distribuční sítě významně zlepšuje efektivitu jejich využití, a to platí i pro model decentralizovaného energetického systému. Příznivost spojení energetických zdrojů

pomocí distribuční sítě si můžeme ilustrovat například na denním průběhu spotřeby energie domácnostmi. Následující graf prezentuje poměr skutečné spotřeby a typového diagramu dodávek [11].

Porovnání TDD se skutečností 22.2.2016



Graf 2.1: Porovnání skutečné spotřeby oproti TDD [12]

Graf ukazuje jak skutečnou hodinovou spotřebu elektrické energie vztaženou k typovému diagramu dodávek, tak samotný průběh křivky typového diagramu dodávky.

Typové diagramy dodávek vyjadřují modelový průběh roční spotřeby odběratelů rozdělené do jednotlivých dnů a měsíců. Byly vytvořeny na základě skutečných měření odběrů velkého počtu odběratelů. Typové diagramy dodávek vyjadřují průběh spotřeby v čase a můžeme v nich například dobře sledovat promítnutí většího odběru elektrické energie v průběhu zimních měsíců [13]. Křivka typového diagramu použitá v grafu je 4. třídy – tedy odběratel kategorie D, který odebírá elektrickou energii bez jejího tepelného využití [14]. Roční spotřeba elektrické energie pro domácnosti dle nejaktuálnějších dat Českého statistického úřadu činila 4815 kWh/byt v RD a 2141 kWh/byt v BD v roce 2015 [15].

Předpokládané hodnoty spotřeby elektrické energie podle normalizovaného typového diagramu dodávky příslušné třídy by se spočetly podle vztahu:

$$O_h = O_r * \frac{r_h}{\sum_{h=1}^{8760} r_h} \quad (2.1)$$

Kde O_h je velikost spotřeby v danou hodinu, O_r je celková roční spotřeba příslušného odběrného místa, r_h je velikost relativní hodnoty normalizovaného typového diagramu příslušné třídy daného odběrného místa v danou hodinu h a $\sum r_h$ je součet všech relativních hodnot normalizovaného typového diagramu dodávek příslušné třídy odběrného místa za celý kalendářní rok [16].

Z grafu můžeme vyčíst nerovnoměrnost spotřeby vztaženou k typovému diagramu dodávky během dne. Tato informace nám zároveň odráží i průběh skutečné spotřeby příslušného odběrného místa. Vyšší odběry jsou jen krátkodobé, a to hlavně nárazově ráno a následně v podvečer a večer, kdy probíhá zvýšený odběr s odběrovou špičkou. Tato skutečnost ukazuje, že by individuální objektová výroba nebyla efektivní, protože například individuální instalovaný zdroj o výkonu 4 kW by běžel v podstatě téměř celý den naprázdno a oproti tomu například zdroj o výkonu 1 kW by nebyl schopen pokrýt ranní a večerní výkyvy ve spotřebě. Kdyby ovšem každá domácnost měla k dispozici individuální zdroj o výkonu 1 kW jako jsou běžně dnes domácnosti vybaveny pračkou či dalšími spotřebiči dosahoval by jejich instalovaný výkon bezmála 4000 MW. Propojení elektrickou sítí umožňuje sdílet tyto individuální decentralizované zdroje a s výhodou využívat nesoučasnost užívání spotřebičů v domácnosti a v podnicích. Fungování sítě by ovšem pro tyto potřeby muselo dostat zásadních změn [11].

Energetický průmysl čeká velký úkol: začlenit decentralizované technologie do stávajících distribučních sítí a s tím překonat související technické obtíže. Pokaždé na tuto situaci včas nezareaguje, přijdou uživatelé a odběratelé na alternativní řešení, stejně jako přišli na řešení podobné situace v oblasti centrálního zásobování teplem, kdy soustava centralizovaného zásobování teplem nebyla schopna soupeřit cenou a pohodlím individuálnímu způsobu vytápění objektů [11].

Je možné předpokládat, že počet dostupných technologií pro individuální výrobu elektřiny a tepla se významně zvýší. Mezi nadějně a již dostupné technologie můžeme řadit například plynové zdroje (spalovací motory, Stirlingův motor, mikroturbíny), fotovoltaické panely, miniaturní větrné turbíny a v neposlední řadě se také očekává, že s vývojem vodíkových technologií se mezi tyto zdroje zařadí také palivové články. Tato řešení budou dostupná v různých výkonových řadách tak, aby jejich výkon odpovídal potřebné energetické spotřebě příslušné budovy nebo areálu. Je však zapotřebí, aby

tento trend byl doprovázen i potřebnou transformací stávajících distribučních sítí z pasivních na aktivní.

2.3. Pasivní distribuční sítě energií

2.3.1. Pasivní distribuční sítě elektrické energie

Stávající distribuční sítě elektrické energie byly do této doby plánovány a projektovány jako jednosměrné sítě pro přenos elektrické energie z velkých elektráren do zásuvek odběratelů. Takto projektované sítě můžeme označovat jako sítě pasivní. Tyto distribuční sítě nemohou pracovat odděleně od sítí přenosových, a jakmile do nich zapojíme decentralizované zdroje energie, tyto sítě je pak prakticky nevyužívají. Řízení a kontrola takto zapojených decentralizovaných zdrojů do sítě je téměř nemožná, a tak s nimi dispečink zachází většinou pasivně jako by to byly běžné elektrické spotřebiče. Pouze určité takto zapojené zdroje, jako jsou větší teplárny a akumulární elektrárny, jsou využívány jako poskytovatelé podpůrných energetických služeb [11].

Přenosová soustava je navržena a zkonstruována až na výjimky jako propojená soustava připomínající pavučinu. Tím je zajištěno, že v případě výpadku lze postižený prvek okamžitě nahradit jiným, jeho roli převezmou ostatní prvky, které zůstaly v provozu a není tedy ovlivněna dodávka elektrické energie ke koncovému uživateli. Tento systém zálohy se odborně nazývá jako bezpečnostní kritérium N-1 [17]. Distribuční sítě jsou navrženy obdobně, avšak na koncové úrovni dodávek elektrické energie jsou provozovány jako sítě paprskové bez dostupné zálohy. Připojení vícero malých individuálních decentralizovaných zdrojů by způsobilo obousměrné toky elektrické energie v síti, což by mohlo způsobit přetížení jednotlivých větví rozvodů, podpětí, přepětí či napěťové kolísání, pokud by nebyla konkrétní síť na takový provoz stavěna. [18]. Z těchto důvodů provozovatelé distribuční sítě vyžadují, aby se decentralizované zdroje přizpůsobovaly současně zažité praxi provozu distribuční sítě. Jakmile malý decentralizovaný zdroj, který by měl být připojen k distribuční síti, této praxi nevyhovuje, není jeho připojení povoleno.

Zapojení obnovitelných zdrojů energie do českých a potažmo i evropských přenosových a distribučních soustav se jeví jako problémové. Zejména energie získaná

z větrných elektráren, které díky stále častějším rozmarům počasí dodávají při nahodilých vichřicích do sítě velké množství výkonu. Ty je třeba převést, což způsobuje zatížení přenosové soustavy až na hranici blackoutu. Rozvoj větrných elektráren v Německu a technický stav německé přenosové soustavy již několikrát v minulosti způsobil problémy s přetokem této energie skrze českou přenosovou soustavu [19] [20]. Pasivní sítě nejsou připravené na dodávky energie z obnovitelných zdrojů, které závisí na rozmarech počasí. Jsou stavěné na stabilní dodávky elektrické energie z velkých elektráren a zapojení obnovitelných zdrojů je tedy vnímáno jako rušivý element. Avšak s rostoucím tlakem na využívání obnovitelných zdrojů, snižování emisí a spotřeby elektrické energie je nevyhnutelný přerod pasivních přenosových soustav na aktivní, které budou zvládat rozmary počasí, nesouměrnost spotřeby i množství malých individuálních decentralizovaných zdrojů energie.

2.3.2. Pasivní distribuční sítě tepla

Centrální zásobování teplem je velice komfortní pro jejich uživatele. Nejenom z pohledu toho, že uživatel pouze nastaví pokojový termostat či otočí termostatickou hlavicí radiátoru, ale také proto, že odpadá povinnost pravidelně udržovat například plynový kotel, čistit komín nebo zajišťovat dostatek tuhých paliv. Výhodou centrálního zásobování není pouze komfort ze strany uživatelů, ale i ekologické a ekonomické aspekty. V porovnání s individuálními způsoby výroby tepelné energie můžeme uvést následující výhody:

- Vyšší energetická účinnost v centrálních zdrojích tepla díky optimální spalovací technologii
- Menší ztráty při zatápění a odstávce tepelného zdroje
- Efektivní využití odpadního tepla, které by nebyť distribuční sítě tepla, nebylo využito
- Lepší využití primární energie skrze kogenerační jednotky
- Lepší vykrytí nesoudobosti spotřeby – velký kolektivní tepelný systém potřebuje menší celkovou tepelnou kapacitu než v součtu individuální kotle a ohříváče vody

Nesporným kladem centrálního zásobování teplem je jeho ekologický dopad. Teplo dodané centrálním zásobováním teplem má menší uhlíkovou stopu než teplo

individuálně vyrobené díky větší energetické účinnosti centrálních zdrojů a lepšími možnostmi využití obnovitelných zdrojů energie. Díky spalinovým filtrům, kterými jsou centrální zdroje tepelné energie vybaveny, je produkce emisí značně menší než u zdrojů individuálních. Systémy centrálního zásobování teplem jsou také ideální pro přenos odpadního tepla z průmyslových procesů nebo ze spaloven odpadu.

Stávající distribuční sítě tepla jsou provozovány jako pasivní sítě, tedy jednosměrně. Tok tepelné energie je směrem od zdroje skrze teplovody k místu spotřeby zákazníka. Jednosměrná distribuční síť nemůže pružně reagovat na změny v nabídce či poptávce tepla a tím vybalancovat případné nesouměrnosti v odběru či výrobě. Měření spotřebovaného tepla neprobíhá v reálném čase, a tak je složité naplánovat provoz takovéto sítě. Takto vybudované sítě jsou stavěné především jako vysokoteplotní, což značně omezuje zapojení nízkoteplotních zdrojů. Do systému lze na straně výroby tepla zapojit kogenerační jednotky, případně kotle na biomasu [21].

2.4. Aktivní distribuční sítě energií

S přibývajícím množstvím decentralizovaných zdrojů energií, které ještě s dalším rozvojem zdrojů energií z obnovitelných zdrojů budou nadále rychleji přibývat, je nutné, aby provozovatelé distribučních sítí změnili svůj dosavadní přístup k distribučním sítím z pasivního na aktivní. Tedy z modelu dosavadních převážně jednosměrných distribučních sítí, kde na jedné straně většinou stojí centrální výroba ze zdrojů využívajících fosilní paliva a na straně druhé odběratelé připojení na distribuční síť, k obousměrným distribučním sítím. Ty obsahují technologické prvky, které dokáží aktivně řídit kombinaci výroby, spotřeby a skladování energií rozmístěnou v decentralizované energetické soustavě. Aktivní sítě obsahují takové technologické prvky, které umožňují efektivně a spolehlivě integrovat zvyšující se množství decentralizovaných zdrojů energií a zároveň aktivně řešit dopady a problémy vyplývající z tohoto zvětšujícího se trendu [22].

Namísto hledání možností a řešení, jak by se decentralizované zdroje energie mohli přizpůsobit pasivním distribučním sítím a jak je optimálně do takových sítí připojit, je třeba hledat možnosti a ptát se, jak se distribuční sítě mohou přizpůsobit charakteru decentralizovaným zdrojům energie. Topografie, řízení i zajištění bezpečnosti

přenosových a distribučních sítí se v minulosti vždy přizpůsobovala potřebám velkých uhelných nebo jaderných elektráren, velkých tepláren nebo výtopen či kotelen. Tento přístup se v případě zapojení většího množství decentralizovaných zdrojů energie musí přizpůsobit. Právě větší množství menších decentralizovaných zdrojů energie je velkou výhodou pro spolehlivost dodávek energie oproti dosavadnímu stavu, kdy dodávky tepelné a elektrické energie zajišťuje menší množství velkých výkonných elektráren a tepláren. V případě výpadku některého z těchto zdrojů je spolehlivost dodávek ohrožena, jelikož síť přijde o značnou část výkonu. Pokud dojde k výpadku jednoho z mnoha méně výkonných decentralizovaných zdrojů energie zapojených do aktivní sítě, není výpadek téměř znatelný a aktivní síť dokáže okamžitě na tuto situaci zareagovat a operativně rozdistribuovat dostupný výkon v rámci sítě či pokrýt tuto ztrátu z dostupných záloh. Decentralizované zdroje energie zapojené do aktivní sítě jsou tedy méně náročné na zálohy a poskytují větší spolehlivost v dodávce energií oproti v současnosti klasickým sítím. Možné problémy mohou vznikat při zálohování větrných a solárních elektráren, které jsou závislé na počasí. Na rozdíl od nahodilých poruch můžeme ale počasí v krátkodobějším časovém horizontu s vcelku velkou úspěšností předpovídat (v horizontu 5 dní je úspěšnost až 88%) a včas tedy přizpůsobit a naplánovat provoz energetické soustavy [23] [11].

2.4.1. Aktivní distribuční síť tepla

Distribuční síť tepelné energie jsou specifické svou velkou počáteční investicí. Návrhovat takovéto investice je tedy spíše dlouhodobějšího horizontu. Avšak jakmile je takováto investice do tepelné infrastruktury uskutečněna a poptávka po centrálních dodávce tepla je dostatečně vysoká, jsou náklady spojené s individuálním připojením koncových spotřebitelů tepla k distribuční síti tepla minimální.

Za předpokladu, že je na straně dodávek tepelné energie zajištěno, že teplo pochází z různých tepelných zdrojů, a že na straně poptávky stojí rozdílně chovající se spotřebitelé, je možné během provozu takovéto sítě zajistit optimální a dobře vyváženou koordinaci nabídky a poptávky. Tento provoz má pozitivní vliv na využitelnost zdrojů a potřebu zajištění bezpečnosti a stability jak nabídky, tak poptávky po tepelné energii. Individuální zdroje tepelné energii tuto stabilitu a bezpečnost zajistit nedokáží.

Pro rozvoj aktivních distribučních sítí tepla je stěžejní provázanost tepelné a elektrické distribuční sítě. Tyto tzv. distribuční sítě čtvrté generace umožňují optimální využití obnovitelných zdrojů tepla pro výrobu tepelné energie a zapojení takovýchto zdrojů do centrálního zásobování. O těchto energetických sektorech se obvykle přemýšlí odděleně, ale využití směnného efektu mezi elektrickou energií a teplem může vést k velkému zlepšení v účinnosti využití obou těchto druhů energií. Dalšími přínosy a specifiky aktivních distribučních sítí jsou:

- Nižší teploty a vyšší účinnosti
- Vhodnost pro nízkoenergetické domy
- Otevřená tepelná síť s obousměrným provozem
- Větší důraz na obnovitelné zdroje energie
- Využívání odpadního tepla z průmyslu či spaloven odpadu
- Využívání kogenerace, případně trigenerace
- Kombinace nízkoteplotních tepelných sítí a využívání tepelných čerpadel
- Inteligentní ukládání tepelné energie, provázanost na distribuční síť elektrické energie, správa a řízení distribuční sítě tepla
- Smart energie (optimální interakce mezi výrobou, distribucí a spotřebou)

Měření spotřeby tepla v aktivní distribuční síti je prováděno pomocí digitálních měřících zařízení, která měří spotřebu s velkou přesností na základě průtoku a teplotního rozdílu. Díky těmto přístrojům může probíhat měření spotřeby tepla na dálku a díky přesným datům je možné řídit distribuční síť tepla efektivněji [21].

2.4.1.1. Komponenty aktivní distribuční sítě tepla

2.4.1.1.1. Zdroje tepelné energie

Zdroje tepelné energie v aktivní distribuční síti tepla můžeme dělit do třech základních skupin podle typu použitého paliva [21]:

- Konvenční fosilní zdroje tepelné energie
 - o Plynové kotle
 - o Kotle na uhlí
- Nízkoteplotní nebo vysokoteplotní odpadní teplo z různých zdrojů

- Obnovitelné zdroje energie
 - Solární termické panely
 - Biomasa
 - Bioplyn
 - Geotermální energie

2.4.1.1.2. Teplovod

Teplovody jsou zařízení sloužící k přepravě tepla z místa výroby do místa spotřeby. Potrubí teplovodů bývá nejčastěji provedeno z plastu či oceli v závislosti na teplotě teplonosné látky a je dobře zaizolováno. Potrubí bývá také vybaveno vodiči pro detekci úniku teplonosné látky [21].

2.4.1.1.3. Tepelné výměníky

Tepelný výměník je zařízení umožňující výměnu tepla mezi primárním okruhem (okruh distribuční sítě tepla) a okruhem sekundárním (okruh koncového spotřebitele). Podle požadovaného výkonu dodávaného do okruhu koncového spotřebitele se volí typ, výkon a velikost tepelného výměníku. Sestava tepelného výměníku o výkonu vhodném pro běžnou domácnost má přibližně stejnou velikost jako běžný etážový plynový kotel [21].

2.4.1.1.4. Měřicí, kompenzační a řídicí prvky

Pro potřeby správného fungování, regulaci a řízení distribuční sítě jsou zapotřebí také další funkční komponenty. Nejde jen o měřiče spotřeby tepla, které poskytují aktuální data o spotřebě koncových zákazníků a podle kterých se dá operativně celá distribuční síť řídit, ale i o ostatní běžné měřicí, řídicí a kompenzační prvky jako jsou průtokoměry, teploměry, manometry, sensory hladiny, čerpadla, solenoidy a ostatní [24] [25].

2.4.2. Aktivní distribuční sítě elektrické energie

Při zapojování většího množství decentralizovaných zdrojů elektrické energie budou muset distribuční sítě dostát jistých změn. Hlavní změnou bude zajištění obousměrného toku elektrické energie distribuční sítí. Klíčovými problémy připojování

decentralizovaných zdrojů energií jsou v případě elektrických sítí například přepětí, případně podpětí a různé poruchové proudy. Takto fungující aktivní distribuční síť bude moci operativně reagovat na aktuální potřeby přebytku a deficitu elektrické energie v různých místech sítě, mezi kterými bude tedy fungovat jako vyrovnávací článek. Distribuční síť bude také zajišťovat spolupráci mezi velkými a malými zdroji elektrické energie. Část výroby energií se přesune blíže ke spotřebiteli, některé zdroje energie se tedy stanou přímo součástí objektů – objektové zdroje. V případě jakékoliv poruchové situace, která by ve stávajících distribučních sítích elektrické energie mohla vést až k blackoutu, umožní aktivní distribuční sítě s prvky inteligence, zachovat alespoň nouzové zásobování elektrickou energií, například skrze místní ostrovní provoz nebo včasným odpojením poruchového místa od distribuční sítě a redistribucí dostupné elektrické energie z dostupných decentralizovaných zdrojů elektrické energie [22] [11] [26].

Při budování aktivních distribučních sítí elektrické energie se počítá s využitím pokročilých technologií jako je automatická napěťová regulace nebo využití rozšířených možností skladování elektrické energie například zapojením elektromobilů pro uchovávání a následné využití uložené elektrické energie. Zásadním je však umožnění obousměrného toku elektrické energie sítí [27].

Aktivní distribuční síť elektrické energie se soustředí především na integraci, provoz a řízení velkého množství decentralizovaných zdrojů elektrické energie, jejich spolupráci s velkými elektrárnami a skladování elektrické energie v distribuční síti. Přidáním dalších pokročilých technologií a spojením distribučních sítí se sítěmi informačních a komunikačních technologií za účelem pokročilého řízení a monitoringu mluvíme o tzv. inteligentních sítích (Smart grid) [27].

2.4.2.1. Komponenty aktivní distribuční sítě elektrické energie

2.4.2.1.1. Distribuční rozvodny 110 kV

Distribuční rozvodny 110 kV připojují distribuční sítě k přenosové soustavě a transformují napětí 220 kV z přenosové sítě na napětí 110 kV pro následný rozvod v distribuční síti. [28].

2.4.2.1.2. Vedení velmi vysokého napětí

Vedení velmi vysokého napětí o hladině 110 kV z distribučních rozvodů 110 kV do distribučních rozvodů 22 kV. Vedení je povětšinou vrchní, tedy na stožárech ve výšce od 27 m do 35 m nad zemí, ale může se vykytovat i vedení kabelové pod zemí. Používá se pro přenos větších výkonů na delší vzdálenosti [17].

2.4.2.1.3. Distribuční rozvodny 22 kV

Distribuční rozvodny 22 kV transformují napětí z vedení velmi vysokého napětí 110 kV na napětí vysokého napětí 22 kV pro následný rozvod elektrické energie do transformačních stanic 0,4 kV [28].

2.4.2.1.4. Vedení vysokého napětí

Vedení vysokého napětí 22 kV je koncipováno jako paprskové vedení. Spojuje transformační stanice s distribučními rozvodnami 22 kV. Může být buď vrchní vedené vzduchem, takové vedení se většinou používá mimo městskou zástavbu nebo kabelové vedené pod zemí, které se hojně využívá ve městech [29].

2.4.2.1.5. Transformační stanice 0,4 kV

Transformační stanice jsou místa, kde dochází k transformaci napětí z vedení vysokého napětí 22 kV na vedení nízkého napětí 0,4 kV, které je pak následně rozváděno ke koncovým spotřebitelům. Transformační stanice jsou většinou v majetku operátora distribuční sítě, pouze v případě připojení velkého odběratele může být majitelem sám odběratel [30].

2.4.2.1.6. Vedení nízkého napětí

Stejně jako u vedení vysokého napětí se používá u rozvodu nízkého napětí vrchní nebo kabelové vedení. Trend je ovšem takový, že při výstavbě nového či opravě stávajícího vedení nízkého napětí se upřednostňuje podzemní kabelové vedení [30].

2.4.2.1.7. Prvky zajišťující správné fungování aktivní distribuční sítě

Základním prvkem aktivní distribuční sítě elektrické energie je inteligentní trafostanice. Její koncepce obsahuje rozvaděč vysokého napětí s obousměrnými

komunikačními možnostmi, regulovatelnými transformátory, integrovaným dálkovým ovládáním a automatizačními prvky s měřením, které řídí a kontrolují síť vysokého i nízkého napětí. Provozní stav (např. přetížení) prvků je tak rychle detekován, čímž je zajištěna stabilita dodávek a optimální využití elektrické sítě například nastavením mezních hodnot pro decentralizované zdroje elektrické energie [31].

2.4.2.1.8. Decentralizované zdroje elektrické energie v aktivních distribučních soustavách

Jako decentralizované zdroje elektrické energie se používají zejména [32]:

- Fotovoltaické panely
- Malé větrné turbíny
- Malé vodní elektrárny
- Kogenerační jednotky na bioplyn
- Geotermální elektrárny

Rozvoji využití decentralizovaných zdrojů elektrické energie v distribučních sítích brání zejména nezáměr o tyto zdroje ze strany provozovatelů distribučních sítí. Tento nezáměr plyne do jisté míry z obtížného odhadu poskytovaného výkonu těmito zdroji. Jistou možností, jak tuto překážku obejít je spojení více takovýchto zdrojů do jedné virtuální elektrárny. Virtuální elektrárnou se rozumí spojení více decentralizovaných zdrojů elektrické energie, které jsou řízeny pomocí jednoho společného řídicího systému. Zdroje nemusí být fyzicky vedle sebe, mohou být naopak od sebe velmi vzdáleny. Instalovaným výkonem takovéto virtuální elektrárny je pak součet výkonů jednotlivých zdrojů, které virtuální elektrárnu tvoří. Ve virtuální elektrárně mohou být instalovány různé druhy a kombinace výše uvedených decentralizovaných zdrojů elektrické energie. Virtuální elektrárny mohou být použity jak v základním a špičkovém režimu, tak režimu záložní výroby elektrické energie. V současné praxi se virtuální elektrárny používají výhradně pro potřeby špičkové výroby elektrické energie. Řídicí systém umožňuje nasazení pouze takového výkonu, který je potřeba pro pokrytí aktuální špičkové potřeby sítě. Plný potenciál virtuálních elektráren se ovšem bude dát využít až v případě, kdy bude v distribuční síti využit koncept řízené poptávky. S rozvojem informačních technologií se otevírají nové možnosti, jak přizpůsobit nabídku elektrické

energie poptávce a naopak. Distribuční sítě, které využívají těchto informačních technologií se nazývají inteligentní sítě (Smart grid) [11].

Budování aktivních sítí není jednoduchý úkol. Není závislé jen na fyzickém budování energetické infrastruktury, ale hlavně na vybavení sítí prvky umožňující obousměrné toky energií, rozvoji a využívání ochranných, řídicích, měřících a automatizačních technologií – na síťové inteligenci obecně.

2.4.3. Smart Grid

Inteligentní sítě (Smart grid) spojují distribuční sítě elektrické energie se sítěmi informačních a komunikačních technologií. Obsahují prvky nejen pro řízení a monitoring na straně distribuční sítě samotné, ale také na straně spotřebitele. Princip Smart grid stojí na obousměrné komunikaci o aktuálních možnostech produkce, spotřeby nebo provozních stavech mezi výrobou, distribucí a spotřebitelem či dokonce spotřebičem samotným. Díky pravidelné komunikaci ohledně spotřeby uživatelů, případně spotřebičů a do produkce zapojenými decentralizovanými zdroji elektrické energie v rámci inteligentní sítě, lze například regulovat výkon velkých elektráren (zejména uhelných). To umožňuje využití plného potenciálu zapojených decentralizovaných zdrojů elektrické energie do inteligentní sítě [33] [26].

Klíčovou podmínkou pro správné fungování a plné využití možností, které inteligentní sítě poskytují, je vybavení odběratelů chytrými digitálními měřidly. Ta umožňují, díky obousměrné komunikaci v reálném čase, řídit a monitorovat aktuální situaci v síti. Pomocí tržního systému (cenou elektrické energie), lze pak zákazníky motivovat k odběru elektrické energie v době potřeby odběru a vyrovnávat tak zatížení sítě. Propojení chytrých měřidel, spotřebičů a inteligentní sítě může také přinést větší stabilitu sítě a energetické úspory. V případě špičkového odběru elektrické energie, mohou totiž regulační prvky inteligentní sítě skrze obousměrnou komunikaci s domácím spotřebičem regulovat jeho aktuální energetický odběr. Možnost regulace lze využít například u spotřebiče s velký momentální odběr elektrické energie, který není životně důležitý pro provoz domácnosti, například krátkodobé přerušení dodávky elektrické energie do tepelného čerpadla sušičky oblečení nebo snížení výkonu topné spirály

bojleru. Tím by byla ochráněna stabilita distribuční sítě a ušetřena energie díky nespouštění špičkových či záložních zdrojů elektrické energie [34] [33].

Z pohledu provozovatelů distribučních sítí umožní inteligentní síť monitoring jednotlivých prvků v reálném čase. Tím bude možno předcházet neočekávaným výpadkům a nezvratnému poškození jednotlivých prvků. Úspěšné odvrácení těchto hrozeb je zajištěno předpoklady inteligentní sítě v samo obnovovací oblasti [35]:

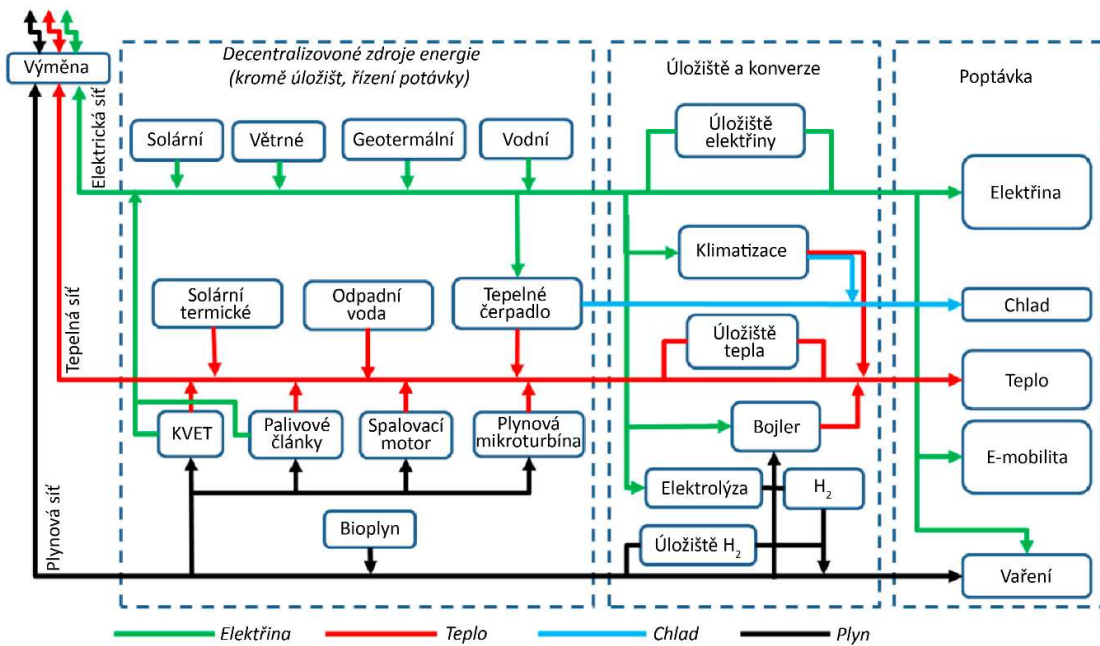
- Rychlé a spolehlivé odhalení poruch sítě
- Redistribuce zdrojů v síti k vyvarování se negativním dopadům na celou síť
- Zabezpečení plynulé a spolehlivé dodávky za všech podmínek
- Minimalizace potřebného času pro obnovení služeb

3. Komunitní energetické systémy

Tradičně byly energetické sítě budovány tak, aby vyhověly potřebám místních komunit. Energetická náročnost se zdatně zvýšila s rostoucím množstvím aktivit a potřeb obyvatelstva. Díky úsporám z rozsahu, rychle se zvyšující poptávce po energiích a doplňkovosti používaných zdrojů energie se energetická síť rychle rozrostla do současné centralizované podoby. Velké elektrárny vyrábějí elektrickou energii, která je následně jednosměrně přenášena a distribuována k užití v domácnostech, průmyslu a komerčním objektům. Teplárny a výtopy, produkují tepelnou energii, která je následně přemístěna teplovody k místu užití, jako je průmysl, komerční prostory či domácnosti. Tyto zařité modely energetických soustav si sice mohou vést dobře na poli technoeconomických otázek, nicméně jejich přínos z hlediska sociálních a některých environmentálních hodnot je sporný. Právě kvůli těmto sférám je nutné, aby se přístup provozovatelů energetických soustav zaměřil na potřeby měst, místních komunit a jejich členů [36].

Díky technologickému pokroku, rozvoji menších decentralizovaných zdrojů energie a nátlaku společnosti se doposavad zařité modely energetických soustav mění na aktivní soustavy, které umožňují zapojení decentralizovaných zdrojů energie. Aktivní využití těchto zdrojů a optimální využití možností a kapacit energetických soustav není jen o propojení distribuční soustavy tepla a elektrické energie, ale samozřejmě i o

propojení těchto soustav s distribuční sítí plynu. Dobrým příkladem propojení všech těchto dostupných sítí je využití kogeneračních jednotek, které jako palivo používají plyn z distribuční sítě plynu a vyrábí teplo, které je možné poskytovat do distribuční sítě tepelné energie a elektrickou energii, která se může předávat do distribuční sítě elektrické energie. Následující obrázek ukazuje možné toky rozdílných forem energie v integrovaném energetickém systému [36].



Obrázek 3.1: Toky forem energie v integrovaném energetickém systému [36], přeloženo

Jak je z obrázku patrné všechny druhy poptávek po energiích na straně spotřebitele mohou být pokryty z elektrické energie. Od chladu přes vaření až k e-mobilitě. Ne pro všechny druhy poptávky je ovšem využití elektrické energie to nejoptimálnější [36].

Očekává se, že individuální a komunitní výroba energií, skladování a systémy řízení budou hrát velkou roli v integrovaných energetických systémech. Odběratelé energií zapojení do těchto integrovaných energetických systémů nebudou jen pasivními odběrateli, ale budou aktivně investovat do decentralizovaných zdrojů energií, reagovat na ceny energií a sami poskytovat služby těmto integrovaným energetickým systémům. Pokles cen decentralizovaných zdrojů energií, podpora a dotace pro pořízení a využívání obnovitelných zdrojů energií (program Zelená úsporám [37]) poskytuje spotřebitelům možnost vlastnictví decentralizovaného zdroje energie a tím provozovat alespoň do jisté

míry nezávislý energetický systém. Provozovatelé současných distribučních sítí jsou tedy momentálně na pomyslné křižovatce a je třeba, aby jejich současné chování dospělo změn. Zároveň je to ovšem dobrá příležitost jak pro stranu provozovatele, tak pro stranu spotřebitele pro zavedení nového obchodního modelu, který může být oboustranně výhodný [36].

Integrované komunitní energetické systémy se zásadně liší od individuálních instalací decentralizovaných zdrojů energií jednotlivými domácnostmi díky možné koordinaci a lokální energetické výměně. Integrované komunitní energetické systémy představují komplexní a integrovaný přístup k řešení potřeb energií v rámci komunity spotřebitelů. Tento přístup poskytuje uživatelům možnost samostatně řídit jejich energetický systém a s výhodou využívat možností integrovaných energetických systémů [38].

Zvyšující se ceny energií a snižující se ceny decentralizovaných zdrojů energií mají velký vliv na povzbuzení rozvoje a vytvoření nových integrovaných komunitních energetických systémů, ve kterých si členové mohou sami řídit jejich místní energetický systém. S pokračujícím technologickým rozvojem decentralizovaných zdrojů energie a energetických úložišť se sama místní komunita, tvořící integrovaný komunitní energetický systém, může rozhodnout, zda bude jejich systém připojen do distribučních sítí či nikoliv. Výhodou integrovaných komunitních energetických systému, které jsou připojené do distribučních sítí, je možnost nakupovat případný deficit energií a naopak případný přebytek zase do distribučních sítí prodávat. Jinak řečeno mohou distribuční sítě energií plnit jakousi formu úložiště pro integrované komunitní energetické systémy. Na druhou stranu integrované komunitní energetické systémy, které nejsou připojené na žádné ostatní distribuční sítě energií, musí pokrýt poptávku spotřebitelů zapojených v tomto energetickém systému svými vlastními zdroji. Trend zvyšující se ceny za energie a trend klesání pořizovacích cen decentralizovaných zdrojů energie poskytuje uživatelům možnost zcela se odtrhnout od distribučních sítí a zřídit si své vlastní malé ostrovní energetické systémy. Nižší pořizovací cena za tyto technologické systémy zároveň umožnila spotřebitelům budovat úplně soběstačné samostatné ostrovní domy a obydlí [36].

Obě prezentované alternativní možnosti, jak integrované komunitní energetické systémy připojené k distribučním sítím, tak ostrovní integrované komunitní energetické systémy, mají své výhody a výzvy. Z technického hlediska jsou dostupné obě varianty, nicméně podrobné ekonomické a environmentální posouzení a zhodnocení těchto systémů stále chybí. Dále je třeba také posoudit, zda skupiny domácností, které se z energetického hlediska chovají jako jeden celek, mají hodnotu a přínos pro lokální komunitu stejně jako pro celý energetický systém [38].

3.1. Integrované komunitní energetické systémy jako místní alternativa pro dodávky energií

Místní komunity jsou dobrým vzorkem pro zjištění místních energetických potřeb. Zároveň jsou tyto skupiny dobrým prostředím k motivaci a dosažení společných cílů, jakými mohou být funkční soběstačnost a pružnost, a to díky blízkosti a loajalitě jednotlivých členů. Společné energetické systémy, jakými jsou integrované komunitní energetické systémy, jsou realizovány s cílem snížit náklady na energie, emise CO₂ a snížení závislosti na tradičně zavedených službách [36].

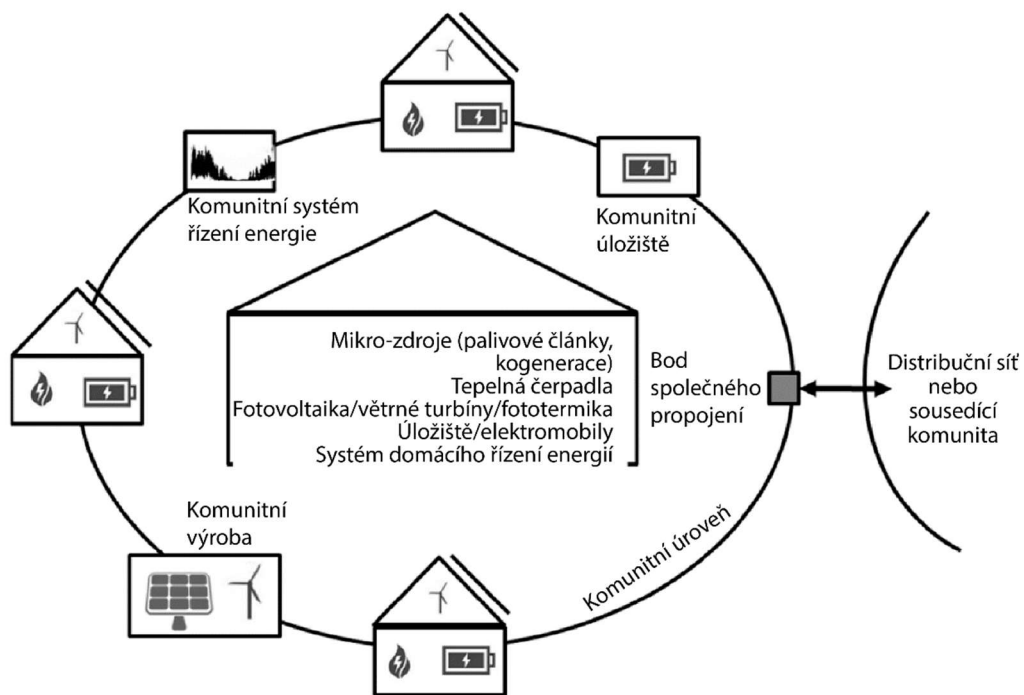
Ačkoliv se místní energetické iniciativy rapidně rozvíjejí, jejich motivací nebylo pouze naplnění cílů integrovaných komunitních energetických systémů, ale často důvody ekonomické. Zbrklá podpora obnovitelných zdrojů energií vládami zemí (například v Evropě), zapříčinila rapidní rozvoj velkých solárních a větrných elektráren, jejichž stavba byla motivována jen z důvodů garancí výhodných výkupních cen energií. Útlum těchto garancí a velký nárazový výkon daných elektráren, který vede k přebytku a nestabilitě distribuční sítě, přivedl jejich majitele do situace, ve které se musí rozhodnout a domluvit se s provozovateli distribučních sítí, jakou roli budou jejich elektrárny nadále v celém energetickém systému plnit. To také otevírá příležitost k vytvoření alternativního obchodního modelu, jehož možným záměrem může být doplnění těchto zdrojů o úložiště elektrické energie a jako celek spolu se stávajícími elektrárnami tedy plnit doplňkovou a vyvažovací službu distribuční síti. Další možností může být zapojení těchto energetických zdrojů do stávajících integrovaných komunitních energetických systémů nebo vytvoření úplně nových. Nicméně v takovémto případě by velikost těchto zdrojů a jejich vlastníci mohli přinést do

komunity problémy ohledně financování a rozhodování. Spravedlivé dělení zisku, společné financování, dotace, náklady na provoz, ale také složitost v rozhodování jsou výzvy jak pro komunity jako takové, tak pro majitele těchto zdrojů energií [36] [38].

Integrované komunitní energetické systémy se skládají z různých možností pro místní výrobu tepla a elektrické energie, flexibilní poptávce, e-mobilitě a možností ukládání energií. Tento integrovaný přístup na lokálních úrovních pomáhá zlepšit účinnost vhodnou pro lokální nabídku a poptávku. Možné a nevyhnutelné spojení integrovaných komunitních energetických systémů a technologií pro inteligentní sítě nebo s inteligentními sítěmi samotnými přinese nejenom zlepšení efektivity a spolehlivosti lokálních energetických systémů, ale také může ovlivnit strukturu a následný vývoj, kterým se budou tyto energetické systémy ubírat [36].

S rostoucí počtem místních komunit, které mají prostředky a vůli, roste počet úspěšně realizovaných projektů integrovaných komunitních energetických systémů po celém světě. Příkladem mohou být země jako Německo nebo Nizozemí, kde bylo v roce 2016 dohromady přes 1400 komunit, ve kterých mezi sebou domácnosti koordinují své energetické potřeby. Skupina několika domácností koordinující společně nákup energií a podílející se na investicích do společné infrastruktury snižuje počáteční náklady na vybudování integrovaných komunitních systémů. Integrované komunitní energetické sítě vytvářejí nová pracovní místa, pomáhají růstu místních ekonomik, podporují přechod na nízkouhlíkové zdroje energie, podporují angažovanost spotřebitelů a získávají si jejich důvěru stejně, jako poskytuje cenou flexibilitu pro trh [36].

Domácnosti jsou základním prvkem integrovaných komunitních energetických systémů. S měnící se energetickou krajinou a snižující se cenou decentralizovaných energetických zdrojů můžou tyto domácnosti investovat do pořízení takových zdrojů, jakými jsou solární fotovoltaické panely, solární termické panely, kogenerační jednotky, palivové články, elektromobily, úložiště elektrické energie a tepla, tepelná čerpadla a systémy řízení energie pro zajištění vyváženosti a optimální energetické účinnosti těchto zdrojů na úrovni takovýchto domácností. Integrované komunitní energetické systémy s připojením na distribuční sítě energií prezentuje následující Obrázek 3.2.



Obrázek 3.2: Integrovaný komunitní energetický systém s napojením na distribuční síť nebo sousední komunitu [36], přeloženo

Skupina domácností se může spojit a společně spolupracovat ve formě integrovaného komunitního systému. Mezi jeho výhody patří zejména větší úspory z rozsahu díky společné infrastruktuře, vyšší účinnost díky využívání vícera zdrojů energií s možností přeměny energií mezi sebou, zvýšení spolehlivosti za menší náklady, angažovanost členů komunity a naplnění komunitních vizí jako jsou autonomie nebo energetická nezávislost s tím, že jsou spotřebitelé ochotni zaplatit větší cenu za vyrobené energie dodané v rámci komunity. Další potencionální investice do infrastruktury a technologií jsou na komunitní úrovni možné v několika případech. Jedním z nich je nedostačující vyráběný výkon pro uspokojení energetických potřeb komunity. Tyto investice však musí být výhodnější a levnější než investice do technologií pro samotné domácnosti nebo nákup energií z distribuční sítě v případě, kdy je integrovaný komunitní energetický systém na tyto sítě připojen. Na druhou stranu se komunity musí vypořádat s výzvami, jako jsou kolektivní rozhodování ohledně investic a provozu místní sítě a systému řízení energií, nesouladu životnosti decentralizovaných zdrojů energií a místní sítě, složitý proces rozhodování a problémy spjaté s rozdělením povídek. Na základě těchto výhod a výzev se komunity samy musí rozhodnout, zda se vydají cestou ostrovních integrovaných komunitních energetických systémů nebo

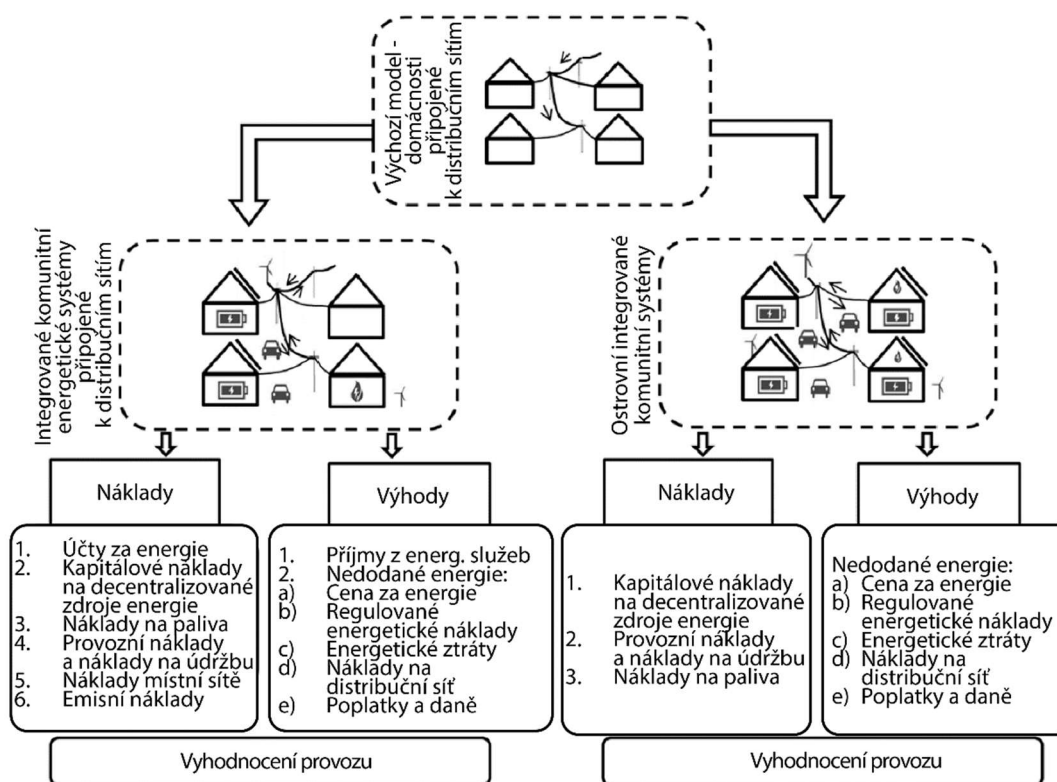
cestou integrovaných komunitních energetických systémů připojených do distribučních sítí [36].

Přebytek výroby energií integrovaných komunitních energetických systémů může být ukládán v rámci komunity nebo prodáván dále do distribučních sítí. Nedostatek energií se může naopak z distribučních sítí nakupovat. To ovšem platí pouze v případě integrovaných komunitních sítí, které jsou připojeny na distribuční síť. Integrované komunitní energetické systémy, které jsou připojené na distribuční síť energií, a které jsou vybaveny prvky umožňující ukládání energií mohou nabídnout distribučním sítím energií tyto kapacity a flexibilně tak poskytovat vyvažovací služby. Ostrovní integrované komunitní energetické systémy, které nejsou na distribuční síť energií připojeny samozřejmě tyto služby a výhody s připojením spojené poskytovat a využívat nemohou a vyvážení nabídky a poptávky si musí řešit samostatně [36].

Z technického hlediska je možné realizovat obě varianty integrovaných komunitních energetických systémů, jak systémy připojené na distribuční síť energií, tak systémy ostrovní. Z ekonomického pohledu, i přes snižující se pořizovací náklady decentralizovaných zdrojů energií, zatím ovšem nejsou ostrovní systémy výhodné. Očekává se, že integrované komunitní energetické systémy budou mít technický, ekonomický a ekologický potenciál pro zlepšení místních energetických systémů. Avšak modelování takovýchto technicko-sociálních systémů je velice obtížné [36].

3.2. Modelovací rámec integrovaných komunitních energetických systémů

Modelovací rámec integrovaných komunitních energetických systémů je vyobrazen následujícím Obrázek 3.3.



Obrázek 3.3: Modelovací rámec integrovaných komunitních energetických systémů [36], přeloženo

Domácnosti, každá se svým vlastním profilem poptávky po energiích, jsou základním prvkem integrovaných komunitních energetických systémů. Investice do decentralizovaných zdrojů energie a jejich provoz, náklady a výhody spojené s jejich provozem se liší pro oba z uvedených případů a mají vliv na celkové ekonomické a ekologické vyhodnocení [36].

Náklady integrovaných komunitních energetických systémů připojených do distribučních sítí se skládají z cen za spotřebované energie, kapitálové náklady na decentralizované zdroje energie a systém řízení energií, náklady na palivo, náklady na provoz a údržbu a náklady na místní síť, která propojuje jednotlivé domácnosti. Výhody těchto integrovaných komunitních energetických systémů plynoucí z jejich služeb jsou prospěšné jak pro jejich členy, tak pro energetický systém obecně. Některé z těchto výhod, jako jsou prodej přebytečných energií, neodebírání energií z distribučních sítí a s tím spojené energetické ztráty, zlepšují účinnost celého energetického systému. Výhodou navíc může být v případě integrovaných komunitních energetických systémů připojených na distribuční síť i to, že jejich fungováním se může snížit přenášené množství energií v distribučních sítích, a tím oddálit potřebu zvýšení jejich kapacit.

Náklady ostrovních integrovaných komunitních energetických systémů se skládají hlavně z kapitálových nákladů na decentralizované zdroje energie, náklady na provoz a údržbu a nákladech na paliva [36] [38].

4. EnergyHub

4.1. Úvod do EnergyHub

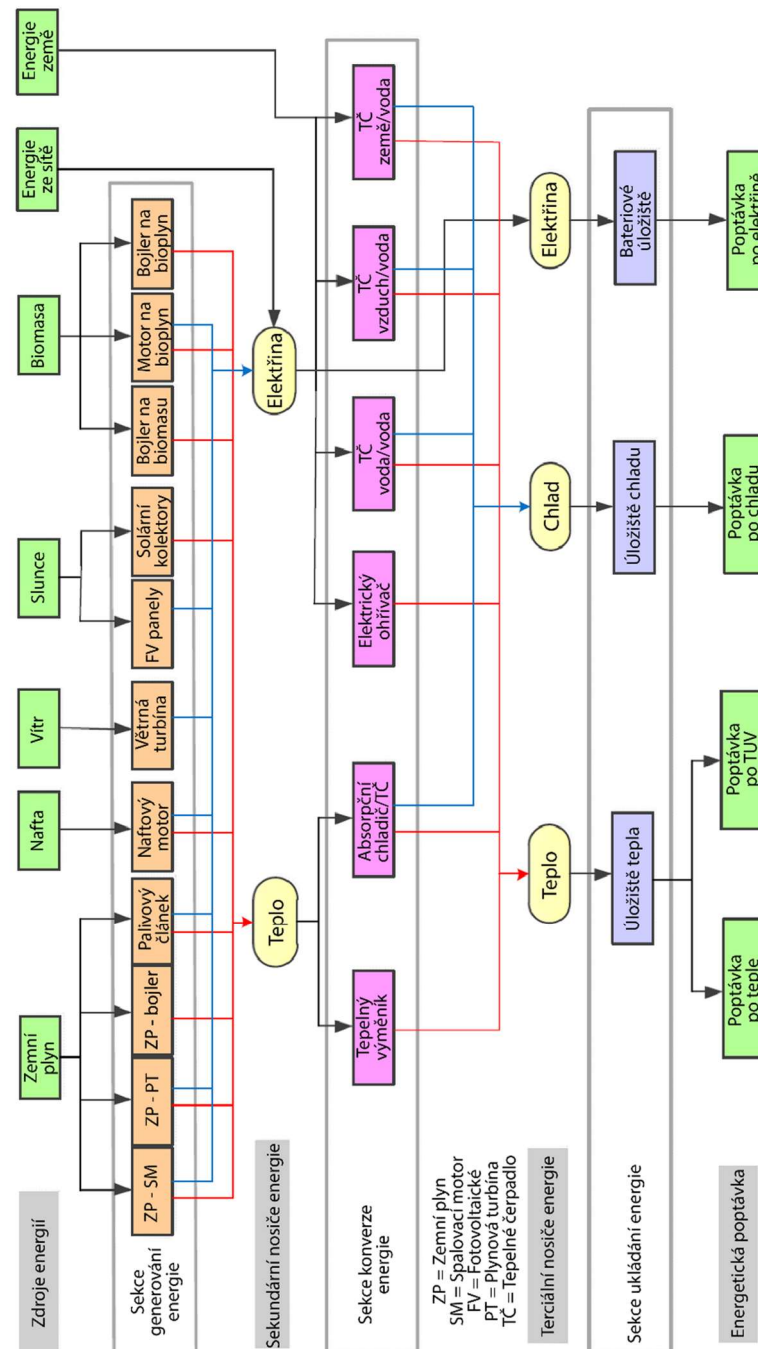
Mnohostranně chytré integrované komunitní energetické systémy umožňují optimálně využívat decentralizované i místně dostupné energetické zdroje a následně tyto energie také efektivně proměňovat mezi sebou pro okamžité uspokojení potřeb v rámci místní komunity. Právě vlastnost výměny energií mezi sebou je pro integrované komunitní energetické systémy důležitá. Optimální řízení integrovaných energetických systémů přináší technické, ekonomické a environmentální výhody jako je zvýšení spolehlivosti, snížení provozních nákladů, snížení spotřeby paliv a s tím související snížení emisí celého systému. Pro úspěšné řízení a provoz takových systémů je potřeba integrovaného rámce řízení, který dokáže optimálně rozličné komponenty. Kvůli minimalizaci energetických ztrát je výhodné, aby se konverze energií prováděla na jednom místě. V případě integrovaných komunitních energetických systémů připojených na distribuční sítě energií je také potřeba přípojních míst pro tyto distribuční sítě. Vhodným spojením těchto přípojních bodů s místem, kde probíhá konverze energií mezi sebou, případně probíhá dodatečná další výroba, a kde se může energie také ukládat a všechny komponenty také spolehlivě řídit, vzniká takzvaný EnergyHub [1].

EnergyHub může být definován jako místo či zařízení, kde probíhá výroba, konverze, ukládání a spotřeba energií z různých zdrojů. Je to nadějná možnost pro integrovaný systém řízení energetických systémů, které využívají více zdrojů energií. Tedy i pro integrované komunitní energetické systémy [39].

4.2. Obecný model EnergyHub

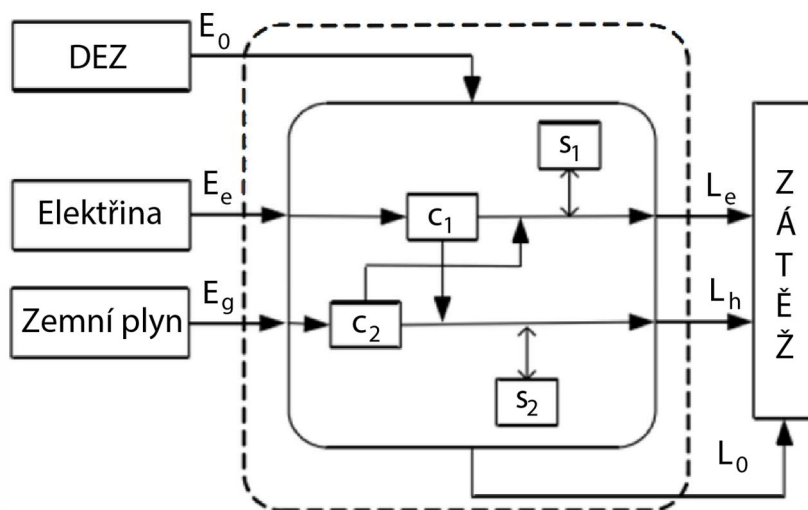
Architektura struktury EnergyHubu je tedy rozdělena do tří odpovídajících částí: výroba, konverze a ukládání. Tato obecná struktura je vyobrazena na Obrázek 4.1.

Energie vstupující do EnergyHubu je přeměněna na elektrickou a tepelnou energii díky rozličným technologiím produkce ve výrobní části struktury. Dále jsou sekundární nosiče energie (tepelná energie, elektrická energie) konvertovány na různé druhy terciálních nosičů energií (např. teplo, chlad, elektrická energie) v konverzní části struktury. Kvůli vyvážení zátěže a optimálnímu provozu můžou být tyto terciální nosiče energií uloženy v ukládací části struktury [40].



Obrázek 4.1: Obecná struktura energetického systému [40], přeloženo

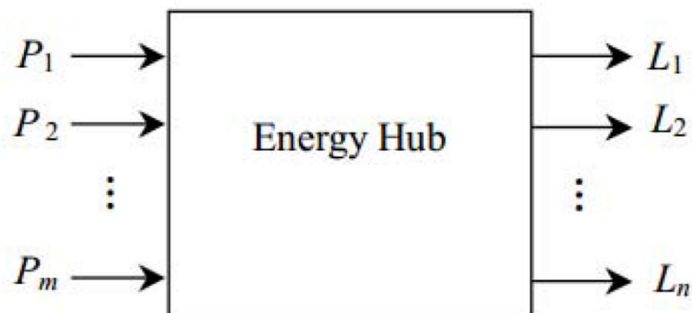
Obecný model EnergyHubu představený Göranem Anderssonem ze Švýcarského federálního institutu pro technologie si můžeme představit Obrázek 4.2, tento obecný model byl vytvořený pro zátěž zejména metropolitní oblastí [41].



DEZ - Decentralizované energetické zdroje

Obrázek 4.2: Obecný model EnergyHubu [41], přeloženo

Tento model obsahuje vstup energií, jako jsou elektrická energie a zemní plyn – označeny jako E_e a E_g a výstupy energií, kterými jsou elektrická energie a tepelná energie – označeny jako L_e a L_h . Navíc tento model počítá i s částečnou účastí decentralizovaných zdrojů energií, které do modelu vstupují jako energie E_0 na vstupu do modelu a L_0 na straně výstupu energií z modelu. Dále jsou v modelu zahrnuty konverze (c_1 , c_2) a ukládání (s_1 , s_2) těchto energií. Základní princip vstupu, přeměny a výstupu energií EnergyHubem se dá matematicky vyjádřit vazební maticí a graficky znázornit jako (Obrázek 4.3, Obrázek 4.4):



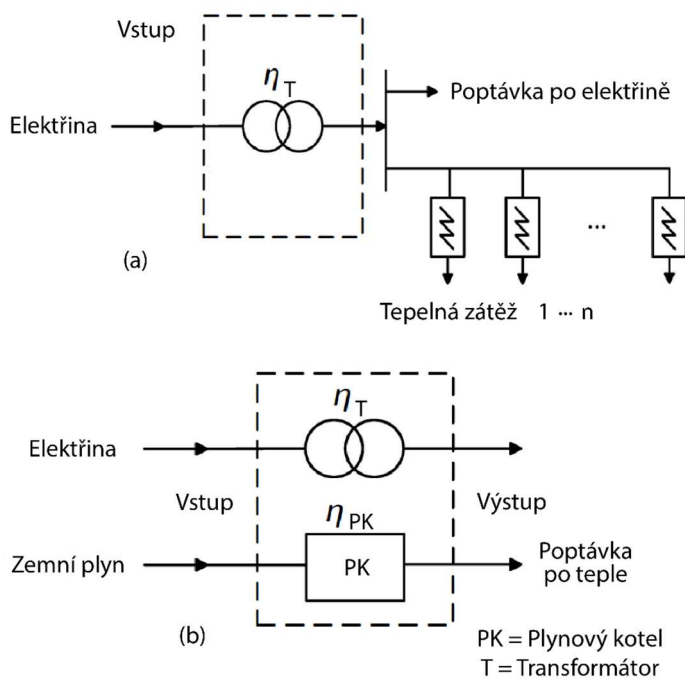
Obrázek 4.3: Vstupy a výstupy EnergyHubu [41]

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_m \end{bmatrix}$$

Obrázek 4.4: Vazební matice EnergyHubu [41]

Kde c_{ij} je konverzní faktor mezi vstupní a výstupní formou energií $E_{(1, \dots, m)}$ (respektive $P_{(1, \dots, m)}$) je vstupní energie a $L_{(1, \dots, n)}$ je energie vystupující z EnergyHubu [41]

Pro následné porovnání modelu EnergyHubu se stávajícími tradičními modely zásobování energiemi slouží následující Obrázek 4.5:



Obrázek 4.5: Tradiční modely [41], přeloženo

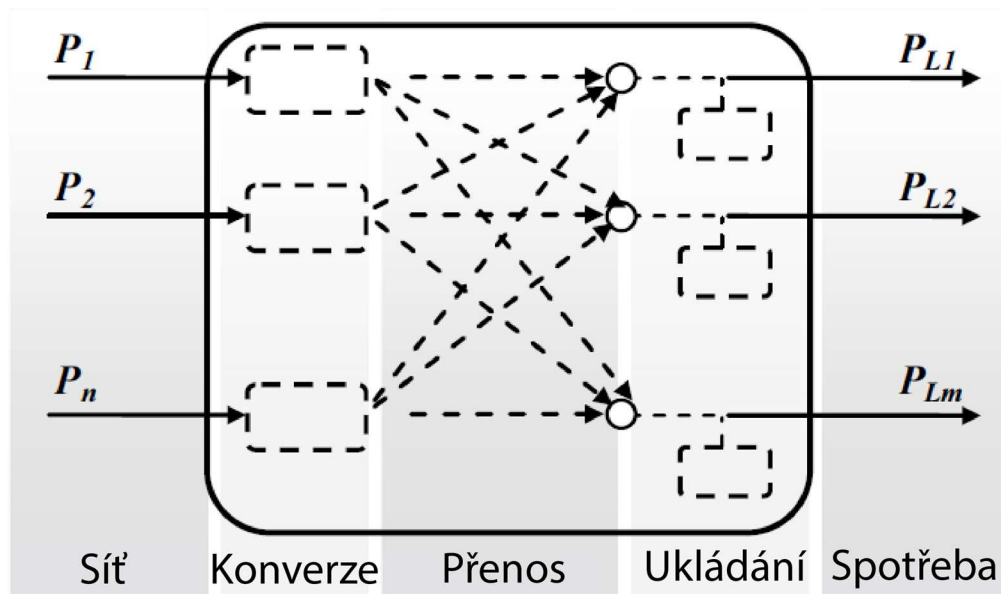
Schéma (a) na Obrázek 4.5 nám ukazuje zásobování jen elektrickou energií. Ta se využívá jak na uspokojení poptávky po teple, tak k ostatní běžné spotřebě. Schéma (b) nám ukazuje zásobování jak elektrickou energií, tak plynem, tedy zásobování například v oblastech předměstí větších měst, kde se elektrická energie používá pro běžnou spotřebu a poptávka po teple se uspokojuje spalováním plynu v plynovém kotli. Matematicky se schéma (b) dá vyjádřit jako:

$$E_e^{in}(t) = L_e/\eta_T \quad (4.1)$$

$$E_g^{in}(t) = L_g/\eta_{PK} \quad (4.2)$$

Kde E je energie vstupující, L zátěž a η účinnosti přeměny [41].

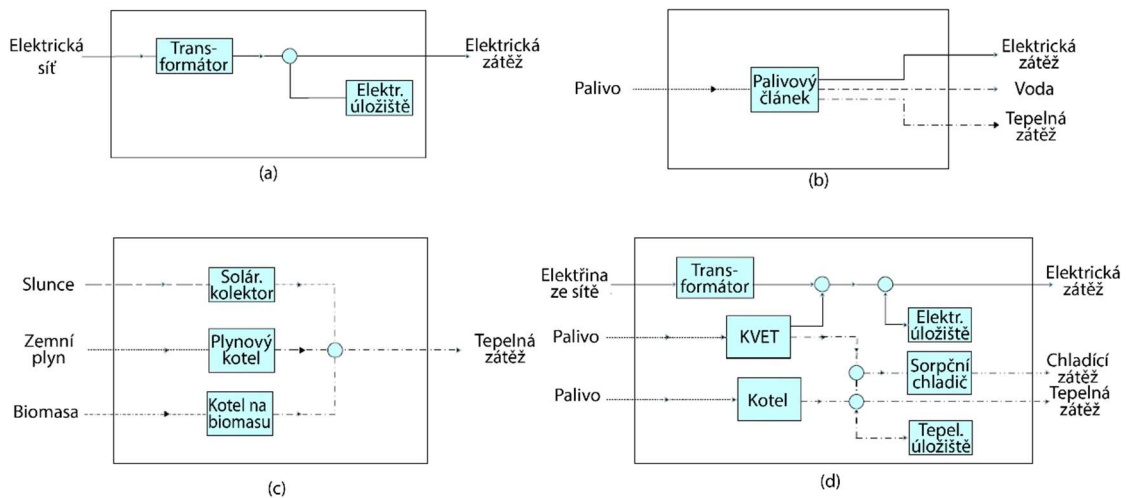
Pro porovnání s tradičními modely zásobování energiemi si můžeme strukturu EnergyHubů představit Obrázek 4.6:



Obrázek 4.6: Obecní struktura EnergyHubu [42], přeloženo

Občas se ve spojení s EnergyHubem také používá termín hybridní, který odkazuje na interakci různých energetických nosičů. Na základě těchto definic může být

uvažováno více různých druhů EnergyHubů, jak je ilustrováno na Obrázek 4.7.



Obrázek 4.7: Různé druhy EnergyHubů [1], přeloženo

Tradiční systémy zásobování energiemi mají hierarchickou strukturu a jsou odpovědné hlavně za výrobu, přenos, plánování a řízení jimi poskytovanými druhy energií, jak je znázorněno na obr. číslo (a). Podle definice EnergyHubu mohou být tedy i tyto systémy považovány za jakýsi EnergyHub, protože kvůli vztahu výrobců a spotřebitelů energií dochází v těchto systémech k přeměně, přenosu a ukládání těchto energií. Jak již bylo popsáno v předchozím textu, s příchodem decentralizovaných zdrojů energií, obzvláště těch, které získávají energie z obnovitelných zdrojů a problémy jako rozvoj infrastruktury, kvalita a spolehlivost dodávek energií, komplexnost připojení, ochrana a ekologické otázky přinesly do optimálního fungování těchto systémů nemalé výzvy. Možným řešením těchto výzev je rozvoj komplexních systémů, které využívají vícero nosičů energií, a které vyžadují aplikaci konceptu hybridních EnergyHubů (obr b a c). Tyto dva druhy EnergyHubů mají však zásadní problémy se strukturou. U první z uvedených EnergyHubů, který je vyobrazen na obrázku č. číslo (b), je poptávka po různých druzích energie uspokojována dodávkou pouze jediného nosiče energie. Druhý uvedený EnergyHub, na obrázku č. číslo (c), je problematický z pohledu cenové dostupnosti, respektive rentability. Řešením těchto problémů je model EnergyHubu s více vstupy a výstupy. Pro uspokojení poptávky po více druzích energií je nutné vybavit model EnergyHubu systémem, který takové druhy energie vyrobí za použití jediného nosiče energie. Takováto struktura EnergyHubu přináší zvýšenou účinnost, snížení spotřeby primárních energií a snížení nákladů [1].

Nejjednoduššími systémy, které použitím jednoho nosiče energie umožňují uspokojit poptávku po více druzích energie, jsou kogenerační systémy. Nejrozšířenější variantou kogeneračních systémů jsou systémy kombinované výroby elektřiny a tepla (KVET). Příklad zapojení kogeneračních systémů do modelu EnergyHubu je vyobrazen na obrázku č. něco (d). Takovéto struktury EnergyHubů umožňují uspokojit poptávku po konkrétním druhu energie různými cestami. To vede ke zlepšení spolehlivosti dodávek energií a zvýšení stupně volnosti v problematice nabídka – poptávka. Zvýšením stupně volnosti na straně nabídky možným použitím vícera nosičů energií nebo komponent v rámci EnergyHubu vzniká prostor pro možnou optimalizaci. Vstupy a komponenty EnergyHubu se dají charakterizovat na základě ceny, emisí, dostupnosti a dalších kritériích, které umožňují optimalizovat využití zdrojů energie a komponent EnergyHubu [1].

Jedna z nejvýznamnějších výhod EnergyHubů je jejich účinné využití multigeneračních (kogeneračních, třígeneračních, polygenerační) systémů za účelem optimálního využití zdrojů energie, zvýšení účinnosti a snížení nákladů a emisí. Ačkoliv jsou tyto technologické struktury hojně využívány v dostupné literatuře, jejich jednoznačná definice nebyla zatím v případě EnergyHubů ustanovena. Podle akademiků z Teheránské univerzity můžeme tyto systémy nazývat integrovanými EnergyHuby a jejich definice je následující: Integrované EnergyHuby jsou multigenerační systémy, ve kterých se vyrábějí, přenášejí, ukládají a spotřebovávají různé nosiče energie pro uspokojení různých druhů poptávek [1].

4.3. Komponenty EnergyHubu

EnergyHuby mají tedy 4 hlavní funkce: vstup energií, konverze (výroba) energií, ukládání energií a výstup energií. Komponenty vhodné pro plnění těchto funkcí jsou popsány v této kapitole [1].

4.3.1. Zdroje a výrobní komponenty

Do EnergyHubu může vstupovat energie z řady různých zdrojů jako například [40]:

- Zemní plyn

- Kapalná paliva (nafta, benzín)
- Větrná energie
- Solární energie
- Biomasa
- Geotermální energie
- Distribuční sítě energií
- Odpadní teplo z průmyslu

Tyto zdroje jsou dále využity ve výrobě energií komponenty EnergyHubu, kterými jsou zejména [40]:

- Kogenerační jednotky na zemní plyn
- Plynové mikroturbíny
- Plynové kotle
- Palivové články
- Naftové agregáty (využití pro zálohování EnergyHubu zejména v ostrovních systémech)
- Větrné turbíny
- Solární fotovoltaické panely
- Solární termické panely
- Kotle na biomasu
- Kotle na bioplyn
- Kogenerační jednotky na bioplyn

4.3.2. Konverzní komponenty

- Transformátory
- Tepelné výměníky
- Sorpční chladiče
- Elektrické ohřivače
- Tepelná čerpadla

Pro potřeby ukládání energií v EnergyHubu se využívají [40]:

- Úložiště tepla (nejběžněji úložiště horké vody)

- Úložiště chladu (zejména úložiště chladu ve formě ledu)
- Bateriová úložiště pro ukládání elektrické energie

4.4. Matematický model

Matematický model EnergyHubu je dán objektivní hodnoticí funkcí, omezeními danými komponenty EnergyHubu a bilancí toků energií EnergyHubem.

4.4.1. Objektivní funkce

Objektivní hodnoticí funkce matematického modelu EnergyHubu je sestavená z cen vstupních komodit a denní spotřeby těchto komodit. Kritériem této hodnoticí funkce je tedy suma nákladů na tyto komodity [40].

$$\min OF = \sum_t \lambda_t^a A_t + \lambda_t^b B_t \dots + \lambda_t^n N_t \quad (4.3)$$

Kde $\lambda_t^a \dots \lambda_t^n$ jsou jednotkové ceny vstupních komodit a $A_t \dots N_t$ jsou spotřeby těchto komodit.

4.4.2. Omezení

4.4.2.1. Energetické bilance

Množství energií, které vstupují do EnergyHubu, a které jsou potřebné pro uspokojení poptávky skrze přeměnu, výrobu či skladování těchto energií komponenty EnergyHubu, jsou dány součtem energií vstupující do komponent EnergyHubu [40].

$$P(t) = \sum_t A_{i,t} + A_{j,t} \dots A_{n,t} \quad (4.4)$$

Kde $A_{i,t} \dots A_{n,t}$ je množství vstupních energií do EnergyHubu.

Množství energií, které vystupují z EnergyHubu, a které jsou potřebné pro uspokojení poptávky, jsou dány součtem energií vystupujících z komponent EnergyHubu [40].

$$L(t) = \sum_t B_{i,t} + B_{j,t} \dots B_{n,t} \quad (4.5)$$

Kde $B_{i,t} \dots B_{n,t}$ je množství vystupujících energií z EnergyHubu.

4.4.2.2. Omezení daná dodávkami energií sítěmi

Množství energií vstupujících do EnergyHubu z distribučních sítí je omezeno kapacitou přípojek těchto distribučních sítí. Případně je toto omezení dáno smluvně [40].

$$P_x^{net}(t) \leq P_x^{max} \quad (4.6)$$

Kde P_x^{net} je okamžité množství potřebné pro provoz EnergyHubu a P_x^{max} je kapacita přípojek [40].

4.4.2.3. Omezení konverze a výroby

Přeměna energií z jedné formy na druhou, její výroba či případně přeměna energie na její nižší úroveň není bezztrátová. Komponenty umožňující přeměnu nebo výrobu energií zároveň fungují v rámci svých provozních rozsahů. Přeměna, účinnost přeměny a provozní rozsahy jsou vyjádřeny jako [40]:

$$B_t^{min} < B_t < B_t^{max} \quad (4.7)$$

$$B_t = \eta_x A_t \quad (4.8)$$

$$\eta_x < 1 \quad (4.9)$$

Kde B_t^{min} je minimální provozní výkon komponenty, B_t je okamžitý provozní výkon komponenty a B_t^{max} je maximální provozní výkon komponenty. Fungování komponent můžeme vyjádřit jako výrobu energií B_t spotřebou vstupní komodity A_t s danou účinností η_x . Primární účinnost η_x je vždy menší 1 [40].

4.4.2.4. Omezení úložišti energií

EnergyHub může mít tři možné typy úložišť – úložiště chladu, tepla a elektrické energie. V principu ovšem všechny z těchto typů úložišť fungují stejným způsobem, který se dá vyjádřit následujícími rovnicemi [43]:

$$SOC_t = SOC_{t-1} + (A_t \eta_a - \frac{B_t}{\eta_b}) \Delta_t \quad (4.10)$$

$$A_{min} \leq A_t \leq A_{max} \quad (4.11)$$

$$B_{min} \leq B_t \leq B_{max} \quad (4.12)$$

$$SOC_{min} \leq SOC_t \leq SOC_{max} \quad (4.13)$$

Proměnná SOC vyjadřuje stav nabití úložiště, A je množství energie vstupující do úložiště a B představuje množství energie z úložiště vystupující. První rovnice ukazuje změnu úrovně nabití oproti předchozímu stavu s účinnostmi nabíjení η_a nebo vybíjení η_b . Limity nabíjení nebo vybíjení úložiště jsou omezeny maximálními a minimálními hodnotami, tj. A_{min} , A_{max} , B_{min} , B_{max} , a úroveň nabití úložiště je vymezena minimální hodnotou kapacity úložiště SOC_{min} a maximální hodnotou kapacity úložiště SOC_{max} [43].

4.4.2.5. Cena energií

Cena energií hraje kritickou roli v objektivní hodnotící funkci. Může být konstantní v čase, jako je to například v případě ceny plynu, nebo určována dynamickými metodami. Ty se při určování ceny energií uplatňují například u elektrické energie, přičemž v České republice je známe zejména jako sazby [40] [44].

4.5. Optimalizace

V dnešní době je ve vědeckých výzkumech velmi rozšířená optimalizace k řešení praktických problémů a v oblasti energií má její využití rostoucí tendenci. Nedávné výzkumy ohledně problematiky optimalizace fungování EnergyHubů nabízí různé objektivní hodnotící funkce a omezení a užívají rozličné nástroje k řešení včetně vyšších programovacích jazyků jako Delphi, Matlab nebo Fortran. Velmi rozšířeným vyšším programovacím jazykem, který se v poslední době velmi používá k optimalizaci EnergyHubů je obecný algebraický modelovací systém (General Algebraic Modeling System – GAMS), který používá zabudované algoritmy (řešitele), které řeší problematiku optimálního fungování EnergyHubů. Většina dosavadních výzkumů ohledně optimálního fungování EnergyHubů mají objektivní hodnotící funkci postavenou na ekonomických aspektech této problematiky, není však takový problém tuto objektivní hodnotící funkci postavit například na aspektech environmentálních [44] [45] [40].

Složení EnergyHubu, tedy jeho vstupy a komponenty, mají velký vliv na jeho fungování jako celku. Zvolením vhodných komponent a energetických zdrojů je možné nalézt nejvhodnější a neoptimálnější variantu EnergyHubu pro minimalizaci objektivní

hodnotící funkce za daných vstupních dat poptávek po energiích spotřebiteli. Cílem optimalizace EnergyHubu je tedy nalezení nejvýhodnější kombinace vstupů energií a komponent výroby, přeměny a skladování v EnergyHubu pro minimalizaci např. provozních nákladů nebo emisí CO₂ [44] [45] [40].

5. Obecný algebraický modelovací systém - GAMS

Obecný algebraický modelovací systém (General Algebraic Modeling System – GAMS) je vysokoúrovňový modelovací systém pro matematické programování a optimalizaci. Skládá se z překladače jazyka a stabilních integrovaných vysoce výkonných řešitelů. GAMS je navržen pro komplexní rozsáhlé modelovací aplikace a umožňuje vytvářet velké udržovatelné modely, které lze rychle přizpůsobit novým situacím. GAMS je konkrétně navržen pro modelování lineárních, nelineárních a smíšených optimalizačních problémů [46].

GAMS umožňuje formulovat matematické modely v podobě velmi blízké jejich matematickému popsání, ale zároveň je jazyk systému GAMS podobný běžným programovacím jazykům, proto umožňuje chápat a udržovat matematické modely nejen programátory ale i vědce v oboru [46].

Prvky jazyka GAMS umožňují vytváření komplexních algoritmů, které jsou zvláště vhodné pro popsání neobvyklých problémů, které jsou často spjaté s výkonnostními problémy [46].

5.1. Výchozí matematický model EnergyHubu

Pro detailní popsání fungování matematického modelu EnergyHubu byla zvolena komplexní varianta složení komponent. V praktické části této diplomové práce z této varianty vychází ostatní modely EnergyHubu upravené pro dané místní podmínky.

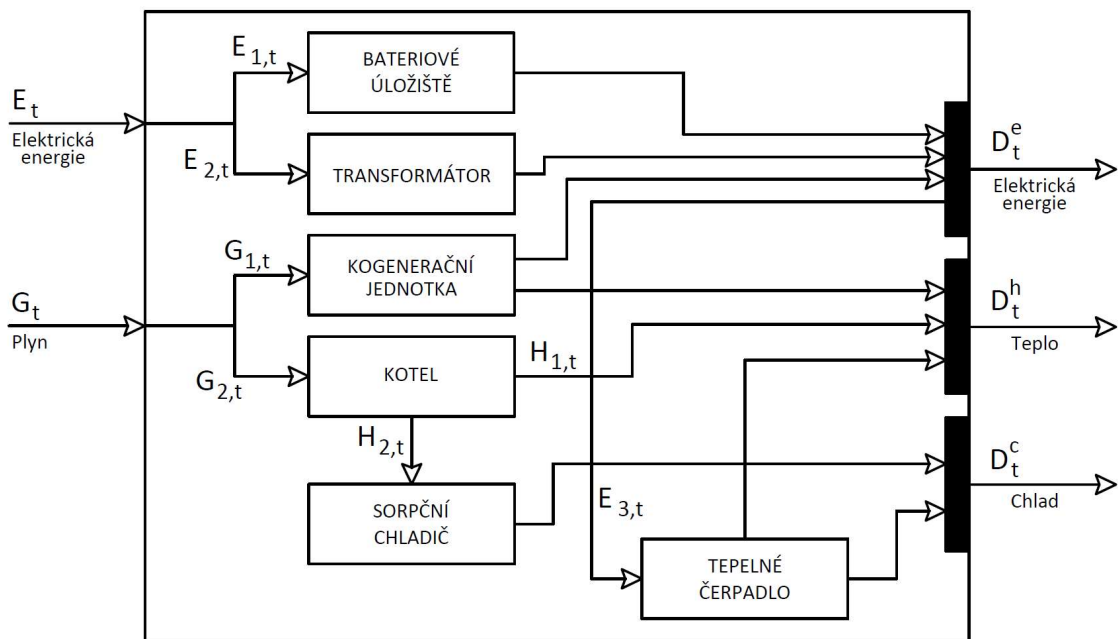
5.1.1. Popis výchozího modelu EnergyHubu

Následující obrázek ukazuje rozložení komponent výchozího modelu EnergyHubu. Na vstup EnergyHubu nám přichází elektrická energie z distribuční sítě a plyn z distribuční sítě plynu [43].

EnergyHub je osazen následujícími komponenty:

- Bateriové úložiště
- Transformátor
- Kogenerační jednotka
- Kotel
- Sorpční chladič
- Tepelné čerpadlo

Na výstupu EnergyHubu odchází elektrická energie, teplo a chlad ke koncovým zákazníkům [43].



Obrázek 5.1: Výchozí model EnergyHubu [43], přeloženo, upraveno

5.1.2. Komponenty výchozího modelu EnergyHubu a matematický popis jejich fungování

Komponenty výchozího modelu EnergyHubu a matematický popis jejich fungování jsou popsány v následující kapitole.

5.1.2.1. Bateriové úložiště

Bateriové úložiště umožňuje skladování elektrické energie a její následné využití v době, kdy je nejvíce potřeba. Může jít o dobu, kdy je v síti odběrová špička a je třeba pokrýt okamžitý odběr koncových odběratelů nebo dále také o dobu, kdy je hodinová sazba za elektrickou energii vysoká a bateriové úložiště je dostatečně nabité. V tomto případě se dá uložená elektrická energie v bateriovém úložišti využít pro redukcii spotřeby v tuto dobu drahé elektrické energie z distribuční sítě a tím šetřit finance spojené s jejím odběrem. Bateriové úložiště umožňuje redukovat náklady spojené s odběrem elektrické energie z distribuční sítě tím, že se dokáže v době, kdy je elektrická energie levná nabít a následně takto levně nabitou elektrickou energii poskytnout svým odběratelům v době, kdy by přímá spotřeba elektrické energie z distribuční sítě byla nákladná [47].

Matematická model bateriového úložiště můžeme vyjádřit následujícími rovnicemi [43]:

$$SOC_t = SOC_{t-1} + (E_t^{ch}\eta_c - \frac{E_t^{dch}}{\eta_d})\Delta_t \quad (5.1)$$

$$E_{min}^{ch} \leq E_t^{ch} \leq E_{max}^{ch} \quad (5.2)$$

$$E_{min}^{dch} \leq E_t^{dch} \leq E_{max}^{dch} \quad (5.3)$$

$$SOC_{min} \leq SOC_t \leq SOC_{max} \quad (5.4)$$

$$I_t^{dch} + I_t^{ch} \leq 1 \quad (5.5)$$

$$I_t^{ch}, I_t^{dch} \in \{0,1\} \quad (5.6)$$

SOC_t je stav bateriového úložiště v danou hodinu, $E_t^{ch/dch}$ vyjadřuje množství nabíjené nebo vybíjené elektrické energie v danou hodinu a proměnné I_t^{ch}, I_t^{dch} vyjadřují, zda se bateriové úložiště v danou hodinu nabíjí nebo vybíjí. Proměnné η_c a η_d vyjadřují účinnost nabíjení, resp. vybíjení bateriového úložiště. Dále proměnné SOC_{min} a SOC_{max} vyjadřují maximální, resp. minimální kapacitu bateriového úložiště a proměnné $E_{max}^{ch/dc}$ a $E_{min}^{ch/dch}$ vyjadřují maximální a minimální limity nabíjení/vybíjení bateriového úložiště [43].

5.1.2.2. Transformátor

Transformátor je netočivé elektrické zařízení umožňující přeměnu střídavého napětí. Povětšinou je tvořen dvěma vinutími. Proud protékající primárním vinutím vytváří proměnlivý magnetický tok. Vlivem toho proměnlivého magnetického toku dochází k indukci napětí v sekundárním vinutí transformátoru. Na vstup transformátoru vstupuje elektrická energie a na výstupu transformátoru je taktéž elektrická energie, ovšem o jiném napětí [48]. Pro potřeby matematického modelu EnergyHubu můžeme transformátor vyjádřit takto:

$$E_t^{out} = \eta_{ee} E_t^{in} \quad (5.7)$$

Přeměna úrovně elektrického napětí není bezztrátová, proto je třeba zavést i účinnost transformátoru η_{ee} [43].

5.1.2.3. Kogenerační jednotka

Kogenerační jednotka je zařízení pro kombinovanou výrobu elektrické energie a tepla. V podstatě je to spalovací motor, který pohání elektrický generátor a vyrábí elektrickou energii. Odpadní teplo, které ve spalovacím motoru kogenerační jednotky spalovacím procesem vzniká se motoru odebírá chladicí soustavou a dále se využívá jako tepelná energie pro vytápění nebo ohřev teplé vody. Nejběžněji se jako palivo pro kogenerační jednotky využívá zemní plyn [49]. Matematicky můžeme kombinovanou výrobu elektrické energie a tepla popsat takto:

$$H_t = \eta_{gh}^{chp} G_t \quad (5.8)$$

$$E_t = \eta_{ge}^{chp} G_t \quad (5.9)$$

První rovnice vyjadřuje množství tepla H_t vyrobené kogenerační jednotkou spálením plynu G_t s účinností η_{gh}^{chp} . Druhá rovnice pak vyjadřuje množství vyrobené elektrické energie E_t spálením množství plynu G_t s účinností η_{ge}^{chp} [43].

5.1.2.4. Kotel

Kotel je jednoduché spalovací zařízení, kde se spalováním paliva vyvíjí teplo. V rámci výchozího matematického modelu se jako palivo využívá zemní plyn [50]. Tento jednoduchý proces výroby tepelné energie spalováním plynu v kotli vyjadřuje následující rovnice:

$$H_t = \eta_{gh} G_t \quad (5.10)$$

Kde H_t je množství vyrobené tepelné energie, η_{gh} je účinnost kotle a G_t je množství paliva [43].

5.1.2.5. Sorpční chladič

Sorpční chladič je chladič využívající principu sorpčního chlazení. K chlazení se využívá adsorpčního či desorpčního principu, kdy se dodávaným teplem chladiči vyrábí chlad [51]. Matematicky lze princip fungování sorpčního chladiče je vyjádřen jako:

$$C_t = \eta_{hc} H_t \quad (5.11)$$

Kde C_t je množství vyrobeného chladu, η_{hc} je účinnost přeměny tepla na chlad a H_t je množství tepla dodaného chladiči [43].

5.1.2.6. Tepelné čerpadlo

Tepelné čerpadlo je zařízení které čerpá teplo z chladnějšího místa na místo teplejší s vynaložením vnější práce. Na vstup tepelného čerpadla se přivádí elektrická energie, která pohání kompresor. Ten stlačuje plynné chladivo, které putuje do kondenzátoru, kde odevzdá své skupenské teplo a ohřívá topnou látku (například topnou vodu). Následně přes redukční ventil putuje chladivo do výparníku, kde při nižším tlaku a teplotě skupenské teplo přijme, tím ochladí chladicí látku kolující přes výparník (například chladicí vodu) a putuje zpět do kompresoru a celý proces se opakuje [52]. Celý proces fungování tepelného čerpadla matematicky vyjadřují následující rovnice:

$$C_t + H_t = E_t \times COP \quad (5.12)$$

$$H_t^{min} I_t^h \leq H_t \leq H_t^{max} I_t^h \quad (5.13)$$

$$C_t^{min} I_t^c \leq C_t \leq C_t^{max} I_t^c \quad (5.14)$$

$$I_t^c + I_t^h \leq 1 \quad (5.15)$$

$$I_t^c, I_t^h \in \{0,1\} \quad (5.16)$$

Tepelné čerpadlo může fungovat buď v režimu výroby chladu nebo tepla. Tyto stavy nám vyjadřují proměnné I_t^c resp. I_t^h . Množství chladicího výkonu C_t nebo topného výkonu H_t je v daných mezích minimálního chladicího výkonu C_t^{min} resp. topného výkonu H_t^{min} a maximálního chladicího výkonu C_t^{max} resp. topného výkonu H_t^{max} [43].

5.1.3. Rovnice matematického výchozího modelu EnergyHubu

Matematický model EnergyHubu je popsán souborem rovnic. Celý model je složen z rovnic komponent samotného EnergyHubu a energetické bilance toků jednotlivých forem energie skrze EnergyHub. Hlavním kritériem pro hodnocení celého matematického modelu je objektivní funkce. Minimalizací její hodnoty nalezneme nejoptimálnější fungování EnergyHubu dle požadových kritérií a vstupů. Takovýto matematický model je úlohou lineárního programování, avšak při zavedení binárních rovnic, které vyjadřují provozní režimy komponentů je jej třeba řešit jako úlohu smíšeného celočíselného lineárního programování [26] [53].

Matematický model výchozího modelu EnergyHubu je složen z následujících rovnic.

5.1.3.1. Objektivní funkce

$$\min OF = \sum_t \lambda_t^e E_t + \lambda_t^g G_t \quad (5.17)$$

Jde o hlavní hodnotící funkci celého modelu EnergyHubu, minimalizací její výsledné hodnoty nalezneme nejoptimálnější řešení fungování celého modelu. Výsledná hodnota je dána součtem spotřeb jednotlivých vstupních komodit vynásobených jednotkovou cenou těchto komodit. Při takto zvoleném postupu se nejoptimálnější řešení hledá pomocí minimalizace provozních nákladů – tedy minimalizace částky za spotřebované vstupní komodity, které jsou EnergyHubem spotřebovány [40]. Objektivní funkce modelu EnergyHubu nemusí být postavená na finančním aspektu závislejícím na

množství spotřebovaných vstupních komodit, ale i na dalších různých aspektech jako například na emisích CO₂ či jiných škodlivin. V tom případě by do rovnice nevstupovaly jednotkové ceny těchto komodit, ale například množství vyprodukovaného CO₂ na jednotky spotřebovaných komodit. Na levé straně rovnice je proměnná OF , kterou chceme minimalizovat. Na pravé straně rovnice stojí suma součinů $\lambda_t^e E_t$ a $\lambda_t^g G_t$, kde λ_t^e je cena elektrické energie, λ_t^g je cena plynu, E_t je množství spotřebované elektrické energie a G_t vyjadřuje množství spotřebovaného plynu [43].

5.1.3.2. Elektrická energie na vstupu EnergyHubu

$$E_t = E_{1,t} + E_{2,t} \quad (5.18)$$

Tato rovnice vyjadřuje bilanci toku elektrické energie na vstupu do EnergyHubu. Celkový tok elektrické energie vstupující do EnergyHubu E_t je součtem dílčích toků elektrické energie vstupující do bateriového úložiště $E_{1,t}$ a toku elektrické energie vstupující do transformátoru $E_{2,t}$ [43].

5.1.3.3. Elektrická energie na výstupu EnergyHubu

$$\eta_{ee} E_{2,t} + E_t^{dch} + \eta_{ge} G_{1,t} = D_t^e + E_{3,t} \quad (5.19)$$

Touto rovnicí je vyjádřen tok elektrické energie vystupující z EnergyHubu. Tato rovnice je složena z členů vyjadřující jednotlivé komponenty, které pracují s elektrickou energií a jedním členem, který zastupuje poptávku spotřebitelů připojených na EnergyHub po elektrické energii. Na levé straně rovnice se sčítají tři členy, které reprezentují výrobu, přeměnu a ukládání elektrické energie v EnergyHubu. První člen $\eta_{ee} E_{2,t}$ vyjadřuje tok elektrické energie transformátorem, kde se snižuje napětí z distribuční sítě na úroveň napětí vhodného pro koncové spotřebitele. Tok elektrické energie do transformátoru je vyjádřen jako $E_{2,t}$ a účinnost transformátoru jako η_{ee} . Druhý člen levé strany rovnice E_t^{dch} je tok elektrické energie z bateriového úložiště, tento člen je nenulový pouze v tu dobu, kdy je vhodné využívat elektrickou energii uchovanou v bateriovém úložišti. Třetí člen na levé straně rovnice $\eta_{ge} G_{1,t}$ vyjadřuje výrobu elektrické energie kogenerační jednotkou. $G_{1,t}$ je spotřeba plynu a η_{ge} je účinnost přeměny plynu na elektrickou energii kogenerační jednotkou. Na pravé straně rovnice se sčítají dva členy, které vyjadřují potřebnou elektrickou energii z EnergyHubu.

První člen pravé strany D_t^e zastupuje poptávku po elektrické energii spotřebiteli připojenými na EnergyHub a člen $E_{3,t}$ vyjadřuje potřebnou elektrickou energii pro provoz tepelného čerpadla [43].

5.1.3.4. Vstup elektrické energie do bateriového úložiště

$$E_{1,t} = E_t^{ch} \quad (5.20)$$

Tato krátká rovnice přiřazuje část toku elektrické energie vstupující do EnergyHubu $E_{1,t}$ jako tok elektrické energie do bateriového úložiště E_t^{ch} [43].

5.1.3.5. Stav a změna nabití bateriového úložiště

$$SOC_t = SOC_{t-1} + \left(E_t^{ch} \eta_c - \frac{E_t^{dch}}{\eta_d} \right) \Delta t \quad (5.21)$$

Rovnice vyjadřující stav a změnu nabití bateriového úložiště. Člen na levé straně rovnice SOC_t reprezentuje aktuální stav nabití bateriového úložiště v danou dobu a je dán součtem členů na pravé straně rovnice. Pravá strana rovnice vyjadřuje změnu stavu nabití bateriového úložiště. Člen SOC_{t-1} zastupuje stav nabití bateriového úložiště v předešlou dobu. Členy v závorce popisují proces nabíjení nebo vybíjení bateriového úložiště. Proces nabíjení bateriového úložiště je popsán členem $E_t^{ch} \eta_c$, který vyjadřuje množství elektrické energie, která nabíjí bateriové úložiště. Je složen z proměnné E_t^{ch} , což je tok elektrické energie do bateriového úložiště, a která je upravena (v tomto případě vynásobena) účinností nabíjecího procesu bateriového úložiště η_c . Podobně jako proces nabíjení bateriového úložiště je popsán také proces vybíjení bateriového úložiště. Proces vybíjení je definován záporným členem $\frac{E_t^{dch}}{\eta_d}$, který vyjadřuje množství elektrické energie, která vybíjí bateriové úložiště. Proměnná E_t^{dch} je tok elektrické energie z bateriového úložiště, která je upravena (v tomto případě vydělena) účinností vybíjecího procesu bateriového úložiště η_d [43].

5.1.3.6. Provozní režimy bateriového úložiště

$$I_t^{dch} + I_t^{ch} \leq 1 \quad (5.22)$$

$$I_t^{ch}, I_t^{dch} \in \{0,1\} \quad (5.23)$$

Bateriové úložiště má dva provozní režimy – nabíjení nebo vybíjení akumulátorů bateriového úložiště. Tyto režimy nemohou běžet najednou, proto jsou zavedeny binární proměnné I_t^{ch} a I_t^{dch} , které určují, v jakém režimu bateriové úložiště momentálně funguje. V případě, kdy se bateriové úložiště nabíjí je hodnota členu I_t^{ch} 1, jakmile se bateriové úložiště nenabíjí nabývá člen I_t^{ch} hodnoty 0. To samé platí pro vybíjení bateriového úložiště. V případě, kdy se bateriové úložiště vybíjí nabývá hodnota proměnné I_t^{dch} hodnoty 1 a v případě, kdy se bateriové úložiště nevybíjí nabývá proměnná I_t^{dch} hodnoty 0. Toto omezení je vyjádřeno první rovnicí z výše uvedené dvojice, která říká, že součet těchto proměnných nemůže být menší nebo roven 1. Jelikož jde o binární proměnné a jejich hodnota tedy může být jen 1 či 0, nemůže tedy nastat situace, kdy by se bateriové úložiště, jak nabíjelo, tak vybíjelo [43].

5.1.3.7. Nabíjecí rozsah bateriového úložiště

$$E_{min}^{ch} I_t^{ch} \leq E_t^{ch} \leq E_{max}^{ch} I_t^{ch} \quad (5.24)$$

Nabíjení bateriového úložiště je omezeno minimální a maximální hodnotou. Nabíjení bateriového úložiště E_t^{ch} je zezdola omezeno minimální hodnotou E_{min}^{ch} a shora hodnotou E_{max}^{ch} . Člen I_t^{ch} , který nabývá buď hodnoty 1 nebo hodnoty 0 určuje, zda se v daný moment bateriové úložiště nabíjí či ne [43].

5.1.3.8. Vybíjecí rozsah bateriového úložiště

$$E_{min}^{dch} I_t^{dch} \leq E_t^{dch} \leq E_{max}^{dch} I_t^{dch} \quad (5.25)$$

Stejně jako u nabíjení platí tato omezení i pro vybíjení bateriového úložiště. Člen E_{min}^{dch} určuje minimální hodnotu vybíjení bateriového úložiště a člen E_{max}^{dch} určuje hodnotu maximální. Vybíjení bateriového úložiště E_t^{dch} pak leží mezi těmito hodnotami. Člen I_t^{dch} určuje, zda se bateriové úložiště vybíjí či nikoliv. Nabývá hodnot 1 a 0 stejně jako v případě nabíjení [43].

5.1.3.9. Kapacita bateriového úložiště

$$SOC_{min} \leq SOC_t \leq SOC_{max} \quad (5.26)$$

Bateriové úložiště má svou maximální kapacitu. Ta je vyjádřena proměnnou SOC_{max} . Akumulátory bateriového úložiště není vhodné zcela vybit, mohlo by dojít k poškození akumulátorů. Z tohoto důvodu je zavedena proměnná SOC_{min} , která určuje dolní mez vybití akumulátorů. Okamžitý stav nabití akumulátorů bateriového úložiště SOC_t tedy leží mezi těmito hodnotami, jak ukazuje tato rovnice [43].

5.1.3.10. Plyn na vstupu do EnergyHubu

$$G_t = G_{1,t} + G_{2,t} \quad (5.27)$$

Obdobně jako tok elektrické energie je popsán i tok plynu EnergyHubem. Plyn vstupující do EnergyHubu G_t je součtem plynu tekoucího do kogenerační jednotky $G_{1,t}$ a tokem plynu do plynového kotle $G_{2,t}$ [43].

5.1.3.11. Teplo na výstupu z EnergyHubu

$$\eta_{gh} G_{1,t} + H_{1,t} + H_t^{EHP} = D_t^h \quad (5.28)$$

Výstup tepelné energie z EnergyHubu je vyjádřen jako poptávka spotřebitelů připojených na EnergyHub po tepelné energii D_t^h . Tato poptávka vstupuje do rovnice toku plynu EnergyHubem jako součet výstupů tepelné energie komponent EnergyHubu, které tepelnou energii vyrábí nebo přeměňují. Člen rovnice $\eta_{gh} G_{1,t}$ vyjadřuje výstup tepelné energie z kogenerační jednotky, kde proměnná η_{gh} je účinnost přeměny plynu na tepelnou energii a $G_{1,t}$ množství plynu vstupující do kogenerační jednotky. Člen $H_{1,t}$ je množství tepelné energie vystupující z plynového kotle určené přímo pro uspokojení poptávky po tepelné energii a člen H_t^{EHP} je množství tepelné energie vystupující z tepelného čerpadla [43].

5.1.3.12. Plynový kotel

$$\eta_{gh}^f G_{2,t} = H_{1,t} + H_{2,t} \quad (5.29)$$

Tato rovnice vyjadřuje proces spalování plynu v plynovém kotli a výrobu tepelné energie tímto kotlem. Na vstup do plynového kotle vstupuje množství plynu $G_{2,t}$, které je s účinností η_{gh}^f spáleno na tepelnou energii $H_{1,t}$, což je tepelná energie určená přímo k uspokojení poptávky spotřebitele po tepelné energii a $H_{2,t}$ je tepelná energie určená pro výrobu chladu sorpčním chladičem [43].

5.1.3.13. Chlad na výstupu z EnergyHubu

$$\eta_{hc}H_{2,t} + C_t^{EHP} = D_t^c \quad (5.30)$$

Výstup chladu z EnergyHubu je popsán rovnicí jako součet výstupů chladu z komponent EnergyHubu, které chlad vyrábí nebo přeměňují z jiných forem energie. Součet těchto výstupů je v rovnici vyjádřen jako poptávka spotřebitelů připojených na EnergyHub po chladu D_t^c . Člen rovnice $\eta_{hc}H_{2,t}$ je výstup chladu ze sorpčního chladiče. Množství tepelné energie vstupující do sorpčního chladiče $H_{2,t}$ je s účinností přeměny tepla na chlad sorpčního chladiče η_{hc} měněno na chlad. Člen rovnice C_t^{EHP} vyjadřuje výstup chladu z tepelného čerpadla [43].

5.1.3.14. Provozní režimy tepelného čerpadla

$$I_t^c + I_t^h \leq 1 \quad (5.31)$$

$$I_t^c, I_t^h \in \{0,1\} \quad (5.32)$$

Podobně jako bateriové úložiště pracuje buď v režimu nabíjení nebo vybíjení, funguje tepelné čerpadlo v režimu výroby tepla nebo chladu. Režim výroby je tepla nebo chladu je vyjádřen binárními proměnnými I_t^c a I_t^h . Tyto proměnné nabývají hodnoty 1 nebo 0 podle toho, v jakém režimu zrovna tepelné čerpadlo pracuje. Pro vyjádření pracovního režimu tepelného čerpadla je do modelu vnesena první rovnice z výše uvedených dvou, která zaručuje, že tepelné čerpadlo pracuje v danou dobu vždy jen v jednom z těchto režimů tím, že součet binárních proměnných I_t^c a I_t^h může být v danou dobu pouze menší nebo rovno 1 [43].

5.1.3.15. Výkon tepelného čerpadla

$$C_t^{EHP} + H_t^{EHP} = E_{3,t} \times COP \quad (5.33)$$

Množství vyrobeného tepla H_t^{EHP} nebo chladu C_t^{EHP} tepelným čerpadlem je přímo úměrné spotřebované elektrické energii vstupující do tepelného čerpadla $E_{3,t}$ upravené účinností tepelného čerpadla COP , které se nazývá topným faktorem tepelného čerpadla (Coefficient of Performance) [43].

5.1.3.16. Tepelný výkon tepelného čerpadla

$$H_t^{min} I_t^h \leq H_t^{EHP} \leq H_t^{max} I_t^h \quad (5.34)$$

Jak již bylo uvedeno v předešlé rovnici, maximální množství vyrobeného tepla tepelným čerpadlem je limitováno jeho výkonem. Zároveň také platí omezení minimální výroby tepla, jelikož tepelné čerpadlo není možné regulovat v plném rozsahu jeho dostupného výkonu. Pro zavedení tohoto omezení do matematického modelu je třeba vymežit hodnotu proměnné H_t^{EHP} , která vyjadřuje množství tepla vyrobeného tepelným čerpadlem v danou dobu. Minimální hodnota vyrobeného tepla je stanovena proměnnou H_t^{min} a hodnota maximální je stanovena hodnotnou H_t^{max} . Člen I_t^h v rovnici stanovuje pracovní režim tepelného čerpadla v danou dobu. V pracovním režimu výroby tepla, kdy je hodnota proměnné I_t^h rovna 1, je proměnná H_t^{EHP} vymezena proměnnými H_t^{min} a H_t^{max} . V případě, kdy tepelné čerpadlo není v pracovním režimu výroby tepla, je hodnota proměnné I_t^h rovna 0 a tím pádem se i hodnota proměnné H_t^{EHP} rovná nule [43].

5.1.3.17. Chladicí výkon tepelného čerpadla

$$C_t^{min} I_t^c \leq C_t^{EHP} \leq C_t^{max} I_t^c \quad (5.35)$$

Ze stejného důvodu jako je omezen tepelný výkon tepelného čerpadla, je omezen i chladicí výkon tepelného čerpadla. Minimální hodnota vyrobeného chladu je tedy dána proměnnou C_t^{min} a maximální hodnota je dána proměnnou C_t^{max} . Množství vyrobeného chladu v danou dobu C_t^{EHP} leží mezi těmito dvěma hodnotami. Proměnná I_t^c určuje, zda je tepelné čerpadlo v režimu výroby chladu či nikoliv. V případě, kdy je

tepelné čerpadlo v režimu výroby chladu, je hodnota I_t^c rovna 1 a hodnota proměnné C_t^{EHP} je tedy vymezena hodnotami proměnných C_t^{min} a C_t^{max} . V případě, kdy tepelné čerpadlo není v režimu výroby chladu, je hodnota proměnné I_t^c rovna nule a tím je dáno, že i hodnota proměnné C_t^{EHP} je rovná nule [43].

5.2. Výchozí matematický model EnergyHubu v GAMS

5.2.1. Vstupní data cen energií a poptávek

Výchozí model EnergyHubu popsáný v této kapitole má tři druhy energetických poptávek – elektrickou energii, teplo a chlad. Hodinové poptávky po těchto energiích a hodinová cena elektrické energie je dána v Tabulka 5.1. Cena plynu je fixní a je stanovena jako $\lambda_t^g = 12\$/MWh$ [43].

Čas	D_t^h [MW]	D_t^e [MW]	D_t^c [MW]	λ_t^e [\$/MWh]
t1	21,4	52,1	11,5	36,7
t2	23,2	66,7	13,7	40,4
t3	26,1	72,2	16,0	38,5
t4	26,7	78,4	21,4	38,0
t5	25,6	120,2	22,0	40,2
t6	26,4	83,5	30,8	38,6
t7	39,5	110,4	38,9	52,3
t8	47,3	124,3	46,8	67,3
t9	52,1	143,6	51,0	70,5
t10	49,1	149,3	48,9	66,2
t11	69,3	154,2	34,8	73,3
t12	62,0	147,3	32,7	60,8
t13	68,0	200,7	27,8	63,2
t14	68,6	174,4	32,0	70,8
t15	56,4	176,5	33,2	63,1
t16	41,3	136,1	34,1	52,5
t17	37,4	108,7	40,8	57,0
t18	25,4	96,9	43,6	49,2
t19	25,7	89,1	51,5	47,5
t20	21,9	82,5	43,1	49,5
t21	22,4	76,9	36,5	53,1
t22	24,6	66,8	27,7	51,6
t23	22,7	47,2	19,1	50,5
t24	22,6	64,7	11,0	36,4

Tabulka 5.1: Vstupní data [43]

5.2.2. Vstupní data komponent EnergyHubu

5.2.2.1. Bateriové úložiště

- Nabíjecí a vybíjecí účinnosti bateriového úložiště EnergyHubu jsou stanoveny jako $\eta_{ch}/\eta_{dch} = 0,9$ [43]
- Maximální kapacita bateriového úložiště je $SOC_{max} = 600$ MWh a minimální kapacita je $SOC_{min} = 120$ MWh [43]
- Počáteční uložená elektrická energie v bateriovém úložišti EnergyHubu je $SOC_0 = 120$ MWh [43]
- Minimální nabíjecí a vybíjecí limity bateriového úložiště jsou stanoveny jako $E_{min}^{ch} = 0$ a $E_{min}^{dch} = 0$ [43]
- Maximální nabíjecí a vybíjecí limity bateriového úložiště jsou stanoveny jako $E_{max}^{ch} = 120$ MW a $E_{max}^{dch} = 120$ MW [43]

5.2.2.2. Elektrický transformátor

- Účinnost elektrického transformátoru je $\eta_{ee} = 0,98$ [43]

5.2.2.3. Kogenerační jednotka

- Účinnost kogenerační jednotky při výrobě elektrické energie z plynu je $\eta_{ge} = 0,35$ a při výrobě tepla z plynu je $\eta_{gh} = 0,45$, kapacita kogenerační jednotky je $CHP_{max} = 250$ MW [43]

5.2.2.4. Tepelné čerpadlo

- Maximální topný nebo chladicí výkon tepelného čerpadla je stanoven jako $C_{max}^{EHP} = H_{max}^{EHP} = 500$ MW [43]
- Topný faktor tepelného čerpadla je $COP = 2,5$ [43]

5.2.2.5. Plynový kotel

- Účinnost přeměny plynu na teplo v plynovém kotli je $\eta_{gh}^f = 0,9$
- Kapacita plynového kotle je $F_{max} = 600$ MW [43]

5.2.2.6. *Sorpční chladič*

- Účinnost přeměny tepla na chlad v sorpčním chladiči je $\eta_{hc} = 0,95$
- Kapacita sorpčního chladiče je $CB_{max} = 300$ MW

5.2.3. Kód programu modelu EnergyHubu v GAMS

Matematický model je třeba přepsat do kódu, který je následně spočítán programem GAMS. Ze zadaných parametrů nalezne nejoptimálnější variantu fungování modelu EnergyHubu dle minimální hodnoty objektivní funkce.

5.2.3.1. *Formulace kódu pro program GAMS – vstupní hodnoty*

Definování vstupních hodnot hodinových poptávek energií a ceny elektrické energie pro program GAMS:

```

1 Set t hours / t1*t24 / ;
2 */ vytvoreni promenne t
3
4 Table data(t, *)
5 */ vytvoreni tabulky data s promennou t
6
7           Dh      De      Dc      lambda
8 t1      21.4     52.1     11.5     36.7
9 t2      23.2     66.7     13.7     40.4
10 t3     26.1     72.2     16       38.5
11 t4     26.7     78.4     21.4     38
12 t5     25.6     120.2    22       40.2
13 t6     26.4     83.5     30.8     38.6
14 t7     39.5     110.4    38.9     52.3
15 t8     47.3     124.3    46.8     67.3
16 t9     52.1     143.6    51       70.5
17 t10    49.1     149.3    48.9     66.2
18 t11    69.3     154.2    34.8     73.3
19 t12    62      147.3    32.7     60.8
20 t13    68      200.7    27.8     63.2
21 t14    68.6    174.4    32       70.8
22 t15    56.4    176.5    33.2     63.1
23 t16    41.3    136.1    34.1     52.5
24 t17    37.4    108.7    40.8     57
25 t18    25.4    96.9     43.6     49.2
26 t19    25.7    89.1     51.5     47.5
27 t20    21.9    82.5     43.1     49.5
28 t21    22.4    76.9     36.5     53.1
29 t22    24.6    66.8     27.7     51.6
30 t23    22.7    47.2     19.1     50.5
31 t24    22.6    64.7     11       36.4 ;
32 */ vstup hodnot do tabulky data
33
34 data(t, 'lambda')=0.6*data(t, 'lambda') ;
35 */ opravny koeficient ceny el. energie - kontrola s v. modelem
36

```

Obrázek 5.2: Kód vstupních dat

Zavedení proměnné pro objektivní hodnotící funkci a definování zbylých vstupních proměnných matematického modelu:


```

37 variable cost ;
38 */ zavedeni promenne cost
39
40 positive variables E(t), E1(t), E2(t), E3(t), G(t), G1(t), G2(t),
41 H1(t), H2(t), SOC(t), Ec(t), Ed(t), H_ehp(t), C_ehp(t) ;
42 */ zavedeni kladnych promennych
43
44 binary variables Idch(t), Ich(t), Ic(t), Ih(t);
45 */ zavedeni binarnich promennych
46
47 scalar SOC0 / 120 / , SOCmax / 600 / , eta_c / 0.9 / , eta_d / 0.9 / ,
48 eta_ee / 0.98 / , eta_ge / 0.45 / , eta_gh / 0.35 / , eta_hc / 0.95 / ,
49 COP / 2.5 / , H_ehpMax / 200 / , C_ehpMax / 200 / , Chpmax / 300 / ,
50 CBmax / 300 / , Fmax / 300 / , eta_ghf / 0.9 / ;
51 */ zavedeni promennych s danymi hodnotami
52
53 SOC0= 0.2*SOCmax ;
54 SOC.up(t)=SOCmax ;
55 SOC.lo(t)=0.2*SOCmax ;
56 SOC.fx('t24')=SOC0 ;
57 Ec.up(t)=0.2*SOCmax ;
58 Ec.lo(t)=0 ;
59 Ed.up(t)=0.2*SOCmax ;
60 Ed.lo(t)=0 ;
61 C_ehp.up(t)=C_ehpMax ;
62 H_ehp.up(t)=H_ehpMax ;
63 G1.up(t)=Chpmax ;
64 G2.up(t)=Fmax ;
65 H2.up(t)=CBmax ;
66 E.up(t)=1000 ;
67 */ dodatecne upresneni hodnot promennych
68

```

Obrázek 5.3: Proměnné výchozího matematického modelu

5.2.3.2. Formulace kódu pro program GAMS – rovnice matematického modelu

Zápis rovnice matematického modelu EnergyHubu v kódu pro GAMS:

```

69 Equations
70 eq1 , eq2 , eq3 , eq4 , eq5 , eq6 , eq7 , eq8 ,
71 eq9 , eq10 , eq11 , eq12 , eq13 , eq14 , eq15 , eq16 ;
72 */ zavedeni potrebného počtu rovnic s označením
73
74 */ rovnice definující matematický model EnergyHub:
75
76 eq1.. cost =e= sum(t , data(t , 'lambda')*E(t)+12*G(t)) ;
77 */ objektivní hodnoticí funkce - součet nákladu na energii
78
79 eq2(t).. eta_ee*E2(t)+Ed(t)+eta_ge*G1(t) =e= data(t , 'De')+E3(t) ;
80 */ tok elektrické energie z EnergyHubu
81
82 eq3(t).. E(t) =e= E1(t)+E2(t) ;
83 */ tok elektrické energie do EnergyHubu
84
85 eq4(t).. E1(t) =e= Ec(t) ;
86 */ definování vstupu elektrické energie do bateriového uložiste
87
88 eq5(t).. SOC(t) =e= SOC0$(ord(t)=1)+SOC(t-1)$(ord(t)>1)+Ec(t)*eta_c-Ed(t)/eta_d ;
89 */ změna stavu úrovně nabití bateriového uložiste
90
91 eq6(t).. Ed(t) =l= 0.2*SOCmax*Idch(t) ;
92 */ omezení vybití bateriového uložiste
93
94 eq7(t).. Ec(t) =l= 0.2*SOCmax*Ich(t) ;
95 */ omezení nabíjení bateriového uložiste
96
97 eq8(t).. Idch(t)+Ich(t) =l= 1 ;
98 */ provozní režim bateriového uložiste (nabíjení/vybití)
99
100 eq9(t).. G(t) =e= G1(t)+G2(t) ;
101 */ tok plynu do EnergyHubu
102
103 eq10(t).. eta_gh*G1(t)+H1(t)+H_ehp(t) =e= data(t , 'Dh') ;
104 */ tok tepla z EnergyHubu
105
106 eq11(t).. eta_ghf*G2(t) =e= H1(t)+H2(t) ;
107 */ fungování plynové kotle
108
109 eq12(t).. eta_hc*H2(t)+C_ehp(t) =e= data(t , 'Dc') ;
110 */ tok chladu z EnergyHubu
111
112 eq13(t).. C_ehp(t)+H_ehp(t) =e= E3(t)*COP ;
113 */ omezení výkonu tepelného čerpadla
114
115 eq14(t).. H_ehp(t) =l= H_ehpMax*Ih(t) ;
116 */ omezení tepelného výkonu tepelného čerpadla
117
118 eq15(t).. C_ehp(t) =l= C_ehpMax*Ic(t) ;
119 */ omezení chladičového výkonu tepelného čerpadla
120
121 eq16(t).. Ic(t)+Ih(t) =l= 1 ;
122 */ provozní režim tepelného čerpadla (chlazení/topení)
123

```

Obrázek 5.4: Formulace rovnic matematického modelu v kódu GAMS

5.2.3.3. Formulace kódu pro program GAMS – sestavení modelu a zavolání řešitele

Poslední částí kódu pro program GAMS je sestavení modelu ze zadaných dat a zavolání řešitele pro nalezení objektivní funkce.

```

124 Model hub / all / ;
125 */ vytvoreni matematickeho modelu ze zadanych dat
126
127 Solve hub us mip min cost ;
128 */ prikaz pro reseni daneho modelu pomoci MIP resitele s minimalizaci promenne cost
129

```

Obrázek 5.5: Sestavení rovnice a zavolání řešitele v GAMS

5.2.4. Report a vyhodnocení výsledků

Po zavolání řešitele je kód zpracován programem a vygeneruje se report kompletních výsledků. Pro ukázkou nalezení objektivní funkce programem GAMS je zde uvedena pouze část tohoto reportu (Obrázek 5.6). Celý report je přiložen jako příloha č.

1.

```

GAMS 30.3.0 rc5da09e Released Mar 6, 2020 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows - 05/18/20 14:08:02 Page 4
General Algebraic Modeling System
Model Statistics SOLVE hub Using MIP From line 126

```

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	16	SINGLE EQUATIONS	361
BLOCKS OF VARIABLES	19	SINGLE VARIABLES	433 23 projected
NON ZERO ELEMENTS	984	DISCRETE VARIABLES	96

GENERATION TIME = 0.078 SECONDS 4 MB 30.3.0 rc5da09e WEX-WEI

EXECUTION TIME = 0.078 SECONDS 4 MB 30.3.0 rc5da09e WEX-WEI

```

GAMS 30.3.0 rc5da09e Released Mar 6, 2020 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows - 05/18/20 14:08:02 Page 5
General Algebraic Modeling System
Solution Report SOLVE hub Using MIP From line 126

```

S O L V E S U M M A R Y

MODEL	hub	OBJECTIVE	cost
TYPE	MIP	DIRECTION	MINIMIZE
SOLVER	CPLEX	FROM LINE	126

```

**** SOLVER STATUS 1 Normal Completion
**** MODEL STATUS 1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE 84449.4258

```

RESOURCE USAGE, LIMIT	0.031	1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT	47	200000000

```

IBM ILOG CPLEX 30.3.0 rc5da09e Released Mar 06, 2020 WEI x86 64bit/MS Window
*** This solver runs with a demo license. No commercial use.
Cplex 12.10.0.0

```

```

Space for names approximately 0.01 Mb
Use option 'names no' to turn use of names off
MIP status(101): integer optimal solution
Cplex Time: 0.00sec (det. 1.81 ticks)
Fixing integer variables, and solving final LP...
Fixed MIP status(1): optimal
Cplex Time: 0.02sec (det. 0.43 ticks)
Proven optimal solution.

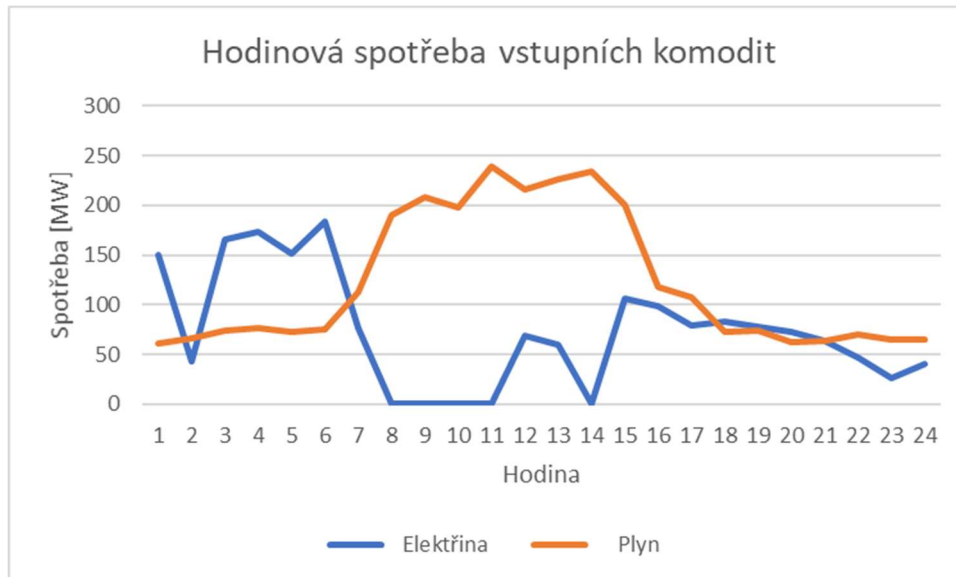
```

MIP Solution:	84449.425828	(31 iterations, 0 nodes)
Final Solve:	84449.425828	(16 iterations)

Best possible:	84449.425828
Absolute gap:	0.000000
Relative gap:	0.000000

Obrázek 5.6: Report řešitele pro výchozí model EnergyHubu

Hodnota objektivní funkce je **84 449,43 \$**, tato hodnota slouží k porovnání tohoto konkrétního modelu EnergyHubu s ostatními možnými variantami. Konkrétní složení spotřeb vstupních komodit a využití komponent EnergyHubu je možné z kompletního reportu vyčíst a reprezentovat. Pro příklad vyjadřuje graf č. něco hodinové spotřeby elektrické energie a plynu EnergyHubem z distribučních sítí.



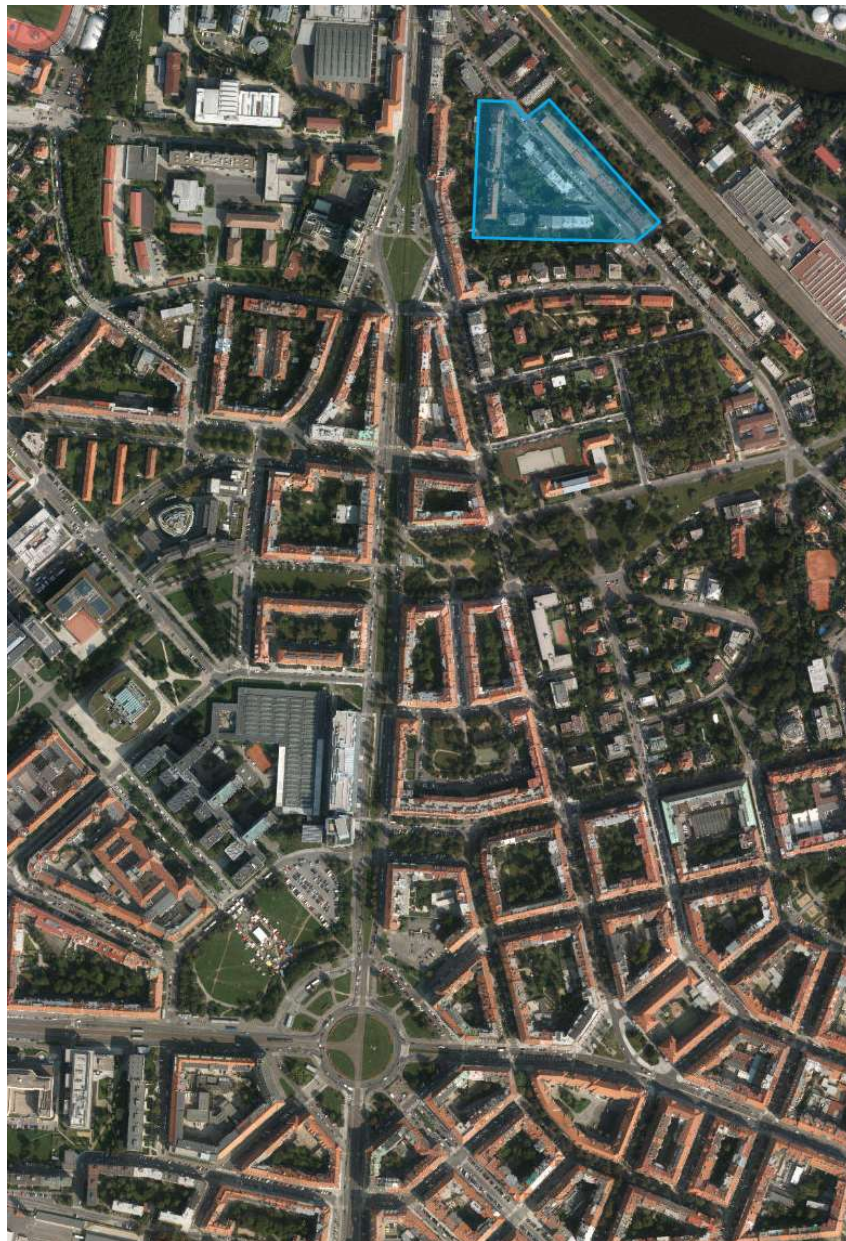
Graf 5.1: Hodinové spotřeby vstupních komodit

6. Návrh optimálního modelu EnergyHubu pro konkrétní oblast

Pro návrh optimálního modelu EnergyHubu byla vybrána lokalita Lermontova – Ve Struhách, Praha 6 – Bubeneč. Potřebná základní data týkající se budov a možností instalace obnovitelných zdrojů energie byla poskytnuta vedoucím této diplomové práce.

6.1. Zkoumaná lokalita

Lokalita se nachází v Praze, v městské části Bubeneč, v blízkosti Vítězného náměstí. Jde o starší městskou zástavbu, která byla vybudována v letech 1920 – 1960.

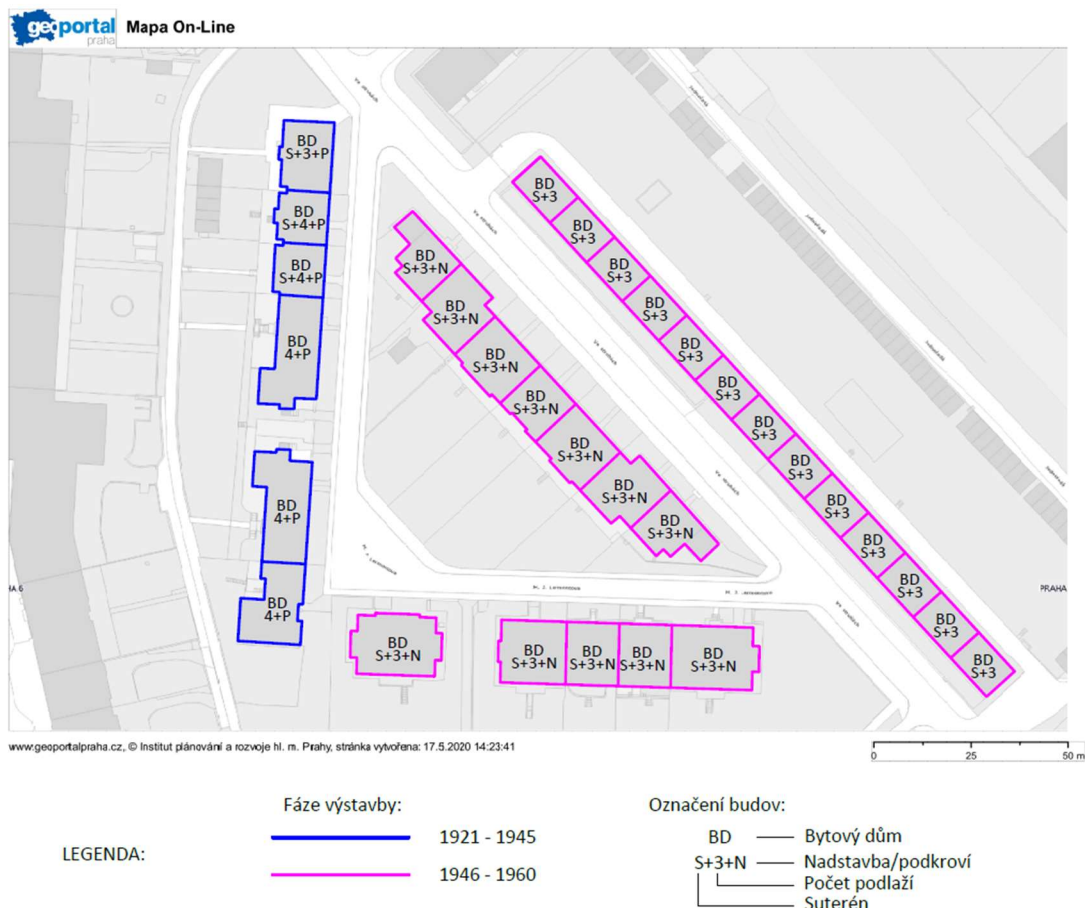


Obrázek 6.1: Zkoumaná oblast

Ve zkoumané oblasti vymezené ulicemi M. J. Lermontova a Ve Struhách se nachází soubor budov pocházejí převážně z první poloviny 20. století.

6.2. Budovy ve zkoumané oblasti

Budovy konkrétněji pocházejí z období vymezeného lety 1921 až 1960. Rozložení a typy budov jsou znázorněny na Obrázek 6.2.



Obrázek 6.2: Rozložení a typy budov v zadané oblasti

Jde o soubor vícepodlažních bytových domů, jejichž tepelně-technické vlastnosti jsou díky jejich stáří na nízké úrovni.

6.3. Popis stavebních konstrukcí

6.3.1. Budovy postavené v letech 1921 – 1946

Masivní rozvoj výstavby po roce 1918 v nově vzniklém Československu byl podpořen jak novými možnostmi ve financování, tak zjednodušením stavebních předpisů. Už v této době měla Praha své vlastní stavební předpisy [54].

6.3.1.1. Stěny

Tloušťka obvodového zdiva u ochlazovaných konstrukcí byla stanovena na nejméně 450 mm, ovšem daly se uplatnit i výjimky z těchto předpisů, které se týkaly i nejmenší tloušťky zdiva. Tyto výjimky se uplatňovaly nejvíce u výstavby levných bytů, kterých byl v letech 1925 – 1935 velký podíl [54].

Stěny se prováděly zejména z cihel plných pálených [54].

6.3.1.2. Střechy

Střechy byly konstruovány zejména jako sedlové, tvořené dřevěným krovem s krytinou pálených tašek. Prostory podkroví byly neobydlené a používané pouze jako technické a provozní zázemí [54].

6.3.1.3. Stropy

Využívaly se zejména stropy dřevěné trémové s omítkou na rákosovém roštu, dřevěným záklopem a násypem z škváry či sutě. Konstruovaly se také stropy železobetonové monolitické jak deskové, tak trémové. Běžné byly i keramické stropy z hurdisek [54].

Stropní konstrukce suterénu byly konstruovány jako klenbové z cihel nebo betonu, a dále například jako železobetonové deskové nebo trémové stropy typu Hennebique [54].

6.3.1.4. Podlahy

Podlahy na terénu v případě budov bez suterénu byly převážně betonové nebo dřevěné s ochranou proti zemní vlhkosti. Podlahy v ostatních patrech byly dřevěné prkenné, avšak v kuchyních se s oblibou využívalo linoleum [54].

6.3.1.5. Okna

Výplně okenních otvorů byly zpravidla dřevěné dvojité konstrukce [54]. V současnosti jsou již okna nahrazena plastovými.

6.3.2. Budovy postavené v letech 1946 – 1960

Ve zkoumané oblasti se nachází dva druhy bytových domů postavených v letech 1946 až 1960. Domy postavené těsně po II. světové válce a takzvané dvouletky, které byly postaveny v období mezi léty 1947 a 1949 [54].

6.3.2.1. *Stěny*

Stěny jsou z cihel plných pálených nebo škvárobetonových tvárnic nejčastěji o tloušťce 450 mm [54].

6.3.2.2. *Střechy*

Střechy většinou sedlové s dřevěným vázaným krovem. Běžné jsou i střechy ploché [54].

6.3.2.3. *Stropy*

Stropy byly běžně dřevěné trámové se stejnou skladbou jako u domů z předchozího období. Dále také stropy monolitické případně trámečkové s vložkami [54].

6.3.2.4. *Podlahy*

Podlahy v obytných místnostech nejčastěji dřevěné parketové případně vlysové. V provozních místnostech poté dlažby nebo PVC [54].

6.3.2.5. *Okna*

Výplně okenních otvorů byly mezi lety 1946 a 1948 převážně okna dřevěná dvojitá takzvaná špaletová. Později se používala okna dřevěná zdvojená. V současné chvíli jsou již okna vyměněna za plastová [54].

6.3.3. Popis technických zařízení těchto budov

6.3.3.1. *Vytápění*

Budovy jsou pro potřeby vytápění připojeny na centrální zásobování teplem [55].

6.3.3.2. *Příprava teplé užitkové vody*

Budovy jsou pro potřeby přípravy teplé užitkové vody připojeny na centrální zásobování teplem [55].

6.3.3.3. *Větrání*

Budovy jsou větrány přirozeně [55].

6.3.3.4. *Plyn*

Do budov je zaveden plyn hlavně pro potřebu vaření.


6.3.3.5. Elektrická energie

Budovy jsou pro potřeby osvětlení a provozu ostatních domácích spotřebičů připojeny k distribuční síti elektrické energie

6.3.3.6. Vodovod

Budovy jsou pitnou vodou zásobovány z veřejného vodovodního řádu.

Parametry budov jsou uvedeny v následujících tabulkách (Tabulka 6.1, Tabulka 6.2, Tabulka 6.3) [55]:

Řadový bytový dům – ulice Ve Struhách	
	
Popis budovy:	
Třípatrový cihelný dům se šikmou střechou a se suterénem. Na každém patře se nachází dva dvoupokojové byty.	
Parametry budovy:	
Podlahová plocha podlaží = 148,7 m ²	
Počet podlaží = 3	
Počet bytů = 6	
Vnější povrch budovy S = 422,1 m ²	
Otápeňový objem V = 1280 m ³	
S/V = 0,33 m ⁻¹	
Fáze výstavby: r. 1947 - 1949	
U _{stěna} = 1,1 W/m ² K	
U _{střecha} = 1,1 W/m ² K	
U _{okno} = 1 W/m ² K	
U _{em} = 1,4 W/m ² K	

Tabulka 6.1: Parametry BD – ulice Ve Struhách [55]

Řadový bytový dům – ulice M. J. Lermontova



Popis budovy:

Třípatrový cihelný dům se suterénem a nadstavbou s plochou střechou nebo obytným podkrovím pod šikmou střechou. Na každém patře se nachází 4 dvoupokojové byty.

Parametry budovy:

Podlahová plocha podlaží = 347,1 m²

Počet podlaží = 4

Počet bytů = 16

Vnější povrch budovy S = 1182,6 m²

Otápný objem V = 3882,7 m³

S/V = 0,30 m⁻¹

Fáze výstavby: kolem roku 1946

U_{stěna} = 1,3 W/ m²K

U_{střecha} = 1,2 W/m²K

U_{okno} = 1 W/m²K

U_{em} = 1,2 W/m²K

Tabulka 6.2: Parametry BD – ulice M. J. Lermontova [55]

Řadový bytový dům – ulice M. J. Lermontova



Popis budovy:

Čtyřpatrový cihelný dům s obytným podkrovím, šikmou střechou a případně suterénem. Na každém patře jsou 4 třípokojové byty.

Parametry budovy:

Podlahová plocha podlaží = 365,3 m²

Počet podlaží = 5

Počet bytů = 20

Vnější povrch budovy S = 1578,6 m²

Otápěný objem V = 5150,7 m³

S/V = 0,31 m⁻¹

Fáze výstavby: r. 1921 -1945

U_{stěna} = 1,4 W/m²K

U_{střecha} = 1,3 W/m²K

U_{okno} = 1 W/m²K

U_{em} = 1,4 W/m²K

Tabulka 6.3: Parametry BD – ulice M. J. Lermontova

Pro potřeby zjednodušení výpočtů bylo uvažováno spojení domů v ulici M. J. Lermontova č. p. 858 a 859 v jeden celek zastoupeným parametry budovy v téže ulici č. p. 855 a drobnou úpravou rozměrových parametrů a počtu bytů pro budovu č. p. 932 taktéž v ulici M. J. Lermontova.

Období výstavby	Budova	Označení	Počet domů	Počet bytů/dům	Celkový počet bytů
1921 – 1945	BD – M. J. Lermontova	BD1	4	20	80
	BD – M. J. Lermontova - upravený	BD2	1	12	12
1946 - 1960	BD – Ve Struhách – „Dvouletka“	BD3	13	6	78
	BD – Ve Struhách	BD4	7	16	112
	BD – M. J. Lermontova	BD5	5	16	80
Celkem bytů					362

Tabulka 6.4: Souhrn budov

6.4. Spotřeby energií

Pro zjištění poptávek po energiích spotřebiteli v dané oblasti, která jsou vstupními daty do modelu EnergyHubu, je potřeba stanovit spotřeby jednotlivých energií.

Jako výpočtový den byl stanoven 15. leden, jelikož je statisticky nejčastěji nejchladnějším dnem v roce [56]. Jelikož jsou dány spotřeby elektrické energie za rok 2015, bylo počítáno i s cenami jednotlivých energií za rok 2015.

Pro potřeby výpočtů bylo uvažováno, že jeden byt obývají 3 lidé [57].

6.4.1. Spotřeba tepla na vytápění

Hodinovou spotřebu tepla na vytápění určíme podle vztahu:

$$Q_{VYT,h} = Q_c \quad (6.1)$$

Kde $Q_{VYT,h}$ je hodinová spotřeba tepla na vytápění a Q_c je tepelná ztráta objektu [58].

Tepelnou ztrátu objektu můžeme vyjádřit jako:

$$Q_c = U_{em} \times S \times (t_i - t_e) \quad (6.2)$$

Kde U_{em} je průměrný součinitel prostupu tepla, S je plocha obálky budovy a $(t_i - t_e)$ je rozdíl exteriérové a interiérové teploty [59].

Venkovní výpočtová teplota pro Prahu je stanovena na -12 °C a interiérová teplota byla stanovena na 20 °C

Hodinová spotřeba tepla na vytápění stanovena z parametrů budov a teplot a je shrnuta v následující Tabulka 6.5:

Budova	Průměrný součinitel prostupu tepla	Plocha obálky budovy	Exteriérová teplota	Interiérová teplota	Tepelná ztráta objektu	Hodinová spotřeba tepla na vytápění
	U_{em} [W/m ² K]	S [m ²]	t_e [m ²]	t_i [m ²]	Q_c [W]	$Q_{VYT,h}$ [kW]
BD1	1,4	1578,6	-12	20	70 721,28	70,72
BD2	1,4	1072,8	-12	20	48 061,44	48,06
BD3	1,4	422,1	-12	20	18 910,08	18,91
BD4	1,2	1182,6	-12	20	45 411,84	45,41
BD5	1,2	1182,6	-12	20	45 411,84	45,41
Celkem					228 516,48	228,51

Tabulka 6.5: Hodinová spotřeba tepla na vytápění

Hodinová spotřeba tepla na vytápění v dané oblasti je **228,51 kW**.

6.4.2. Spotřeba tepla na teplou užitkovou vodu

Hodinovou spotřebu tepla na ohřev teplé vody stanovíme z denní spotřeby tepla na ohřev teplé vody, kterou stanovíme podle následující rovnice:

$$Q_{TV,d} = \frac{\rho \times c \times V_{2p} \times (t_{TV} - t_{SV})}{3600} \quad (6.3)$$

Kde pro vodu je hustota $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, měrná tepelná kapacita $c = 4,182 \text{ kJ/kgK}$, V_{2p} je celková potřeba teplé vody pro spotřebu všech osob (ta je stanovena na 0,082 m³/osoba za den pro osoby žijící v bytovém domě), t_{TV} je teplota teplé vody (stanovena na 55 °C) a t_{SV} je teplota studené vody (stanovena na 10 °C) [58].

Počet osob žijících v dané oblasti a množství denně spotřebované teplé vody (Tabulka 6.6):

Budova	Počet bytů	Počet osob/byt	Počet osob	Množství teplé vody na osobu a den	Množství teplé vody na den [m ³]
BD1	80	3	240	0,082 m ³	19,68
BD2	12		36		2,95
BD3	78		234		19,19
BD4	112		336		27,55
BD5	80		240		19,68
Celkem	362		1 086		89,05

Tabulka 6.6: Spotřeba TUV v zadané oblasti

$$Q_{TV,d} = \frac{1000 \times 4,182 \times 89,05 \times (55 - 10)}{3600} \quad (6.4)$$

$$Q_{TV,d} = 4\,655,09 \text{ kWh} \quad (6.5)$$

Hodinová spotřeba tepla je dále stanovena podle vztahu [58]:

$$Q_{TV,h} = \frac{Q_{TV,d}}{\tau} \quad (6.6)$$

Kde $Q_{TV,h}$ je hodinová spotřeba tepla na ohřev teplé vody, $Q_{TV,d}$ je denní spotřeba tepla na ohřev teplé vody a τ je časová perioda (v případě výpočtu hodinové spotřeby z denní spotřeby je to 24 hodin) [58].

$$Q_{TV,h} = \frac{4\,655,09}{24} \quad (6.7)$$

$$Q_{TV,h} = 193,96 \text{ kW} \quad (6.8)$$

Hodinová spotřeba tepla na ohřev teplé vody v dané oblasti je **193,96 kW**.

6.4.3. Spotřeba plynu

Předpokladem pro určení spotřeby plynu v zadané oblasti je, že se plyn používá pouze na vaření. Roční průměrná spotřeba plynu na vaření je odhadována na 200 kWh/osobu za rok [60].

Jelikož jde o dané množství spotřeby plynu za rok na osobu a cena plynu je převážně v průběhu roku neměnná, je tato roční spotřeba plynu rozpočítána do každé hodiny stejně nehledě na hodinu v daném dni:

$$Q_{p,d} = \frac{Q_{p,r}}{\tau} \quad (6.9)$$

Kde $Q_{p,d}$ je denní spotřeba plynu, $Q_{p,r}$ je roční spotřeba plynu a τ je počet dní v roce (365, resp. 366 dní v případě roku přestupného).

$$Q_{p,h} = \frac{Q_{p,d}}{\tau} \quad (6.10)$$

Kde $Q_{p,h}$ je hodinová spotřeba plynu, $Q_{p,d}$ je denní spotřeba plynu a τ počet hodin ve dni (24 hodin).

$$Q_{p,d} = \frac{200}{365} \quad (6.11)$$

$$Q_{p,d} = 0,55 \text{ kW/osobu za den} \quad (6.12)$$

$$Q_{p,h} = \frac{0,55}{24} \quad (6.13)$$

$$Q_{p,h} = 0,02 \text{ kW/osobu} \quad (6.14)$$

Hodinová spotřeba plynu na vaření na osobu je vypočtena na 0,02 kW.

Spotřeba plynu na vaření je shrnuta v Tabulka 6.7:

Budova	Počet osob	Hodinová spotřeba plynu na osobu	Hodinová potřeba plynu [kW]
BD1	240	0,02 kW	4,8
BD2	36		0,72
BD3	234		4,68
BD4	336		6,72
BD5	240		4,8
Celkem	1086		21,72

Tabulka 6.7: Hodinová spotřeba plynu

Hodinová spotřeba plynu je vypočtena na **21,72 kW**.

6.4.4. Spotřeba elektrické energie

Skutečnou hodinovou spotřebu elektrické energie jedné domácnosti vypočteme podle přepočtených typových diagramů dodávek (jsou dostupné oproti normalizovaným

TDD zpětně za uplynulé období). Konkrétně použijeme typový diagram dodávek 4, který je určen pro domácnosti bez tepelného využití elektrické energie.

Typové diagramy dodávek byly získány ze stránek OTE [61].

Výpočet podle vzorce [16]:

$$O_h = O_r * \frac{r_h}{\sum_{h=1}^{8760} r_h} \quad (6.15)$$

Kde O_h je hodinová spotřeba elektrické energie, O_r je roční spotřeba odběrového místa, r_h je hodinový koeficient a $\sum_{h=1}^{8760} r_h$ je součet hodinových koeficientů celého daného roku [16].

Roční spotřeba domácnosti v BD:		2141 kWh	
Hodina	Koeficient	Součet koef.	Spotřeba domácnosti
1	0,268954	3 865,95	0,15 kW
2	0,2377329		0,13 kW
3	0,2111445		0,12 kW
4	0,2183508		0,12 kW
5	0,2414484		0,13 kW
6	0,2692067		0,15 kW
7	0,3456215		0,19 kW
8	0,4094955		0,23 kW
9	0,4487839		0,25 kW
10	0,4534914		0,25 kW
11	0,4741837		0,26 kW
12	0,4967853		0,28 kW
13	0,4790129		0,27 kW
14	0,4378808		0,24 kW
15	0,467305		0,26 kW
16	0,5120402		0,28 kW
17	0,6165128		0,34 kW
18	0,73712		0,41 kW
19	0,7525153		0,42 kW
20	0,7441204		0,41 kW
21	0,6907377		0,38 kW
22	0,5952402		0,33 kW
23	0,4697944		0,26 kW
24	0,3530899		0,20 kW

Tabulka 6.8: Hodinová spotřeba elektrické energie domácnosti

Pro potřeby výpočtu se počítá jeden byt jako jedna domácnost (tabulka č. něco):

Budova	Počet bytů	Počet domácností
BD1	80	80
BD2	12	12
BD3	78	78
BD4	112	112
BD5	80	80
Celkem	362	362

Tabulka 6.9: Počet domácností v oblasti

Hodinová spotřeba elektrické energie v zadané oblasti (Tabulka 6.10):

Hodina	Počet domácností v oblasti	Spotřeba jedné domácnosti [kW]	Celková spotřeba oblasti [kW]
1	362	0,15	53,92
2		0,13	47,66
3		0,12	42,33
4		0,12	43,77
5		0,13	48,41
6		0,15	53,97
7		0,19	69,29
8		0,23	82,10
9		0,25	89,97
10		0,25	90,92
11		0,26	95,06
12		0,28	99,60
13		0,27	96,03
14		0,24	87,79
15		0,26	93,68
16		0,28	102,65
17		0,34	123,60
18		0,41	147,78
19		0,42	150,86
20		0,41	149,18
21		0,38	138,48
22		0,33	119,33
23		0,26	94,18
24		0,20	70,79

Tabulka 6.10: Celková hodinová spotřeba elektrické energie v oblasti

1 GJ je 0,2778 MWh [66]. 1 GJ je tedy dále 277,8 kWh, a tedy výsledná cena za 1 kWh tepelné energie byla **2,40 Kč**.

6.6. Denní náklady na energie ve stávající situaci

Náklady na energie ve výpočtovém dnu se spočítají vynásobením spotřeb jednotlivých energií a jejich cen.

6.6.1. Denní náklady na tepelnou energii

Náklady na tepelnou energii jsou složeny z nákladů na vytápění a ohřev teplé vody.

6.6.1.1. *Denní náklady na vytápění*

Hodinová spotřeba tepla na vytápění v dané oblasti je 228,51 kW a vynásobením 24 hodinami vyjde denní spotřeba tepla na vytápění.

$$Q_{VYT,d} = Q_{VYT,h} \times 24 \quad (6.16)$$

$$Q_{VYT,d} = 228,51 \times 24 \quad (6.17)$$

$$Q_{VYT,d} = 5\,484,24 \text{ kWh} \quad (6.18)$$

Denní spotřeba tepla na vytápění je **5 484,24 kWh**. Vynásobením denní spotřeby tepla na vytápění cenou tepelné energie dostaneme denní náklady na vytápění objektů v zadané oblasti.

$$5\,484,24 \times 2,40 = 13\,162,18 \text{ Kč} \quad (6.19)$$

Denní náklady na vytápění objektů v zadané oblasti jsou **13 162,18 Kč**.

6.6.1.2. *Denní náklady na ohřev teplé vody*

Vynásobením denní spotřeby tepla na ohřev teplé vody $Q_{TV,d}$ cenou za tepelnou energii dostaneme denní náklady na ohřev teplé vody.

$$4\,655,09 \times 2,40 = 11\,172,22 \text{ Kč} \quad (6.20)$$

Denní náklady na ohřev teplé vody pro obyvatele budov v zadané oblasti jsou **11 172,22 Kč**.

Celkové denní náklady na tepelnou energii jsou stanoveny jako součet denních nákladů na vytápění a denních nákladů na ohřev teplé vody. Celkové denní náklady na tepelnou energii jsou:

$$13\,162,18 + 11\,172,22 = 24\,334,4 \text{ Kč} \quad (6.21)$$

Celkové denní náklady na tepelnou energii budov v zadané oblasti jsou **24 344,4 Kč**

6.6.2. Denní náklady na plyn

Denní náklady na plyn jsou stanoveny jako hodinová spotřeba plynu v zadané oblasti vynásobená počtem hodin ve dni a cenou za plyn.

$$21,72 \times 24 \times 1,763 = 919,02 \text{ Kč} \quad (6.22)$$

Denní náklady na plyn v zadané oblasti jsou **919,02 Kč**.

6.6.3. Denní náklady na elektrickou energii

Denní náklady na elektrickou energii jsou stanoveny jako denní spotřeba elektrické energie domácností v zadané oblasti vynásobená cenou elektrické energie:

$$2\,191,35 \times 4,098 = 8\,980,15 \text{ Kč} \quad (6.23)$$

Denní náklady na elektrickou energii v zadané oblasti jsou **8 980,15 Kč**.

Celkové denní náklady na energie pro zadanou oblast jsou dány součtem těchto dílčích nákladů. Celkové denní náklady na energie pro zadanou oblast jsou:

$$8\,980,15 + 919,02 + 24\,334,4 = 34\,233,57 \text{ Kč} \quad (6.24)$$

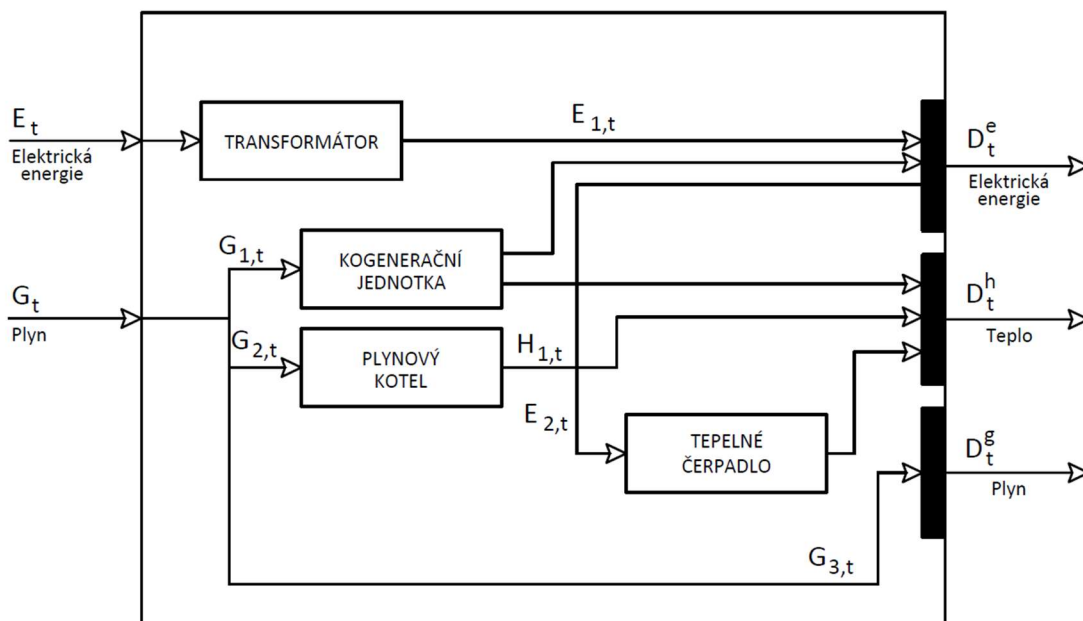
Celkové denní náklady na energie v zadané oblasti činí **34 233,57 Kč**.

6.7. Navrhované varianty EnergyHubu pro danou oblast

Výchozí model EnergyHubu je třeba pro aplikaci na místní podmínky přizpůsobit. Oproti modelu popsaném v teoretické části odpadá poptávka po chladu a tím je z modelu EnergyHubu možno vypustit i komponenty či provozní stavy, které zajišťují dodávky chladu. Dále je také na EnergyHub připojena poptávka po plynu, tato skutečnost se v modelu musí zohlednit. V této práci je navrženo pět variant EnergyHubů pro zkoumanou oblast, které jsou následně porovnány.

6.7.1. Varianta 1

První varianta EnergyHubu je napojená na distribuční síť elektrické energie a plynu. Na výstupu EnergyHubu stojí poptávka po teple, elektrické energii a plynu pro potřeby vaření. Tato varianta je vyobrazena na Obrázek 6.3:



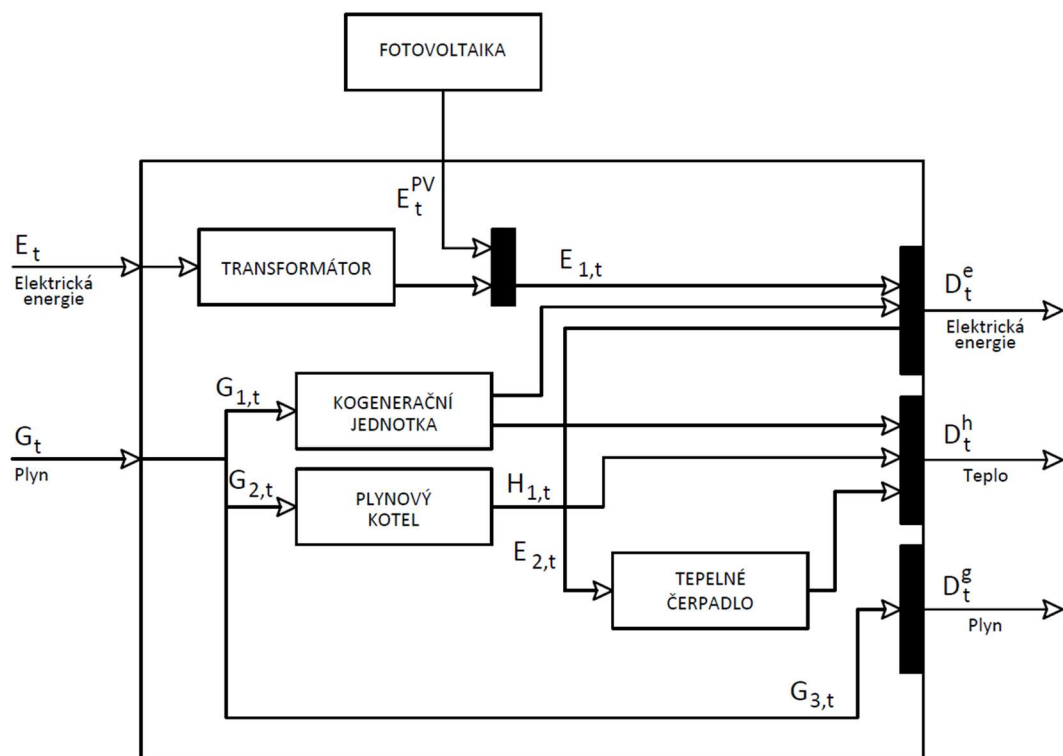
Obrázek 6.3: Varianta 1

6.7.1.1. Komponenty EnergyHubu

- Transformátor
- Kogenerační jednotka
- Plynový kotel
- Tepelné čerpadlo

6.7.2. Varianta 2

Druhá varianta EnergyHubu je totožná s variantou číslo 1, avšak je ještě doplněna o vstup elektrické energie z instalovaných fotovoltaických panelů na střechách budov ve zkoumané oblasti. Složení EnergyHubu je zobrazeno na následujícím Obrázek 6.4:



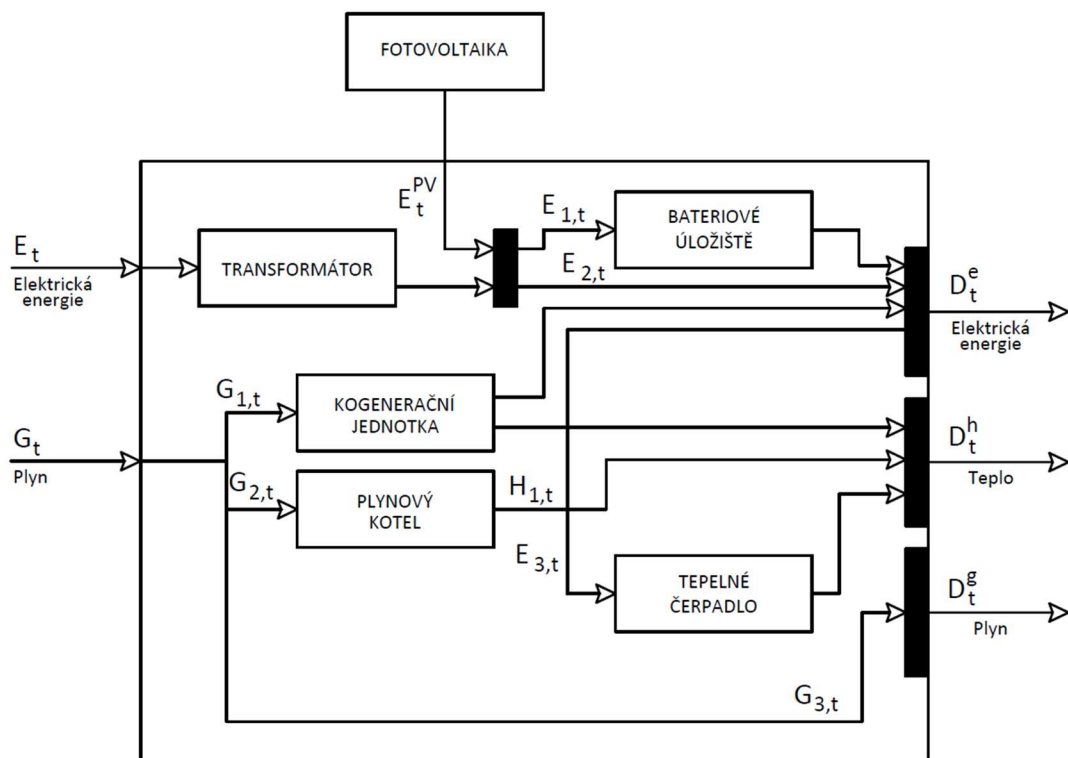
Obrázek 6.4: Varianta 2

6.7.2.1. Komponenty EnergyHubu

- Transformátor
- Kogenerační jednotka
- Plynový kotel
- Tepelné čerpadlo
- Fotovoltaický systém

6.7.3. Varianta 3

Třetí varianta zkoumá možnosti doplnění varianty 2 o bateriové úložiště. Tato varianta je vyobrazena na Obrázek 6.5:



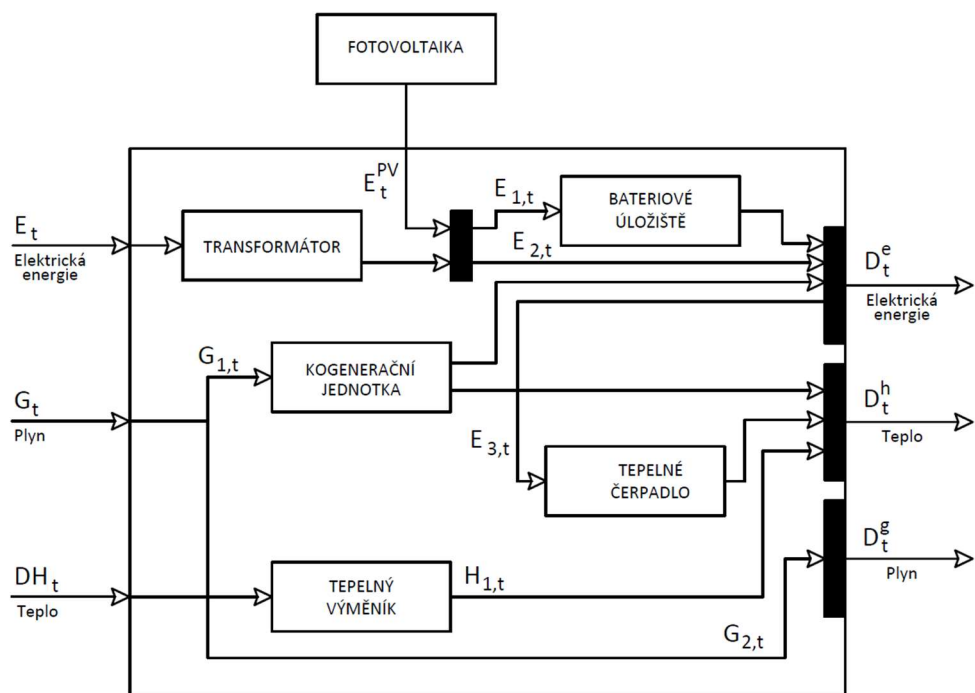
Obrázek 6.5: Varianta 3

6.7.3.1. Komponenty EnergyHubu

- Transformátor
- Kogenerační jednotka
- Plynový kotel
- Bateriové úložiště
- Tepelné čerpadlo
- Fotovoltaický systém

6.7.4. Varianta 4

Čtvrtá varianta EnergyHubu je zobrazena na obrázku č. něco a je podobná variantě 3, avšak oproti variantě 3 je poptávka po teple zajišťována tepelným výměníkem připojeným na distribuční síť tepla místo plynového kotle.



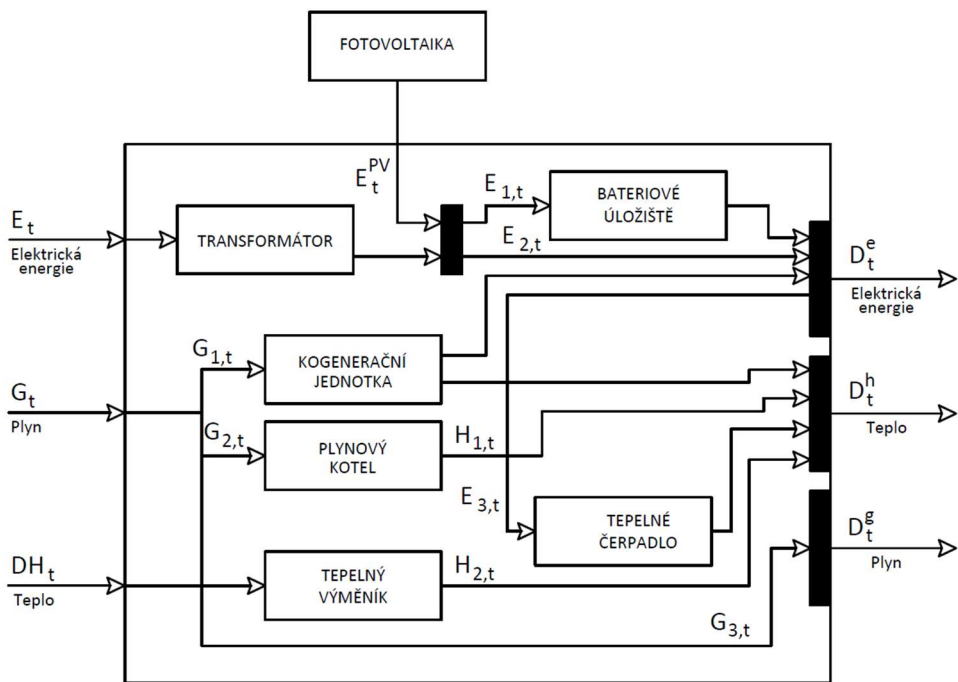
Obrázek 6.6: Varianta 4

6.7.4.1. Komponenty EnergyHubu

- Transformátor
- Kogenerační jednotka
- Tepelný výměník
- Bateriové úložiště
- Tepelné čerpadlo
- Fotovoltaický systém

6.7.5. Varianta 5

Pátá varianta EnergyHubu je zobrazena na obrázku č. něco a přidává do varianty 3 možnost využití distribuční sítě tepla.



Obrázek 6.7: Varianta 5

6.7.5.1. Komponenty EnergyHubu

- Transformátor
- Kogenerační jednotka
- Plynový kotel
- Tepelný výměník
- Bateriové úložiště
- Tepelné čerpadlo
- Fotovoltaický systém

6.7.6. Přidané komponenty navrhovaných modelů EnergyHubu a matematický popis jejich fungování

6.7.6.1. Tepelný výměník

Aby mohl být EnergyHub připojen na distribuční síť tepla je třeba definovat fungování tepelného výměníku a matematicky jej popsat. Tepelný výměník je zařízení, ve kterém dochází k přenesení tepelného výkonu z primárního okruhu do okruhu sekundárního [67]. Zjednodušeně pro potřeby matematického modelu EnergyHubu předpokládejme, že matematicky můžeme popsat princip fungování tepelného výměníku jako:

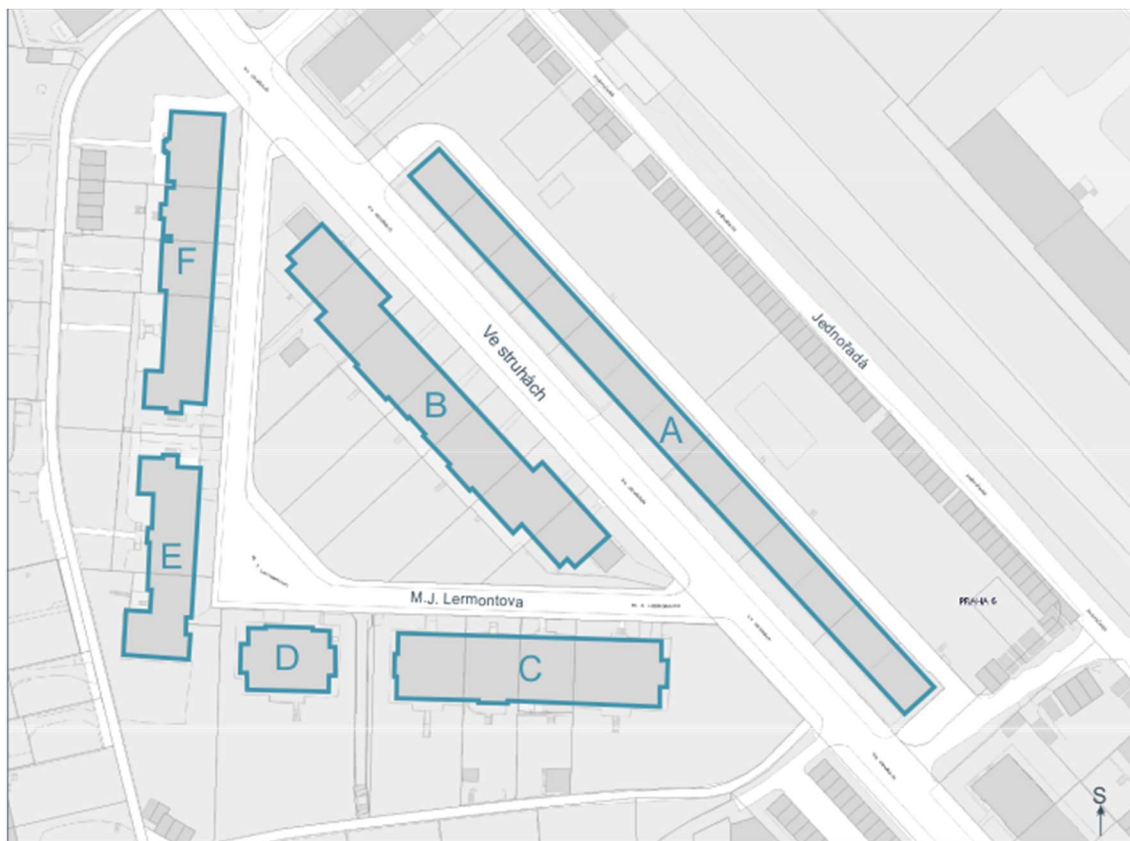
$$H_t = \eta_{he} DH_t$$

Kde H_t je výstup tepelné energie z tepelného výměníku, η_{he} je účinnost tepelného výměníku a DH_t je vstup tepelné energie z distribuční sítě tepla.

6.7.6.2. Fotovoltaické panely a jejich dostupný výkon

S výhodou můžeme do EnergyHubu zapojit i systém fotovoltaických panelů. Fotovoltaické panely umožňují přímé využití solární energie a to tím, že přímo přeměňují solární energii na energii elektrickou [68]. Do navrhovaných modelů EnergyHubů bude elektrická energie získaná fotovoltaickými panely vstupovat přímo jako člen do rovnice toku elektrické energie vstupující do EnergyHubu s označením E_t^{PV} .

Dostupná plocha pro instalaci fotovoltaických panelů a jejich dostupný výkon ukazuje následující Obrázek 6.8 a Tabulka 6.12 [55]:



www.geoportalpraha.cz, © Institut plánování a rozvoje hl. m. Prahy, stránka vytvořena: 27.4.2019
M1:1500

Obrázek 6.8: Celky fotovoltaických panelů [55]

Celek	Plocha střech	Dostupná plocha	Orientace	Sklon	Počet panelů	Výkon
	[m ²]	[m ²]		[°]		[kWp]
A	888	800	JZ	30	400	100
B	1215	730	JZ	15	365	91,25
C	850	350	J	15	170	42,5
D	265	100	J	15	53	13,25
E	617	180	Z	30	90	22,5
F	921	285	Z	30	142	35,5

Tabulka 6.12: Instalované fotovoltaické panely [55]

Dostupný špičkový výkon těchto instalovaných fotovoltaických panelů byl zadán do geografického fotovoltaického informačního systému (Photovoltaic Geographical Information System – PGIS) od Evropské komise [69] a pro dané datum 15. 1. 2015 byla odečtena data dostupného výkonu celého fotovoltaického systému s takto instalovanými panely, která jsou shrnuta v následující tabulce (Tabulka 6.13):

Dostupný výkon fotovoltaických panelů [kW]							
Hodina	Celek A	Celek B	Celek C	Celek D	Celek E	Celek F	Celkem
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	4,61	4,36	2,95	0,92	0,79	1,24	14,86
10	9,08	8,29	4,32	1,35	1,56	2,46	27,04
11	12,80	11,49	5,70	1,78	2,30	3,63	37,70
12	7,77	7,38	3,45	1,08	1,72	2,71	24,11
13	23,11	18,01	8,63	2,69	3,76	5,94	62,14
14	21,68	15,65	7,08	2,21	3,64	5,74	56,01
15	18,18	11,18	4,45	1,39	3,10	4,89	43,18
16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabulka 6.13: Dostupný výkon fotovoltaických panelů

6.7.7. Připojení na distribuční síť tepelné energie

Pro připojení EnergyHubu na distribuční síť tepla je nutné zavést nový člen do objektivní hodnotící funkce matematického modelu EnergyHubu:

$$\lambda_t^{dh} DH_t \quad (6.25)$$

Do objektivní hodnotící funkce vstupuje nový člen $\lambda_t^{dh} DH_t$, kde DH_t je spotřeba tepelné energie z distribuční sítě tepla a λ_t^{dh} je jednotková cena za tepelnou energii. Jak již bylo uvedeno dříve, objektivní funkce nemusí být postavená na ceně za spotřebované energie, ale například na množství vypuštěných emisí, které byly vyprodukovány při výrobě spotřebovaných forem energie.

6.8. Úprava matematického modelu EnergyHubu

Změnou komponent a přidáním dalších energií na vstup EnergyHubu je nutné upravit matematický model EnergyHubu. V této kapitole jsou popsány změny matematického modelu jednotlivých navrhovaných variant EnergyHubu pro zadanou oblast.

6.8.1. Varianta 1

Matematický model varianty 1 je popsán následujícími rovnicemi:

$$\min OF = \sum_t \lambda_t^e E_t + \lambda_t^g G_t \quad (6.26)$$

Objektivní hodnotící funkce matematického modelu OF , je dána součtem cen elektrické energie λ_t^e , plynu λ_t^g a spotřeb elektrické energie E_t a plynu G_t . Její minimalizací dostaneme optimální fungování EnergyHubu pro minimalizaci nákladů na energie za daných podmínek.

$$\eta_{ee} E_t = E_{1,t} \quad (6.27)$$

Rovnice toku elektrické energie do EnergyHubu. Zde je vyjádřen tok vstupní elektrické energie z distribuční sítě elektrické energie E_t přes transformátor s účinností η_{ee} do EnergyHubu, kde je vyjádřena jako $E_{1,t}$.

$$E_{1,t} + \eta_{ge} G_{1,t} = D_t^e + E_{2,t} \quad (6.28)$$

Rovnice toku elektrické energie z EnergyHubu. Na levé straně rovnice stojí elektrická energie z distribuční sítě $E_{1,t}$ a elektrická energie vyrobená kogenerační jednotkou $\eta_{ge} G_{1,t}$ (výroba z množství plynu $G_{1,t}$ s účinností η_{ge}), na pravé straně rovnice stojí poptávka po elektrické energii spotřebiteli v dané oblasti D_t^e a elektrická energie potřebná pro provoz tepelného čerpadla $E_{2,t}$.

$$G_t = G_{1,t} + G_{2,t} + G_{3,t} \quad (6.29)$$

Rovnice toku plynu do EnergyHubu. Tok plynu na vstupu do EnergyHubu G_t je rozdělen na tok plynu pro plynový kotel $G_{2,t}$, tok plynu pro kogenerační jednotku $G_{1,t}$ a tok plynu určený pro přímou spotřebu uživateli $G_{3,t}$.

$$G_{3,t} = D_t^g \quad (6.30)$$

Rovnice toku plynu ven z EnergyHubu. Rovnice přiřazuje vstupní část toku plynu $G_{3,t}$ poptávce po plynu spotřebiteli k přímé spotřebě D_t^g .

$$\eta_{gh} G_{1,t} + H_{1,t} + H_t^{EHP} = D_t^h \quad (6.31)$$

Tato rovnice vyjadřuje výstup tepelné energie z EnergyHubu. Na levé straně rovnice stojí tepelná energie vyrobená kogenerační jednotkou (výroba z množství plynu $G_{1,t}$ s účinností η_{gh}), tepelná energie vyrobená spalováním plynu v plynovém kotli $H_{1,t}$ a tepelná energie vyrobená tepelným čerpadlem H_t^{EHP} , na pravé straně rovnice stojí poptávka po tepelné energii spotřebiteli připojenými na EnergyHub v zadané oblasti D_t^h .

$$\eta_{gh}^f G_{2,t} = H_{1,t} \quad (6.32)$$

Spalování tepla je v plynovém kotli je popsáno touto rovnicí, kde na levé straně je účinnost spalování plynu plynovým kotlem η_{gh}^f a množství plynu $G_{2,t}$ potřebné pro vyrobení tepelné energie $H_{1,t}$.

$$I_t^h \leq 1 \quad (6.33)$$

$$I_t^h \in \{0,1\} \quad (6.34)$$

$$H_t^{EHP} = E_{2,t} \times COP \quad (6.35)$$

$$H_t^{min} I_t^h \leq H_t^{EHP} \leq H_t^{max} I_t^h \quad (6.36)$$

Výše uvedené rovnice popisují fungování tepelného čerpadla pouze v režimu výroby tepla. První dvě rovnice vyjadřují provozní stav tepelného čerpadla I_t^h , třetí rovnice vyjadřuje výkon tepelného čerpadla H_t^{EHP} , který je dán topným faktorem tepelného čerpadla COP a příkonem tepelného čerpadla $E_{2,t}$, a čtvrtá rovnice vyjadřuje

provozní výkonnostní limity tepelného čerpadla, kde H_t^{min} a H_t^{max} jsou minimální respektive maximální výkon tepelného čerpadla.

6.8.2. Varianta 2

Ve variantě 2 došlo k přidání fotovoltaického systému do matematického modelu EnergyHubu. Následující rovnice tedy upravuje pouze tok elektrické energie do EnergyHubu a zbylé rovnice jsou totožné s variantou 1:

$$\eta_{ee}E_t + E_t^{PV} = E_{1,t} \quad (6.37)$$

Do rovnice elektrické energie vstupující do EnergyHubu vstupuje člen vyjadřující elektrickou energii získanou z fotovoltaického systému E_t^{PV} .

6.8.3. Varianta 3

Ve variantě 3 se do modelu zapojuje bateriové úložiště. Následující rovnice vyjadřují změny provedené oproti variantě 2, zbylé rovnice zůstávají stejné:

$$\eta_{ee}E_t + E_t^{PV} = E_{1,t} + E_{2,t} \quad (6.38)$$

Do rovnice toku elektrické energie do EnergyHubu vstupuje na pravé straně člen určující tok elektrické energie určený pro bateriové úložiště $E_{1,t}$ a člen určující tok elektrické energie určený pro přímou spotřebu elektrické energie spotřebiteli připojenými na EnergyHub $E_{2,t}$.

$$E_{2,t} + E_t^{dch} + \eta_{ge}G_{1,t} = D_t^e + E_{3,t} \quad (6.39)$$

Do rovnice toku elektrické energie z EnergyHubu je přidán člen toku elektrické energie z bateriového úložiště E_t^{dch} a jsou změněny indexy ostatních členů toků elektrické energie.

$$E_{1,t} = E_t^{ch} \quad (6.40)$$

Do modelu je přidána rovnice přiřazující tok elektrické energie $E_{1,t}$ jako tok elektrické energie do bateriového úložiště E_t^{ch} .

$$SOC_t = SOC_{t-1} + \left(E_t^{ch} \eta_c - \frac{E_t^{dch}}{\eta_d} \right) \Delta t \quad (6.41)$$

$$I_t^{dch} + I_t^{ch} \leq 1 \quad (6.42)$$

$$I_t^{ch}, I_t^{dch} \in \{0,1\} \quad (6.43)$$

$$E_{min}^{ch} I_t^{ch} \leq E_t^{ch} \leq E_{max}^{ch} I_t^{ch} \quad (6.44)$$

$$E_{min}^{dch} I_t^{dch} \leq E_t^{dch} \leq E_{max}^{dch} I_t^{dch} \quad (6.45)$$

$$SOC_{min} \leq SOC_t \leq SOC_{max} \quad (6.46)$$

Výše uvedené rovnice definují fungování bateriového úložiště elektrické energie. První rovnice vyjadřuje změnu nabití bateriového úložiště, kde SOC je stav nabití bateriového úložiště, E_t^{ch} je tok elektrické energie pro nabíjení bateriového úložiště s účinností nabíjení η_c a E_t^{dc} je tok elektrické energie z bateriového úložiště s účinností vybíjení η_d . Druhá rovnice vyjadřuje provozní stav bateriového úložiště, kde I_t^{dch} vyjadřuje vybíjení a I_t^{ch} nabíjení bateriového úložiště. Třetí a čtvrtá rovnice vyjadřují limity nabíjení a vybíjení bateriového úložiště. Minimální a maximální limity nabíjení nebo vybíjení jsou vyjádřeny členy E_{min}^{ch} pro minimum nabíjení, E_{max}^{ch} pro maximum vybíjení, E_{min}^{dch} pro minimum vybíjení a E_{max}^{dch} pro maximum vybíjení. Poslední rovnice vyjadřuje kapacitu bateriového úložiště. Stav nabití bateriového úložiště SOC_t musí být v rozmezí minimálního stavu nabití SOC_{min} a maximálního stavu nabití SOC_{max} .

$$H_t^{EHP} = E_{3,t} \times COP \quad (6.47)$$

Poslední změnou v matematickém modelu pro variantu 3 je změna indexu toku elektrické energie pro tepelné čerpadlo.

6.8.4. Varianta 4

Ve variantě 4 došlo oproti variantě 3 k vypuštění využití plynového kotle pro výrobu tepelné energie a jeho nahrazení připojením k distribuční síti tepelné energie s využitím tepelného výměníku. Změny v rovnicích matematického modelu oproti variantě 3 jsou popsány níže:

$$\min OF = \sum_t \lambda_t^e E_t + \lambda_t^g G_t + \lambda_t^{dh} DH_t \quad (6.48)$$

Do objektivní hodnotící funkce vstupuje člen $\lambda_t^{dh} DH_t$ (jednotková cena za tepelnou energii λ_t^{dh} a množství odebraného tepla z distribuční sítě tepla DH_t) pro náklady na tepelnou energii odebranou z distribuční sítě tepla.

$$G_t = G_{1,t} + G_{2,t} \quad (6.49)$$

Z rovnice toku plynu do EnergyHubu je vypuštěn člen určující tok plynu do plynového kotle. Plyn na vstupu do EnergyHubu G_t se dělí na tok plynu pro kogenerační jednotku $G_{1,t}$ a tok plynu pro uspokojení poptávky po plynu spotřebitelů $G_{2,t}$. Stejně tak je z modelu vypuštěna celá rovnice fungování plynového kotle.

$$H_{1,t} = \eta_{he} DH_t \quad (6.50)$$

Dále je třeba do modelu zavést rovnici pro tepelný výměník, který v tomto modelu nahrazuje plynový kotel. Množství tepla odebraného z distribuční sítě tepla DH_t je s účinností η_{he} přeměněno na teplo $H_{1,t}$. V rovnici toku tepelné energie ven z EnergyHubu není nutné dělat žádné úpravy, jelikož člen tepelného výměníku přímo nahrazuje původní člen plynového kotle.

6.8.5. Varianta 5

Varianta 5 zkoumá možné dosažení úspor nákladů na energie vrácením plynového kotle do varianty 4. Je to tedy nejkomplexnější varianta, která by za ideálních cenových podmínek měla poskytovat největší úspory. Matematický model vychází z varianty 4, změny jsou popsány níže uvedenými rovnicemi, zbylé rovnice zůstávají totožné s variantou 4:

$$G_t = G_{1,t} + G_{2,t} + G_{3,t} \quad (6.51)$$

Do rovnice toku plynu opět přichází člen $G_{2,t}$, který vyjadřuje tok plynu do plynového kotle. Na levé straně rovnice je tedy vstup plynu do EnergyHubu G_t a na pravé straně rovnice stojí členy pro tok plynu do kogenerační jednotky $G_{1,t}$, tok plynu do

plynového kotle $G_{2,t}$ a tok určený pro přímou spotřebu uživateli připojenými na EnergyHub $G_{3,t}$.

$$\eta_{gh}^f G_{2,t} = H_{1,t} \quad (6.52)$$

$$H_{2,t} = \eta_{he} DH_t \quad (6.53)$$

$$\eta_{gh} G_{1,t} + H_{1,t} + H_{2,t} + H_t^{EHP} = D_t^h \quad (6.54)$$

Do matematického modelu tedy vstupuje zpátky rovnice fungování plynového kotle, která vyjadřuje spalování plynu $G_{2,t}$ s účinností η_{gh}^f na teplo $H_{1,t}$. Dále je třeba upravit index u členu tepelné energie pro tepelný výměník $H_{2,t}$ a přidání tohoto členu do rovnice toku tepelné energie ven z EnergyHubu.

6.9. Nalezení neoptimálnější varianty EnergyHubu pomocí GAMS

Ze zjištěných dat ze zadané oblasti, připravených matematických modelů a dalších popsaných předpokladů byly sestaveny kódy programu GAMS pro nalezení neoptimálnější varianty EnergyHubu.

6.9.1. Vstupní data

V této kapitole jsou shrnuta všechna potřebná vstupní data pro nalezení neoptimálnější varianty EnergyHubu.

Pro potřeby nalezení neoptimálnější varianty EnergyHubu nejsou v matematických modelech zahrnuty kapacitní omezení přípojek distribučních sítí.

6.9.1.1. *Hodinové spotřeby, dostupný výkon fotovoltaického systému, ceny energií*

Hodinové spotřeby energií, dostupný hodinový výkon fotovoltaického systému a hodinová cena elektrické energie je shrnuta v následující tabulce (Tabulka 6.14):

Hodina	D_t^h [kW]	D_t^e [kW]	D_t^g [kW]	E_t^{PV} [kW]	λ_t^e [Kč/kW]
1	422,47	53,92	21,72	0	2,027
2	422,47	47,66	21,72	0	2,027
3	422,47	42,33	21,72	0	2,027
4	422,47	43,77	21,72	0	2,027
5	422,47	48,41	21,72	0	2,027
6	422,47	53,97	21,72	0	2,027
7	422,47	69,29	21,72	0	2,027
8	422,47	82,1	21,72	0	2,027
9	422,47	89,97	21,72	14,86	2,027
10	422,47	90,92	21,72	27,04	2,027
11	422,47	95,06	21,72	37,7	2,027
12	422,47	99,6	21,72	24,11	2,653
13	422,47	96,03	21,72	62,14	2,653
14	422,47	87,79	21,72	56,01	2,653
15	422,47	93,68	21,72	43,18	2,027
16	422,47	102,65	21,72	0	2,027
17	422,47	123,6	21,72	0	2,027
18	422,47	147,78	21,72	0	2,027
19	422,47	150,86	21,72	0	2,653
20	422,47	149,18	21,72	0	2,653
21	422,47	138,48	21,72	0	2,653
22	422,47	119,33	21,72	0	2,653
23	422,47	94,18	21,72	0	2,653
24	422,47	70,79	21,72	0	2,027

Tabulka 6.14: Souhrn vstupních dat

Cena za plyn je fixní a činí 1,763 Kč/kWh. Cena za teplo z centrálního zásobování teplem je taktéž fixní a činí 2,40 Kč/kWh.

6.9.1.2. Komponenty EnergyHubu

6.9.1.2.1. Bateriové úložiště

Bateriové úložiště bylo vybráno od firmy TESLA s charakteristikami [70]:

TESLA POWERPACK	
Kapacita:	232 kWh
Výkon:	130 kW
Napětí:	380 – 480 V, 3 fáze
Hloubka vybití:	100 %

Pro potřeby nepřetěžování distribuční sítě byl stanoven maximální nabíjecí příkon bateriového úložiště na 20 kW. Počáteční nabití bateriového úložiště je počítáno jako 20 % jeho kapacity. Účinnost nabíjení a vybíjení byla stanovena jako 0.9.

6.9.1.2.2. Kogenerační jednotka

Kogenerační jednotka byla zvolena TEDOM Cento 210 s následujícími parametry [71]:

TEDOM Cento 210	
Elektrický výkon:	210 kW
Tepelný výkon:	279 kW
Účinnost – elektrická energie:	0,397
Účinnost – tepelná energie:	0,527
Maximální výkon paliva na vstup:	519 kW
Palivo:	Zemní plyn

Tabulka 6.15: TEDOM Cento 210 – specifikace [71]

6.9.1.2.3. Plynový kotel

Plynový kotel byl vybrán od firmy VIADRUS typ G700 s parametry [72]:

VIADRUS G700	
Jmenovitý tepelný výkon:	470 kW
Jmenovitý tepelný příkon:	512 kW
Účinnost:	0,915
Palivo:	Zemní plyn

Tabulka 6.16: VIADRUS G700 - specifikace [72]

6.9.1.2.4. Tepelný výměník

Pro potřeby přesného návrhu tepelného výměníku by bylo potřeba znát přesnější informace o teplotních látkách. Pro potřeby tohoto příkladu se počítá s účinností tepelného výměníku 0,9 [73].

6.9.1.2.5. Tepelné čerpadlo

Tepelné čerpadlo bylo navrženo od firmy VISSMANN [74]:

VITOCAL 300-A – AWO 301.A60	
Jmenovitý tepelný výkon:	50 kW
Topný faktor (COP) – A7W35:	4,1
Topný faktor (COP) – A-7W35:	2,9
Technologie:	Vzduch/Voda

Tabulka 6.17: Vitocal 300-A - specifikace [74]

Tepelné čerpadlo VITOCAL 300-A je možné škálovat až do kaskády po 5. Maximální dostupný výkon kaskády je 250 kW. Extrapolací byla určena hodnota COP pro teplotu vzduchu -12 °C na 2,47.

6.9.1.2.6. Transformátor

Pro potřeby zvolení vhodného typu transformátoru je zapotřebí znát podrobnější informace. Běžná účinnost transformátorů se pohybuje mezi 0,85 až 0,99 [75].

Pro potřeby výpočtu byla zvolena hodnota 0,96.

6.9.2. Kódy programu modelu v EnergyHubu v GAMS

V této kapitole jsou prezentovány kódy v programu GAMS jednotlivých navrhovaných variant EnergyHubů.

6.9.2.1. Vstupní data

Zavedení proměnné pro čas, vytvoření tabulky pro vstupní data a zadání vstupních dat spotřeb, dostupného výkonu fotovoltaického systému a hodinové ceny za elektrickou energii:

```

1 Set t hours / t1*t24 / ;
2 /* vytvoření promenne t
3 Table data(t, *)
4 /* vytvoření tabulky data s promennou t
5
6 t1 422.47 53.92 21.72 0 2.027
7 t2 422.47 47.66 21.72 0 2.027
8 t3 422.47 42.33 21.72 0 2.027
9 t4 422.47 43.77 21.72 0 2.027
10 t5 422.47 48.41 21.72 0 2.027
11 t6 422.47 53.97 21.72 0 2.027
12 t7 422.47 69.29 21.72 0 2.027
13 t8 422.47 82.1 21.72 0 2.027
14 t9 422.47 89.97 21.72 14.86 2.027
15 t10 422.47 90.92 21.72 27.04 2.027
16 t11 422.47 95.06 21.72 37.7 2.027
17 t12 422.47 99.6 21.72 24.11 2.653
18 t13 422.47 96.03 21.72 62.14 2.653
19 t14 422.47 87.79 21.72 56.01 2.653
20 t15 422.47 93.68 21.72 43.18 2.027
21 t16 422.47 102.65 21.72 0 2.027
22 t17 422.47 123.6 21.72 0 2.027
23 t18 422.47 147.78 21.72 0 2.027
24 t19 422.47 150.86 21.72 0 2.653
25 t20 422.47 149.18 21.72 0 2.653
26 t21 422.47 138.48 21.72 0 2.653
27 t22 422.47 119.33 21.72 0 2.653
28 t23 422.47 94.18 21.72 0 2.653
29 t24 422.47 70.79 21.72 0 2.027;
30 /* vstup hodnot do tabulky data

```

Obrázek 6.9: Kód GAMS – vstupní data

6.9.2.2. Proměnné a matematický model

Zavedení proměnné pro objektivní hodnotící funkci matematického modelu:

```
31 variable cost ;  
32 */ zavedeni promenne cost - provozni naklady
```

Obrázek 6.10: Kód GAMS – objektivní funkce

6.9.2.2.1. Varianta 1

Zavedení proměnných pro variantu 1:

```
33 positive variables E(t), E1(t), E2(t), G(t),  
34 G1(t), G2(t), G3(t), H1(t), H_ehp(t) ;  
35 */ zavedeni kladnych promennych  
36 binary variables Ih(t);  
37 */ zavedeni binarnich promennych  
38 scalar eta_ee / 0.96 / , eta_ge / 0.397 / , eta_gh / 0.527 / ,  
39 COP / 2.47 / , H_ehpMax / 250 / , H_ehpMin / 0.3 / , Chpmax / 519 / ,  
40 Fmax / 512 / , eta_ghf / 0.915 / , lambda_g / 1.763 / ;  
41 */ zavedeni promennych s danymi hodnotami  
42 H_ehp.up(t)=H_ehpMax ; !!maximalni vykon TC  
43 G1.up(t)=Chpmax ; !!maximalni vykon KVET  
44 G2.up(t)=Fmax ; !!maximalni vykon plynovy kotel  
45 */ dodatecne upresneni hodnot promennych
```

Obrázek 6.11: Kód GAMS – proměnné varianty 1

Rovnice varianty 1, sestavení modelu a zavolání řešitele:

```

46 Equations
47 eq1 , eq2 , eq3 , eq4 , eq5 , eq6 ,
48 eq7 , eq8 , eq9 , eq10 , eq11 ;
49 */ zavedeni potrebného počtu rovnic s označením
50 */ rovnice definující matematický model EnergyHub:
51 eq1.. cost =e= sum(t , data(t , 'lambda_e')*E(t)+lambda_g*G(t)) ;
52 */ objektivní hodnotící funkce - součet nákladu na energii
53 eq2(t).. E1(t)+eta_ge*G1(t) =e= data(t, 'De')+E2(t) ;
54 */ tok elektrické energie z EnergyHubu
55 eq3(t).. eta_ee*E(t) =e= E1(t) ;
56 */ tok elektrické energie do EnergyHubu
57 eq4(t).. G(t) =e= G1(t)+G2(t)+G3(t) ;
58 */ tok plynu do EnergyHubu
59 eq5(t).. G3(t) =e= data(t , 'Dg') ;
60 */ přiřazení toku plynu poptavce po plynu
61 eq6(t).. eta_gh*G1(t)+H1(t)+H_ehp(t) =e= data(t, 'Dh') ;
62 */ tok tepla z EnergyHubu
63 eq7(t).. eta_ghf*G2(t) =e= H1(t) ;
64 */ fungování plynového kotle
65 eq8(t).. H_ehp(t) =e= E2(t)*COP ;
66 */ výkon tepelného čerpadla
67 eq9(t).. H_ehp(t) =l= H_ehpMax*Ih(t) ;
68 */ omezení maximálního tepelného výkonu tepelného čerpadla
69 eq10(t).. H_ehp(t) =g= H_ehpMax*Ih(t)*H_ehpMin;
70 */ omezení minimálního tepelného výkonu tepelného čerpadla
71 eq11(t).. Ih(t) =l= 1 ;
72 */ provozní režim tepelného čerpadla (chlazení/topení)
73 Model hub / all / ;
74 */ vytvoření matematického modelu ze zadanych dat
75 Solve hub us mip min cost ;
76 */ příkaz pro řešení daného modelu pomocí MIP
77 */ řešitele s minimalizací proměnné cost

```

Obrázek 6.12: Kód GAMS – matematický model varianty 1

6.9.2.2.2. Varianta 2

Zavedení proměnných pro variantu 2:

```

33 positive variables E(t), E1(t), E2(t), G(t), G1(t), G2(t),
34 G3(t), H1(t), H_ehp(t) ;
35 */ zavedení kladných proměnných
36 binary variables Ih(t);
37 */ zavedení binárních proměnných
38 scalar eta_ee / 0.96 / , eta_ge / 0.397 / , eta_gh / 0.527 / ,
39 COP / 2.47 / , H_ehpMax / 250 / , H_ehpMin / 0.3 / , Chpmax / 519 / ,
40 Fmax / 512 / , eta_ghf / 0.915 / , lambda_g / 1.763 / ;
41 */ zavedení proměnných s danými hodnotami
42 H_ehp.up(t)=H_ehpMax ;      !!maximální výkon TC
43 G1.up(t)=Chpmax ;          !!maximální výkon KVET
44 G2.up(t)=Fmax ;           !!maximální výkon plynový kotel
45 */ dodatečně upřesnění hodnot proměnných

```

Obrázek 6.13: Kód GAMS – proměnné varianty 2

Rovnice varianty 2, sestavení modelu a zavolání řešitele:

```

46 Equations
47 eq1 , eq2 , eq3 , eq4 , eq5 , eq6 ,
48 eq7 , eq8 , eq9 , eq10 , eq11 ;
49 */ zavedeni potrebného počtu rovnic s oznacením
50 */ rovnice definující matematický model EnergyHub:
51 eq1.. cost =e= sum(t , data(t , 'lambda_e')*E(t)+lambda_g*G(t)) ;
52 */ objektivní hodnotící funkce - součet nákladů na energii
53 eq2(t).. E1(t)+eta_ge*G1(t) =e= data(t, 'De')+E2(t) ;
54 */ tok elektrické energie z EnergyHubu
55 eq3(t).. eta_ee*E(t) + data(t, 'PV') =e= E1(t) ;
56 */ tok elektrické energie do EnergyHubu
57 eq4(t).. G(t) =e= G1(t)+G2(t)+G3(t) ;
58 */ tok plynu do EnergyHubu
59 eq5(t).. G3(t) =e= data(t , 'Dg') ;
60 */ tok plynu z EnergyHubu
61 eq6(t).. eta_gh*G1(t)+H1(t)+H_ehp(t) =e= data(t, 'Dh') ;
62 */ tok tepla z EnergyHubu
63 eq7(t).. eta_ghf*G2(t) =e= H1(t) ;
64 */ fungování plynové kotle
65 eq8(t).. H_ehp(t) =e= E2(t)*COP ;
66 */ výkon tepelného čerpadla
67 eq9(t).. H_ehp(t) =l= H_ehpMax*Ih(t) ;
68 */ omezení maximálního tepelného výkonu tepelného čerpadla
69 eq10(t).. H_ehp(t) =g= H_ehpMax*Ih(t)*H_ehpMin;
70 */ omezení minimálního tepelného výkonu tepelného čerpadla
71 eq11(t).. Ih(t) =l= 1 ;
72 */ provozní režim tepelného čerpadla (chlazení/topení)
73 Model hub / all / ;
74 */ vytvoření matematického modelu ze zadanych dat
75 Solve hub us mip min cost ;
76 */ příkaz pro řešení daného modelu pomocí MIP
77 */ resitele s minimalizací proměnné cost

```

Obrázek 6.14: Kód GAMS – matematický model varianty 2

6.9.2.2.3. Varianta 3

Zavedení proměnných pro variantu 3:

```

33 positive variables E(t), E1(t), E2(t), E3(t), G(t), G1(t), G2(t),
34 Ed(t), Ec(t), G3(t), H1(t), H_ehp(t), SOC(t) ;
35 */ zavedení kladných proměnných
36 binary variables Ih(t), Idch(t), Ich(t) ;
37 */ zavedení binárních proměnných
38 scalar eta_ee / 0.96 / , eta_ge / 0.397 / , eta_gh / 0.527 / ,
39 eta_c / 0.9 / , eta_d / 0.9 / , COP / 2.47 / , H_ehpMax / 250 / ,
40 H_ehpMin / 0.3 / , Chpmax / 519 / , Fmax / 512 / , eta_ghf / 0.915 / ,
41 lambda_g / 1.763 / , SOCmax / 232 / , SOC0 / 0 / ;
42 */ zavedení proměnných s danými hodnotami
43 H_ehp.up(t)=H_ehpMax ;      !!maximální výkon TC
44 G1.up(t)=Chpmax ;          !!maximální výkon KVET
45 G2.up(t)=Fmax ;           !!maximální výkon plynové kotle
46 SOC0=0.2*SOCmax ;        !!pocáteční stav bat. uložiste
47 SOC.up(t)=SOCmax ;        !!maximální kapacita bat. uložiste
48 SOC.lo(t)=0 ;            !!minimalní kapacita bat. uložiste
49 SOC.fx('t24')=SOC0 ;     !!cyklus bat. uložiste
50 Ec.up(t)=20 ;            !!maximum nabíjení
51 Ec.lo(t)=0 ;            !!minimum nabíjení
52 Ed.up(t)=130 ;          !!maximum vybíjení
53 Ed.lo(t)=0 ;            !!minimum vybíjení
54 */ dodatečné upřesnění hodnot proměnných

```

Obrázek 6.15: Kód GAMS – proměnné varianty 3

Rovnice varianty 3, sestavení modelu a zavolání řešitele:


```

55 Equations
56 eq1 , eq2 , eq3 , eq4 , eq5 , eq6 , eq7 , eq8 ,
57 eq9 , eq10 , eq11, eq12, eq13, eq14, eq15, eq16 ;
58 */ zavedeni potrebného počtu rovnic s označením
59 */ rovnice definující matematický model EnergyHub:
60 eq1.. cost =e= sum(t , data(t , 'lambda_e')*E(t)+lambda_g*G(t)) ;
61 */ objektivní hodnotící funkce - součet nákladů na energii
62 eq2(t).. E2(t)+eta_ge*G1(t)+Ed(t) =e= data(t , 'De')+E3(t) ;
63 */ tok elektrické energie z EnergyHubu
64 eq3(t).. eta_ee*E(t) + data(t , 'PV') =e= E1(t) + E2(t) ;
65 */ tok elektrické energie do EnergyHubu
66 eq4(t).. E1(t) =e= Ec(t) ;
67 */ definování vstupu elektrické energie do bateriového uložiste
68 eq5(t).. SOC(t) =e= SOC0$(ord(t)=1)+SOC(t-1)$(ord(t)>1)+Ec(t)*eta_c-Ed(t)/eta_d ;
69 */ změna stavu úrovně nabití bateriového uložiste
70 eq6(t).. Ed(t) =l= 0.2*SOCmax*Idch(t) ;
71 */ omezení vybití bateriového uložiste
72 eq7(t).. Ec(t) =l= 0.2*SOCmax*Ich(t) ;
73 */ omezení nabíjení bateriového uložiste
74 eq8(t).. Idch(t)+Ich(t) =l= 1 ;
75 */ provozní režim bateriového uložiste (nabíjení/vybití)
76 eq9(t).. G(t) =e= G1(t)+G2(t)+G3(t) ;
77 */ tok plynu do EnergyHubu
78 eq10(t).. G3(t) =e= data(t , 'Dg') ;
79 */ tok plynu z EnergyHubu
80 eq11(t).. eta_gh*G1(t)+H1(t)+H_ehp(t) =e= data(t , 'Dh') ;
81 */ tok tepla z EnergyHubu
82 eq12(t).. eta_ghf*G2(t) =e= H1(t) ;
83 */ fungování plynové kotle
84 eq13(t).. H_ehp(t) =e= E3(t)*COP ;
85 */ výkon tepelného čerpadla
86 eq14(t).. H_ehp(t) =l= H_ehpMax*Ih(t) ;
87 */ omezení maximálního tepelného výkonu tepelného čerpadla
88 eq15(t).. H_ehp(t) =g= H_ehpMax*Ih(t)*H_ehpMin;
89 */ omezení minimálního tepelného výkonu tepelného čerpadla
90 eq16(t).. Ih(t) =l= 1 ;
91 */ provozní režim tepelného čerpadla (chlazení/topení)
92 Model hub / all / ;
93 */ vytvoření matematického modelu ze zadanych dat
94 Solve hub us mip min cost ;
95 */ příkaz pro řešení daného modelu pomocí MIP
96 */ řešitelé s minimalizací proměnné cost

```

Obrázek 6.16: Kód GAMS – matematický model varianty 3

6.9.2.2.4. Varianta 4

Zavedení proměnných pro variantu 4:

```

33 positive variables E(t), E1(t), E2(t), E3(t), G(t), G1(t), G2(t),
34 Ed(t), Ec(t), H1(t), H_ehp(t), SOC(t), DH(t) ;
35 */ zavedení kladných proměnných
36 binary variables Ih(t), Idch(t), Ich(t) ;
37 */ zavedení binárních proměnných
38 scalar eta_ee / 0.96 / , eta_ge / 0.397 / , eta_gh / 0.527 / , eta_c / 0.9 / ,
39 eta_d / 0.9 / , COP / 2.47 / , H_ehpMax / 250 / , H_ehpMin / 0.3 / ,
40 Chpmax / 519 / , eta_he / 0.9 / , lambda_g / 1.763 / , SOCmax / 232 / ,
41 SOC0 / 0 / , lambda_dh / 2.4 / ;
42 */ zavedení proměnných s danými hodnotami
43 H_ehp.up(t)=H_ehpMax ;      !!maximální výkon TC
44 G1.up(t)=Chpmax ;          !!maximální výkon KVET
45 SOC0=0.2*SOCmax ;         !!pocateční stav bat. uložiste
46 SOC.up(t)=SOCmax ;        !!maximální kapacita bat. uložiste
47 SOC.lo(t)=0 ;             !!minimalní kapacita bat. uložiste
48 SOC.fx('t24')=SOC0 ;     !!cyklus bat. uložiste
49 Ec.up(t)=20 ;             !!maximum nabíjení
50 Ec.lo(t)=0 ;              !!minimum nabíjení
51 Ed.up(t)=130 ;           !!maximum vybití
52 Ed.lo(t)=0 ;              !!minimum vybití
53 */ dodatečně upřesnění hodnot proměnných

```

Obrázek 6.17: Kód GAMS – proměnné varianty 4

Rovnice varianty 4, sestavení modelu a zavolání řešitele:

```

54 Equations
55 eq1 , eq2 , eq3 , eq4 , eq5 , eq6 , eq7 , eq8 ,
56 eq9 , eq10 , eq11, eq12, eq13, eq14, eq15, eq16 ;
57 */ zavedeni potrebného počtu rovnic s oznacnim
58 */ rovnice definující matematický model EnergyHub:
59 eq1.. cost =e= sum(t , data(t , 'lambda_e')*E(t)+lambda_g*G(t)+lambda_dh*Dh(t)) ;
60 */ objektivní hodnotící funkce - součet nákladů na energii
61 eq2(t).. E2(t)+eta_ge*G1(t)+Ed(t) =e= data(t , 'De')+E3(t) ;
62 */ tok elektrické energie z EnergyHubu
63 eq3(t).. eta_ee*E(t) + data(t , 'PV') =e= E1(t) + E2(t) ;
64 */ tok elektrické energie do EnergyHubu
65 eq4(t).. E1(t) =e= Ec(t) ;
66 */ definování vstupu elektrické energie do bateriového uložiste
67 eq5(t).. SOC(t) =e= SOC0$(ord(t)=1)+SOC(t-1)$(ord(t)>1)+Ec(t)*eta_c-Ed(t)/eta_d ;
68 */ změna stavu úrovně nabití bateriového uložiste
69 eq6(t).. Ed(t) =l= 0.2*SOCmax*Idch(t) ;
70 */ omezení vybití bateriového uložiste
71 eq7(t).. Ec(t) =l= 0.2*SOCmax*Ich(t) ;
72 */ omezení nabíjení bateriového uložiste
73 eq8(t).. Idch(t)+Ich(t) =l= 1 ;
74 */ provozní režim bateriového uložiste (nabíjení/vybití)
75 eq9(t).. G(t) =e= G1(t)+G2(t) ;
76 */ tok plynu do EnergyHubu
77 eq10(t).. G2(t) =e= data(t , 'Dg') ;
78 */ tok plynu z EnergyHubu
79 eq11(t).. eta_gh*G1(t)+H1(t)+H_ehp(t) =e= data(t , 'Dh') ;
80 */ tok tepla z EnergyHubu
81 eq12(t).. eta_he*Dh(t) =e= H1(t) ;
82 */ fungování tepelného výměníku
83 eq13(t).. H_ehp(t) =e= E3(t)*COP ;
84 */ výkon tepelného čerpadla
85 eq14(t).. H_ehp(t) =l= H_ehpMax*Ih(t) ;
86 */ omezení maximálního tepelného výkonu tepelného čerpadla
87 eq15(t).. H_ehp(t) =g= H_ehpMax*Ih(t)*H_ehpMin;
88 */ omezení minimálního tepelného výkonu tepelného čerpadla
89 eq16(t).. Ih(t) =l= 1 ;
90 */ provozní režim tepelného čerpadla (chlazení/topení)
91 Model hub / all / ;
92 */ vytvoření matematického modelu ze zadanych dat
93 Solve hub us mip min cost ;
94 */ příkaz pro řešení daného modelu pomocí MIP řešitele s minimalizací proměnné cost

```

Obrázek 6.18: Kód GAMS – matematický model varianty 4

6.9.2.2.5. Varianta 5

Zavedení proměnných pro variantu 5:

```

33 positive variables E(t), E1(t), E2(t), E3(t), G(t), G1(t), G2(t),
34 Ed(t), Ec(t), H1(t), H2(t), H_ehp(t), SOC(t), Dh(t), G3(t) ;
35 */ zavedení kladných proměnných
36 binary variables Ih(t), Idch(t), Ich(t) ;
37 */ zavedení binárních proměnných
38 scalar eta_ee / 0.96 / , eta_ge / 0.397 / , eta_gh / 0.527 / , eta_c / 0.9 / , eta_d / 0.9 / ,
39 COP / 2.47 / , H_ehpMax / 250 / , H_ehpMin / 0.3 / , Chpmax / 519 / , eta_he / 0.9 / , Fmax / 512 / ,
40 eta_ghf / 0.915 / , lambda_g / 1.763 / , SOCmax / 232 / , SOC0 / 0 / , lambda_dh / 2.4 / ;
41 */ zavedení proměnných s danými hodnotami
42 H_ehp.up(t)=H_ehpMax ;           !!maximální výkon TC
43 G1.up(t)=Chpmax ;               !!maximální výkon KVET
44 SOC0=0.2*SOCmax ;              !!počáteční stav bat. uložiste
45 SOC.up(t)=SOCmax ;             !!maximální kapacita bat. uložiste
46 SOC.lo(t)=0 ;                  !!minimalní kapacita bat. uložiste
47 SOC.fx('t24')=SOC0 ;          !!cyklus bat. uložiste
48 G2.up(t)=Fmax ;                !!maximální výkon plynového kotle
49 Ec.up(t)=20 ;                  !!maximum nabíjení
50 Ec.lo(t)=0 ;                   !!minimum nabíjení
51 Ed.up(t)=130 ;                 !!maximum vybití
52 Ed.lo(t)=0 ;                   !!minimum vybití
53 */ dodatečně upřesnění hodnot proměnných

```

Obrázek 6.19: Kód GAMS – proměnné varianty 5

Rovnice varianty 5, sestavení modelu a zavolání řešitele:

```

54 Equations
55 eq1 , eq2 , eq3 , eq4 , eq5 , eq6 , eq7 , eq8 ,
56 eq9 , eq10 , eq11 , eq12 , eq13 , eq14 , eq15 , eq16 , eq17 ;
57 */ zavedeni potrebneho poctu rovnic s oznacnim
58 */ rovnice definujici matematicky model EnergyHub:
59 eq1.. cost =e= sum(t , data(t , 'lambda_e')*E(t)+lambda_g*G(t)+lambda_dh*DH(t)) ;
60 */ objektivni hodnotici funkce - soucet nakladu na energie
61 eq2(t).. E2(t)+eta_ge*G1(t)+Ed(t) =e= data(t , 'De')+E3(t) ;
62 */ tok elektricke energie z EnergyHubu
63 eq3(t).. eta_ee*E(t) + data(t , 'PV') =e= E1(t) + E2(t) ;
64 */ tok elektricke energie do EnergyHubu
65 eq4(t).. E1(t) =e= Ec(t) ;
66 */ definovani vstupu elektricke energie do baterioveho uloziste
67 eq5(t).. SOC(t) =e= SOC0$(ord(t)=1)+SOC(t-1)$(ord(t)>1)+Ec(t)*eta_c-Ed(t)/eta_d ;
68 */ zmena stavu urovne nabití baterioveho uloziste
69 eq6(t).. Ed(t) =l= 0.2*SOCmax*Idch(t) ;
70 */ omezeni vybijeni baterioveho uloziste
71 eq7(t).. Ec(t) =l= 0.2*SOCmax*Ich(t) ;
72 */ omezeni nabijeni baterioveho uloziste
73 eq8(t).. Idch(t)+Ich(t) =l= 1 ;
74 */ provozni rezim baterioveho uloziste (nabijeni/vybijeni)
75 eq9(t).. eta_ghf*G2(t) =e= H1(t) ;
76 */ fungovani plynoveho kotle
77 eq10(t).. G(t) =e= G1(t)+G2(t)+G3(t) ;
78 */ tok plynu do EnergyHubu
79 eq11(t).. G3(t) =e= data(t , 'Dg') ;
80 */ tok plynu z EnergyHubu
81 eq12(t).. eta_gh*G1(t)+H1(t)+H2(t)+H_ehp(t) =e= data(t , 'Dh') ;
82 */ tok tepla z EnergyHubu
83 eq13(t).. eta_he*DH(t) =e= H2(t) ;
84 */ fungovani tepelneho vymeniku
85 eq14(t).. H_ehp(t) =e= E3(t)*COP ;
86 */ vykon tepelneho cernadla
87 eq15(t).. H_ehp(t) =l= H_ehpMax*Ih(t) ;
88 */ omezeni maximalniho tepelneho vykonu tepelneho cernadla
89 eq16(t).. H_ehp(t) =g= H_ehpMax*Ih(t)*H_ehpMin;
90 */ omezeni minimalniho tepelneho vykonu tepelneho cernadla
91 eq17(t).. Ih(t) =l= 1 ;
92 */ provozni rezim tepelneho cernadla (chlazeni/topeni)
93 Model hub / all / ;
94 */ vytvoreni matematickeho modelu ze zadanych dat
95 Solve hub us mip min cost ;
96 */ prikaz pro reseni daneho modelu pomoci MIP resitele s minimalizaci promenne cost

```

Obrázek 6.20: Kód GAMS – matematický model varianty 5

6.9.3. Výsledky jednotlivých variant EnergyHubu

6.9.3.1. Varianta 1

Report z řešitele pro variantu 1:

```

S O L V E      S U M M A R Y

MODEL  hub          OBJECTIVE cost
TYPE   MIP          DIRECTION MINIMIZE
SOLVER CPLEX       FROM LINE 96

**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS      8 Integer Solution
**** OBJECTIVE VALUE    18683.9515

RESOURCE USAGE, LIMIT    0.079    1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT  46      2000000000

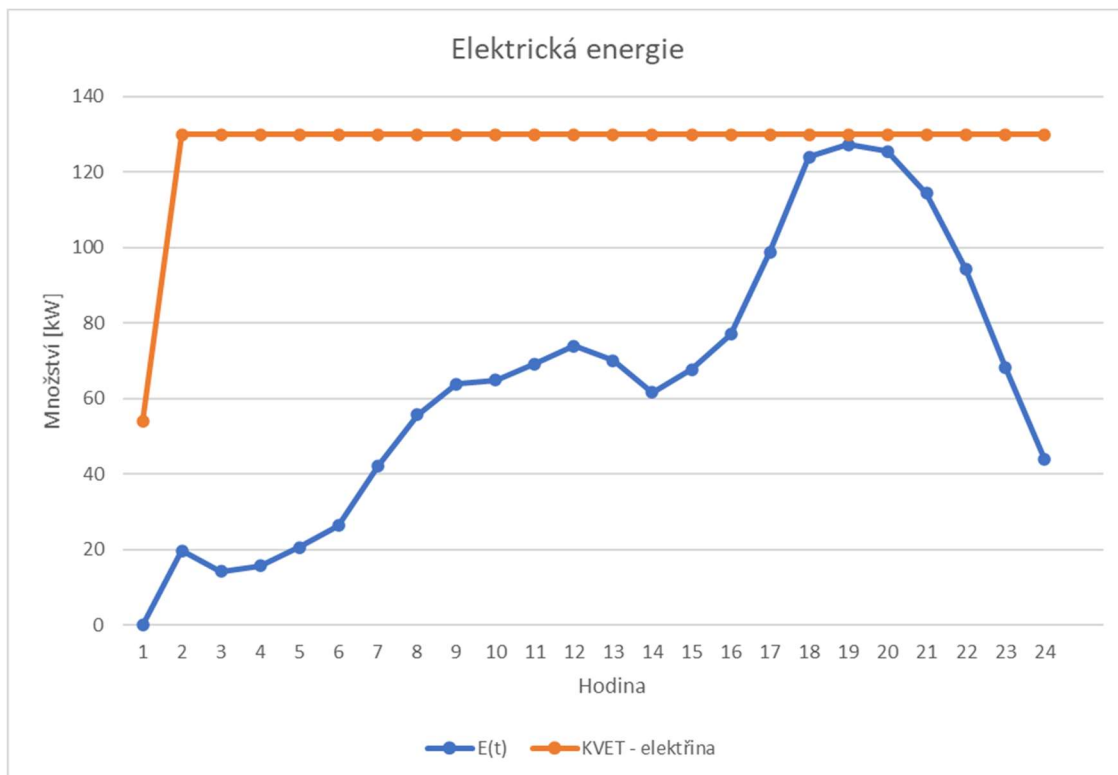
IBM ILOG CPLEX 30.3.0 rc5da09e Released Mar 06, 2020 WEI x86 64bit/MS Window
*** This solver runs with a demo license. No commercial use.
Cplex 12.10.0.0

Space for names approximately 0.01 Mb
Use option 'names no' to turn use of names off
MIP status(102): integer optimal, tolerance
Cplex Time: 0.08sec (det. 26.14 ticks)
Fixing integer variables, and solving final LP...
Fixed MIP status(1): optimal
Cplex Time: 0.00sec (det. 0.34 ticks)
Solution satisfies tolerances.

MIP Solution:      18683.951543  (0 iterations, 0 nodes)
Final Solve:      18683.951543  (46 iterations)
    
```

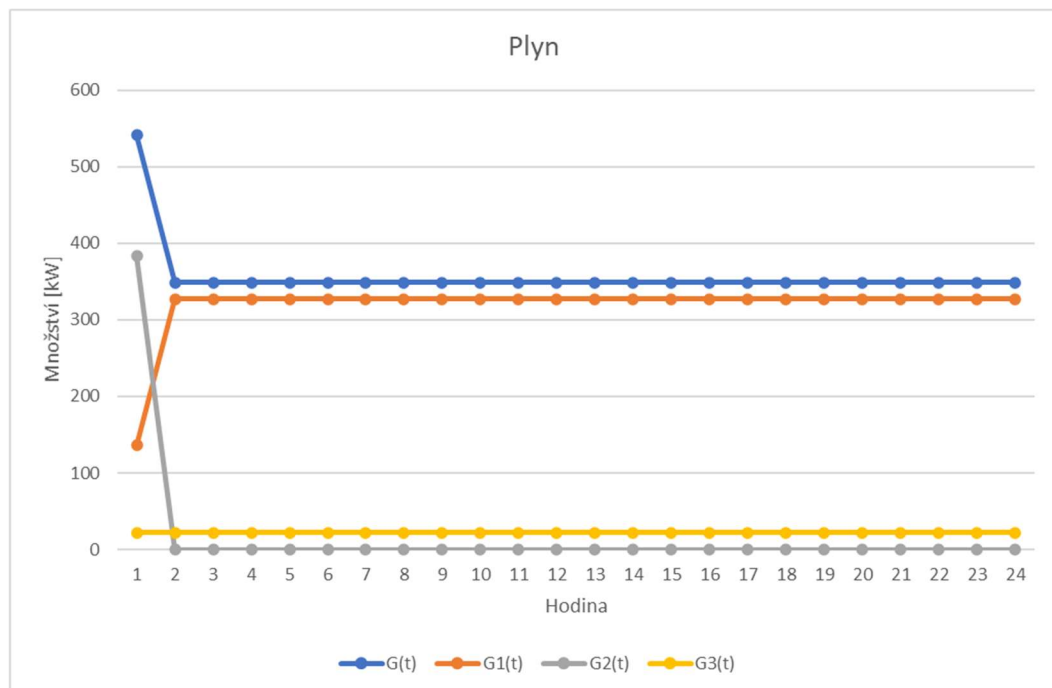
Obrázek 6.21: GAMS – report varianty 1

Hodnota objektivní funkce pro variantu 1 je **18 686,95 Kč**.



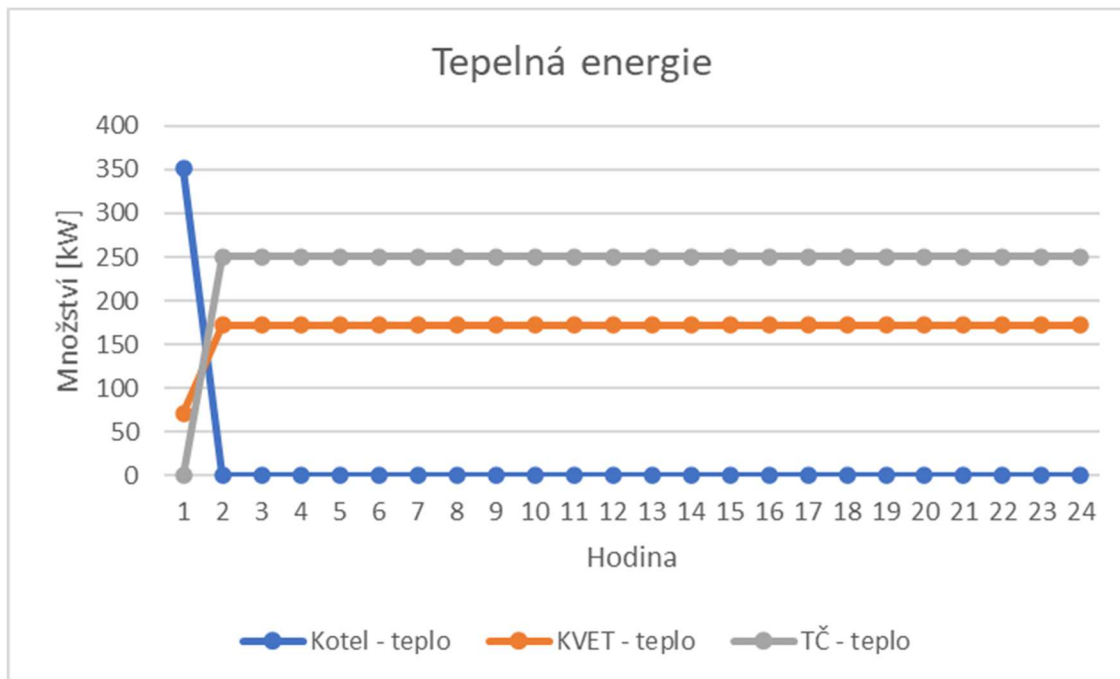
Graf 6.1: Elektrická energie – varianta 1

Graf č. 6.1 zobrazuje průběh odběru elektrické energie $E(t)$ z distribuční sítě a výrobu elektrické energie kogenerační jednotkou.



Graf 6.2: Odběr plynu – varianta 1

Graf č. 6.2 ukazuje odebíraný plyn $G(t)$ a jeho rozložení mezi komponenty, které plyn spotřebovávají ($G1(t)$ - kogenerační jednotka, $G2(t)$ – plynový kotel) a odběr plynu uživateli k přímé spotřebě $G3(t)$.



Graf 6.3: Tepelná energie – varianta 1

Graf č. 6.3 ukazuje průběh výroby tepelné energie v EnergyHubu.

6.9.3.2. Varianta 2

Report z řešitele pro variantu 2:

GAMS 30.3.0 rc5da09e Released Mar 6, 2020 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows - 05/22/20 20:17:22 Page 5
 General Algebraic Modeling System
 Solution Report SOLVE hub Using MIP From line 97

```

      SOLVE      SUMMARY

MODEL  hub          OBJECTIVE cost
TYPE   MIP          DIRECTION MINIMIZE
SOLVER CPLEX       FROM LINE 97

**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS      8 Integer Solution
**** OBJECTIVE VALUE   18031.5653

RESOURCE USAGE, LIMIT      0.110      1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT    46      200000000

IBM ILOG CPLEX 30.3.0 rc5da09e Released Mar 06, 2020 WEI x86 64bit/MS Window
*** This solver runs with a demo license. No commercial use.
Cplex 12.10.0.0

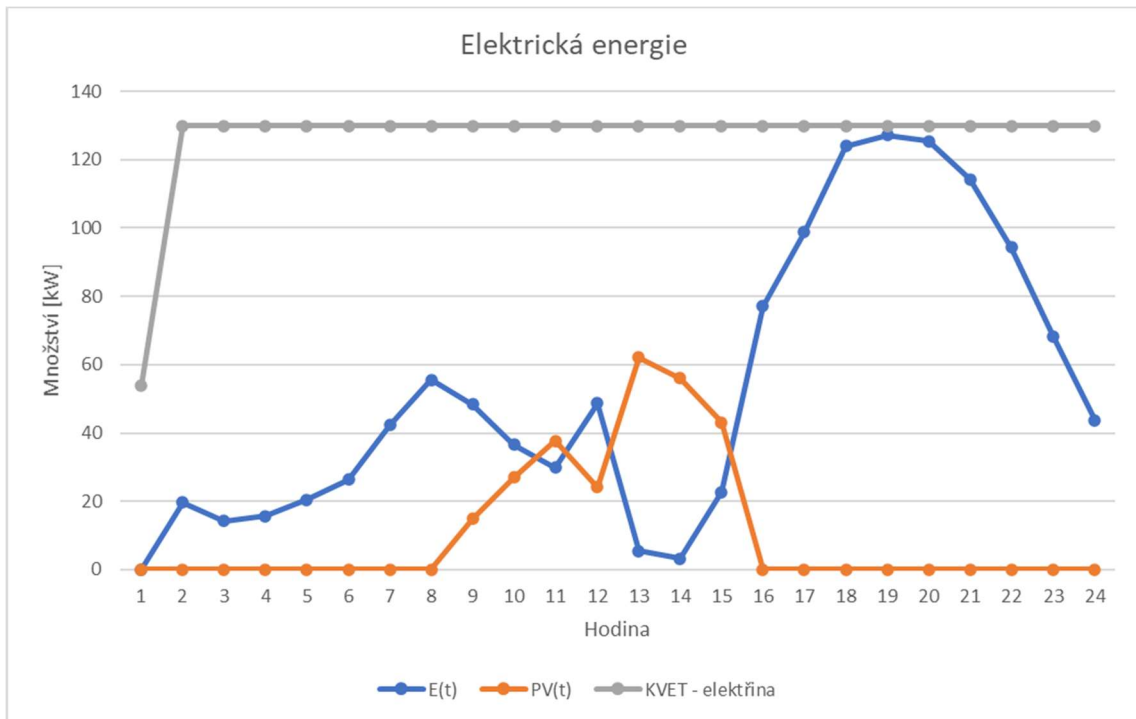
Space for names approximately 0.01 Mb
Use option 'names no' to turn use of names off
MIP status(102): integer optimal, tolerance
Cplex Time: 0.09sec (det. 26.14 ticks)
Fixing integer variables, and solving final LP...
Fixed MIP status(1): optimal
Cplex Time: 0.00sec (det. 0.34 ticks)
Solution satisfies tolerances.

MIP Solution:      18031.565251      (0 iterations, 0 nodes)
Final Solve:      18031.565251      (46 iterations)

```

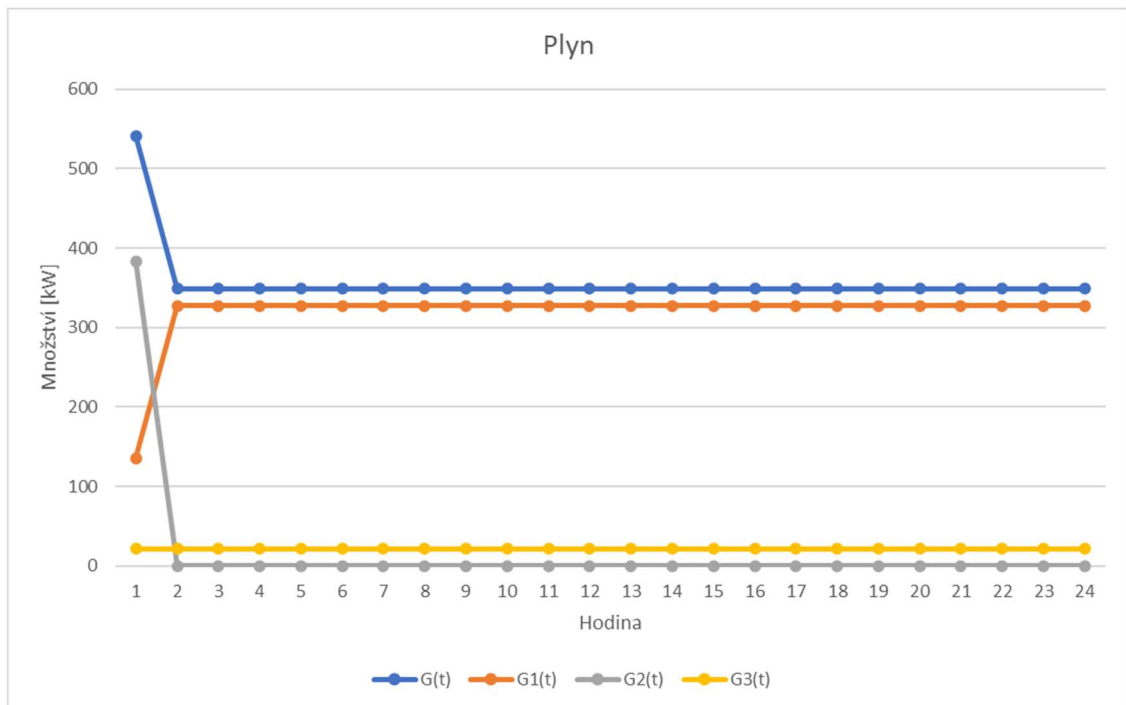
Obrázek 6.22: GAMS – report varianty 2

Hodnota objektivní funkce pro variantu 2 je **18 031,57 Kč**.



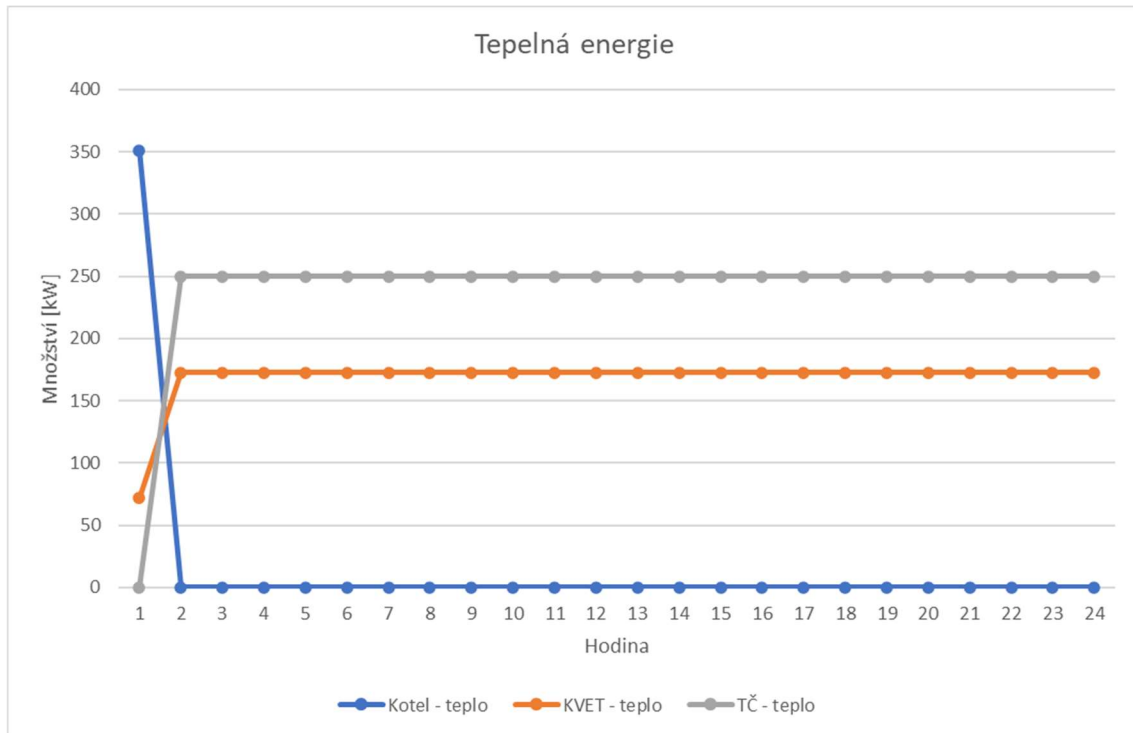
Graf 6.4: Elektrická energie – varianta 2

Graf č. 6.4 zobrazuje průběh odběru elektrické energie z distribuční sítě $E(t)$, dodaný výkon fotovoltaickými panely $PV(t)$ a výrobu elektrické energie kogenerační jednotkou.



Graf 6.5: Odběr plynu – varianta 2

Graf č. 6.5 ukazuje odebíraný plyn $G(t)$ a jeho rozložení mezi komponenty, které plyn spotřebovávají ($G1(t)$ - kogenerační jednotka, $G2(t)$ – plynový kotel) a odběr plynu uživateli k přímé spotřebě $G3(t)$.



Graf 6.6: Tepelná energie – varianta 2

Graf č. 6.6 ukazuje průběh výroby tepelné energie v EnergyHubu.

6.9.3.3. Varianta 3

Report z řešitele pro variantu 3:

S O L V E S U M M A R Y

MODEL	hub	OBJECTIVE	cost
TYPE	MIP	DIRECTION	MINIMIZE
SOLVER	CPLEX	FROM LINE	121

**** SOLVER STATUS 1 Normal Completion
 **** MODEL STATUS 1 Optimal
 **** OBJECTIVE VALUE 17708.9232

RESOURCE USAGE, LIMIT	0.031	1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT	107	200000000

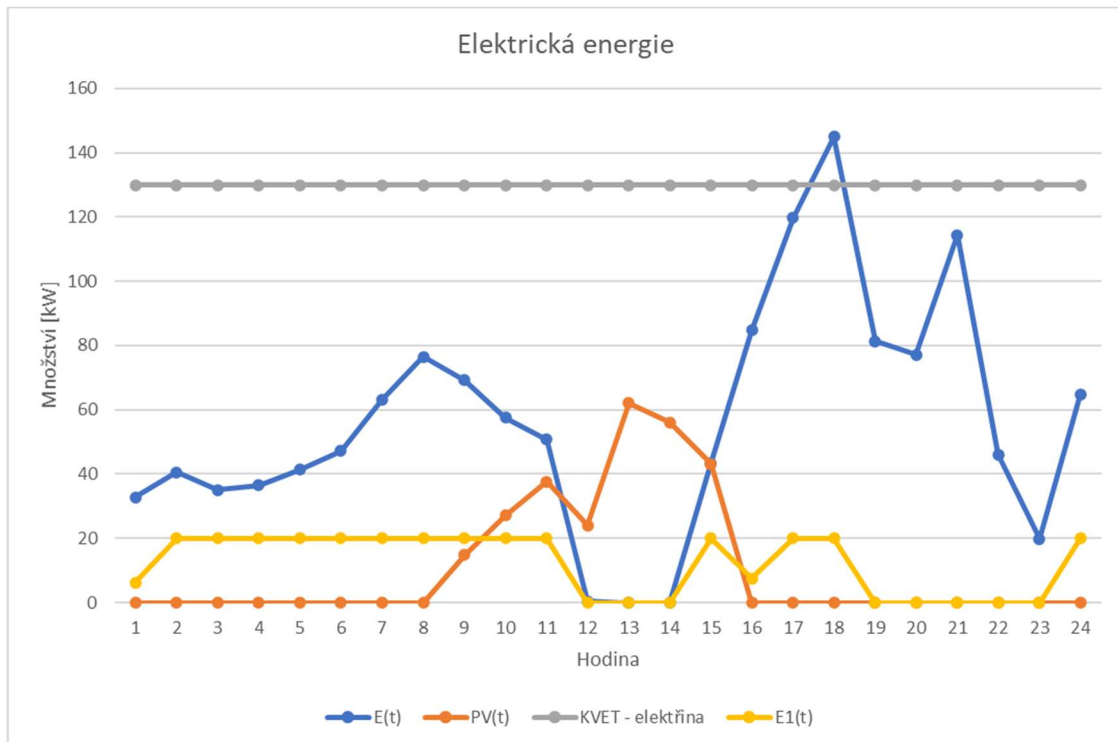
IBM ILOG CPLEX 30.3.0 rc5da09e Released Mar 06, 2020 WEI x86 64bit/MS Window
 *** This solver runs with a demo license. No commercial use.
 Cplex 12.10.0.0

Space for names approximately 0.01 Mb
 Use option 'names no' to turn use of names off
 MIP status(101): integer optimal solution
 Cplex Time: 0.01sec (det. 1.80 ticks)
 Fixing integer variables, and solving final LP...
 Fixed MIP status(1): optimal
 Cplex Time: 0.00sec (det. 0.51 ticks)
 Proven optimal solution.

MIP Solution:	17708.923223	(53 iterations, 0 nodes)
Final Solve:	17708.923223	(54 iterations)

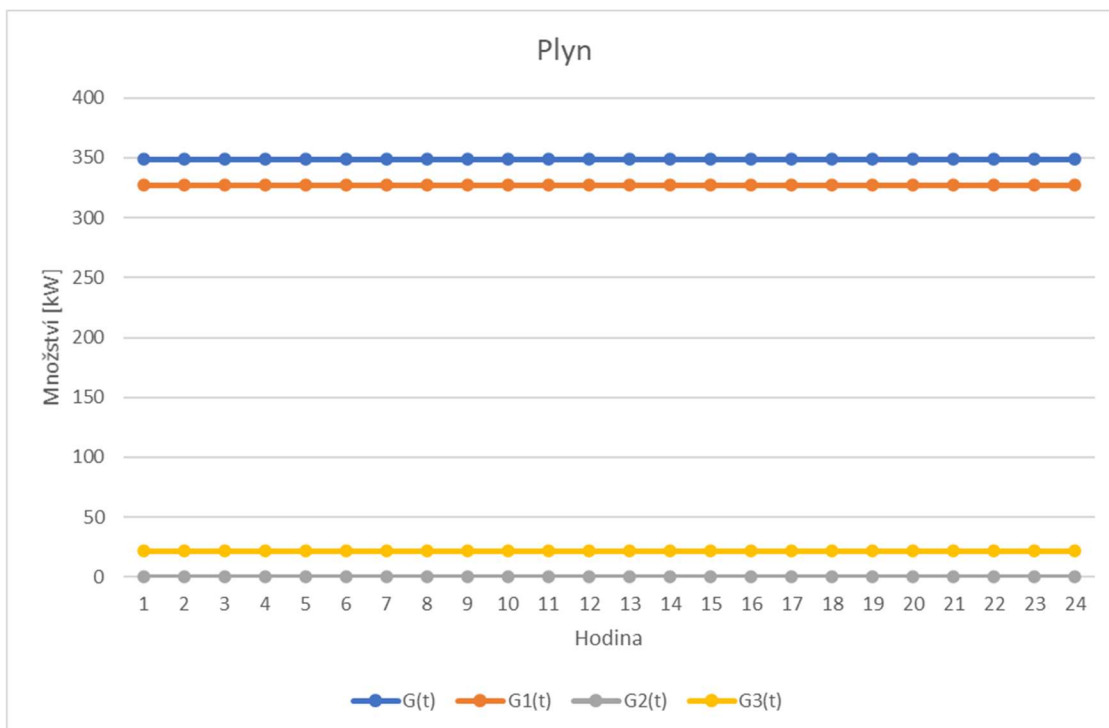
Obrázek 6.23: GAMS – report varianty 3

Hodnota objektivní funkce pro variantu 3 je **17 708,92 Kč**.



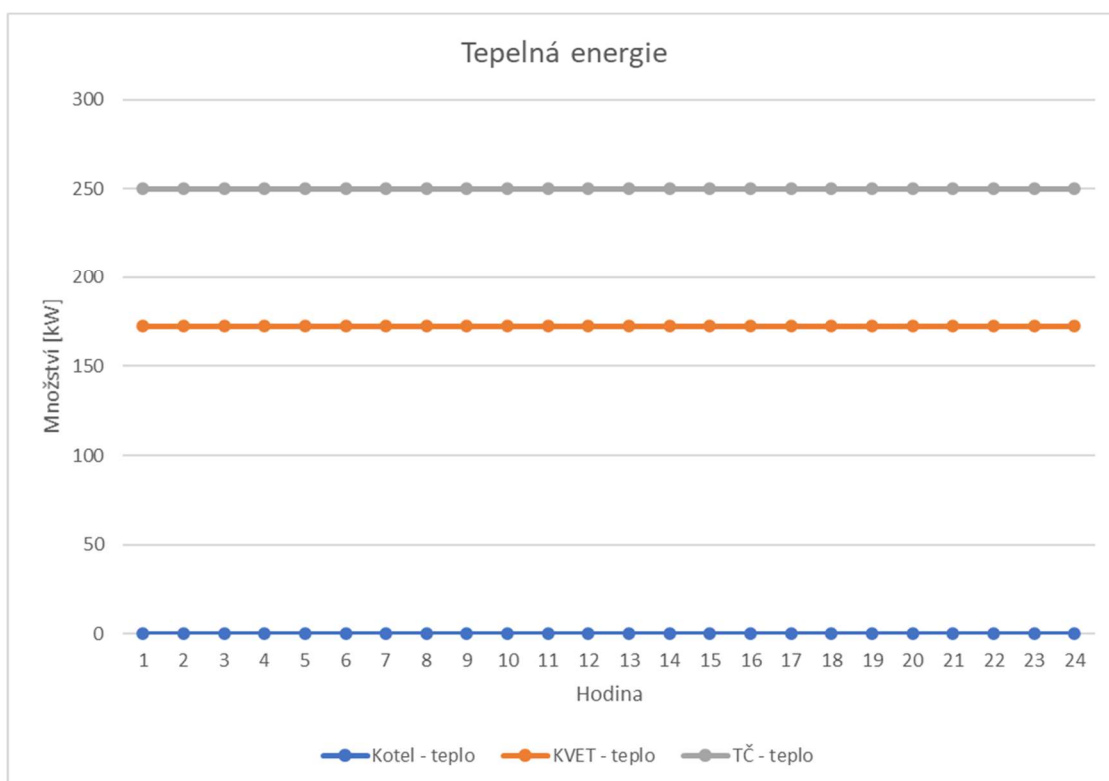
Graf 6.7: Elektrická energie – varianta 3

Graf č. 6.7 zobrazuje průběh odběru elektrické energie z distribuční sítě $E(t)$, dodaný výkon fotovoltaickými panely $PV(t)$, výrobu elektrické energie kogenerační jednotkou a elektrickou energií vstupující do bateriového úložiště $E1(t)$.



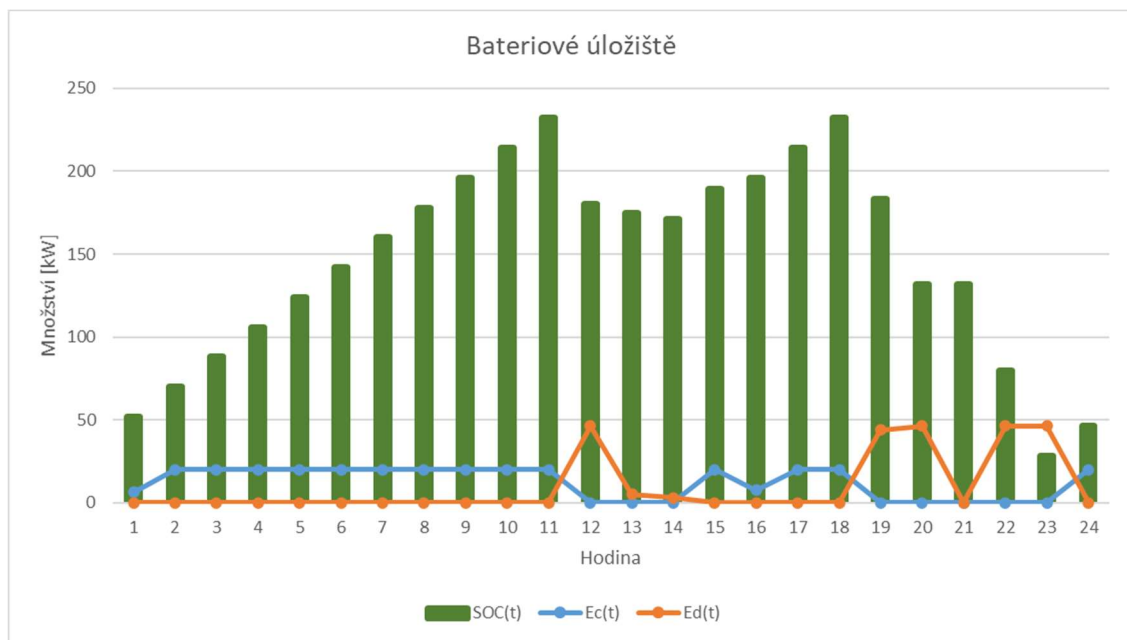
Graf 6.8: Odběr plynu – varianta 3

Graf č. 6.8 ukazuje odebíraný plyn $G(t)$ a jeho rozložení mezi komponenty, které plyn spotřebovávají ($G1(t)$ - kogenerační jednotka, $G2(t)$ – plynový kotel) a odběr plynu uživateli k přímé spotřebě $G3(t)$.



Graf 6.9: Tepelná energie - varianta 3

Graf č. 6.9 ukazuje průběh výroby tepelné energie v EnergyHubu.



Graf 6.10: Bateriové úložiště – varianta 3

Graf č. 6.10 ukazuje průběh nabíjení $E_c(t)$, vybíjení $E_d(t)$ a stav nabití bateriového úložiště $SOC(t)$.

6.9.3.4. Varianta 4

Report z řešitele pro variantu 4:

```

S O L V E      S U M M A R Y

MODEL  hub          OBJECTIVE cost
TYPE   MIP          DIRECTION MINIMIZE
SOLVER CPLEX       FROM LINE 120

**** SOLVER STATUS  1 Normal Completion
**** MODEL STATUS   1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE      17708.9232

RESOURCE USAGE, LIMIT      0.016   1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT    108   2000000000

IBM ILOG CPLEX 30.3.0 rc5da09e Released Mar 06, 2020 WEI x86 64bit/MS Window
*** This solver runs with a demo license. No commercial use.
Cplex 12.10.0.0

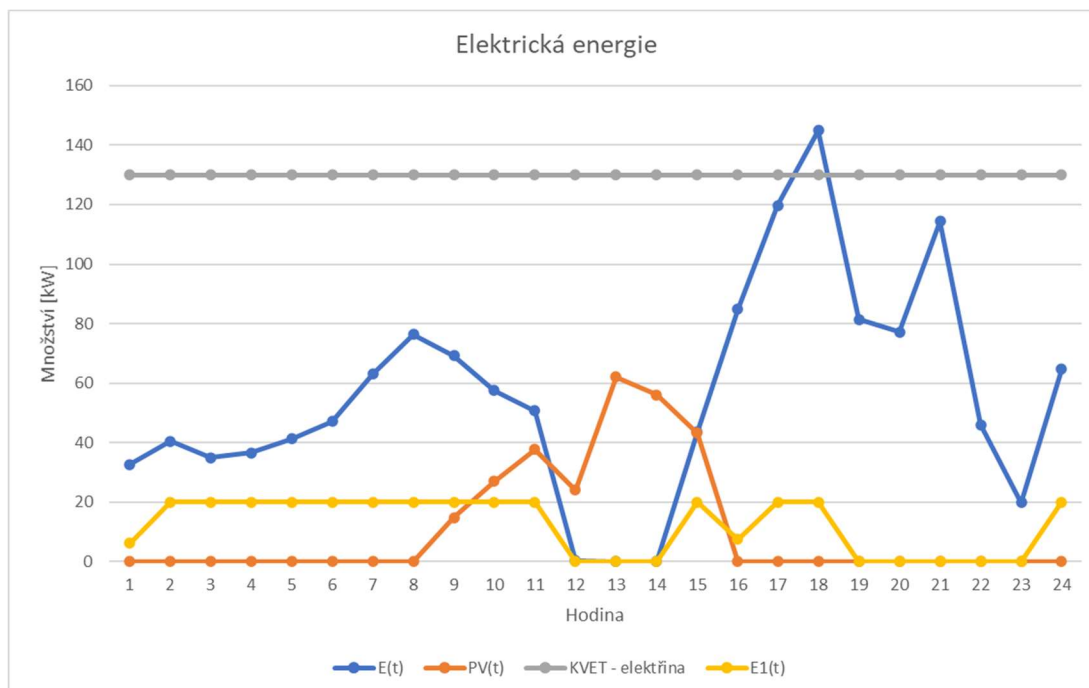
Space for names approximately 0.01 Mb
Use option 'names no' to turn use of names off
MIP status(101): integer optimal solution
Cplex Time: 0.02sec (det. 1.79 ticks)
Fixing integer variables, and solving final LP...
Fixed MIP status(1): optimal
Cplex Time: 0.00sec (det. 0.51 ticks)
Proven optimal solution.

MIP Solution:      17708.923223   (53 iterations, 0 nodes)
Final Solve:      17708.923223   (55 iterations)

Best possible:    17708.923223
Absolute gap:     0.000000
Relative gap:     0.000000
    
```

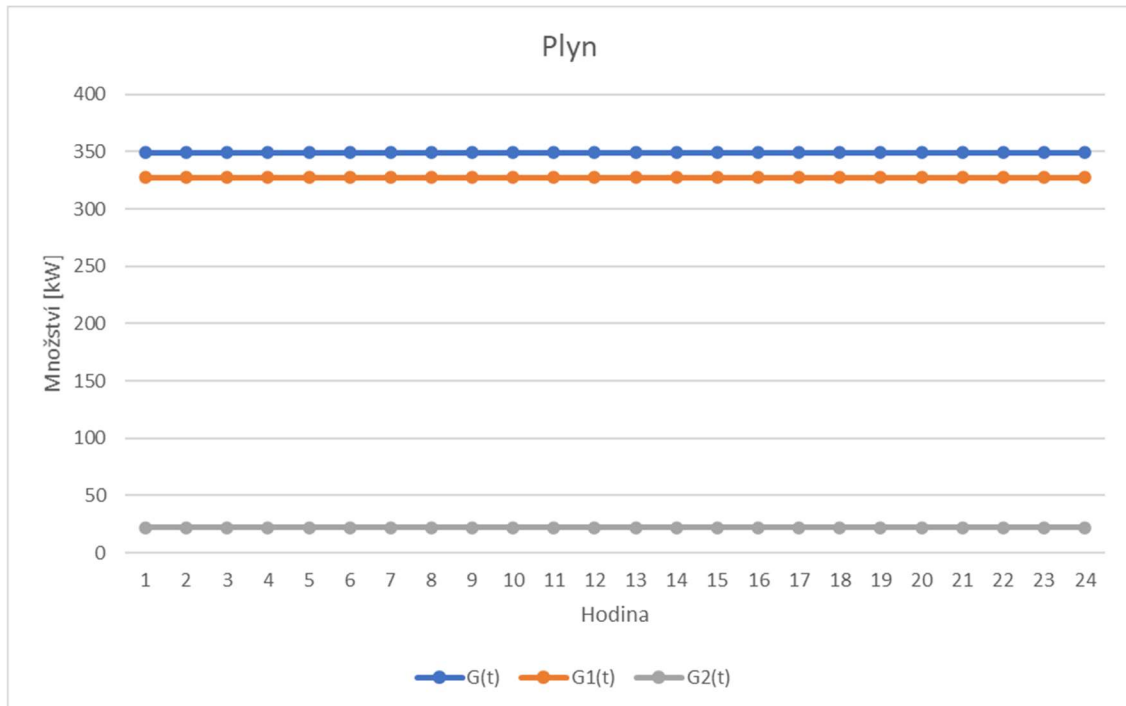
Obrázek 6.24: GAMS – report varianty 4

Hodnota objektivní funkce pro variantu 4 je **17 708,92 Kč**.



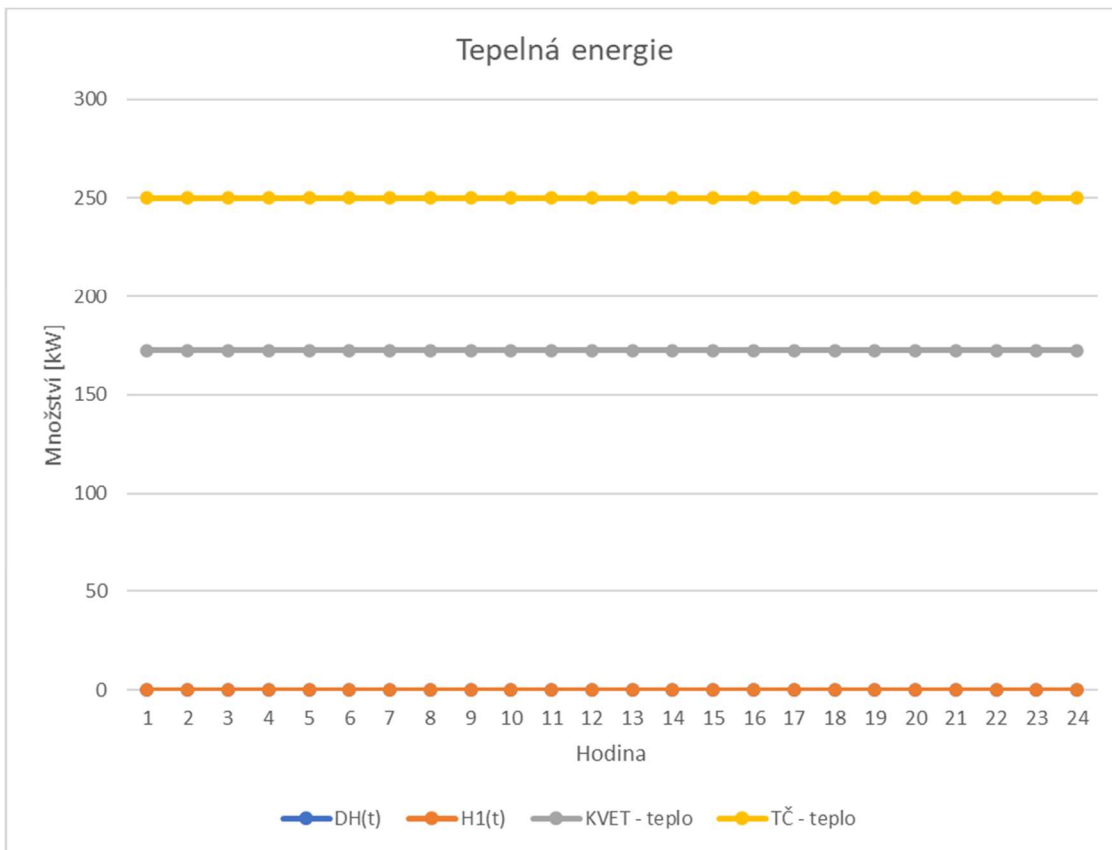
Graf 6.11: Elektrická energie – varianta 4

Graf č. 6.11 zobrazuje průběh odběru elektrické energie z distribuční sítě $E(t)$, dodaný výkon fotovoltaickými panely $PV(t)$, výrobu elektrické energie kogenerační jednotkou a elektrickou energii vstupující do bateriového úložiště $E1(t)$.



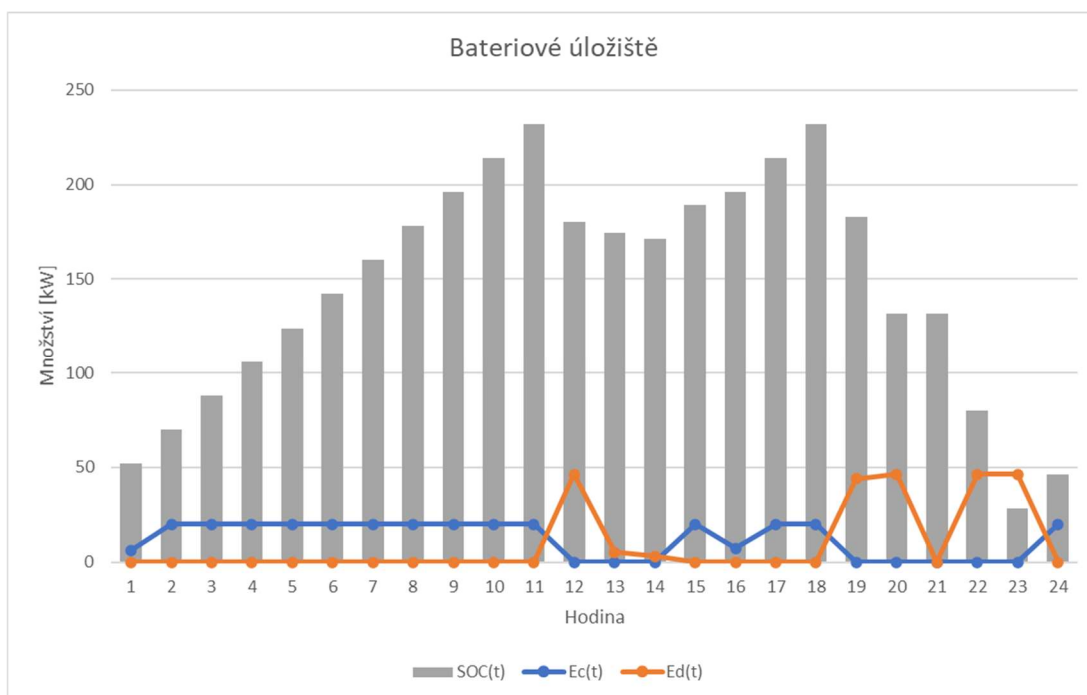
Graf 6.12: Odběr plynu – varianta 4

Graf č. 6.12 ukazuje odebíraný plyn $G(t)$ a jeho rozložení mezi komponenty, které plyn spotřebovávají ($G1(t)$ - kogenerační jednotka) a odběr plynu uživateli k přímé spotřebě $G2(t)$.



Graf 6.13: Tepelná energie – varianta 4

Graf č. 6.13 ukazuje průběh výroby tepelné energie komponenty EnergyHubu ($H1(t)$ – tepelný výměník, KVET a TČ) a odběru tepelné energie z distribuční sítě tepla $DH(t)$.



Graf 6.14: Bateriové úložiště – varianta 4

Graf č. 6.14 ukazuje průběh nabíjení $E_c(t)$, vybíjení $E_d(t)$ a stav nabití bateriového úložiště $SOC(t)$.

6.9.3.5. Varianta 5

Report z řešitele pro variantu 5:

```
GAMS 30.3.0 rc5da09e Released Mar 6, 2020 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows - 05/22/20 20:33:57 Page 5
General Algebraic Modeling System
Solution Report SOLVE hub Using MIP From line 123
```

```

      S O L V E      S U M M A R Y
MODEL  hub          OBJECTIVE cost
TYPE   MIP          DIRECTION MINIMIZE
SOLVER CPLEX       FROM LINE 123

**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS      1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE    17708.9232

RESOURCE USAGE, LIMIT      0.016      1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT    108      2000000000

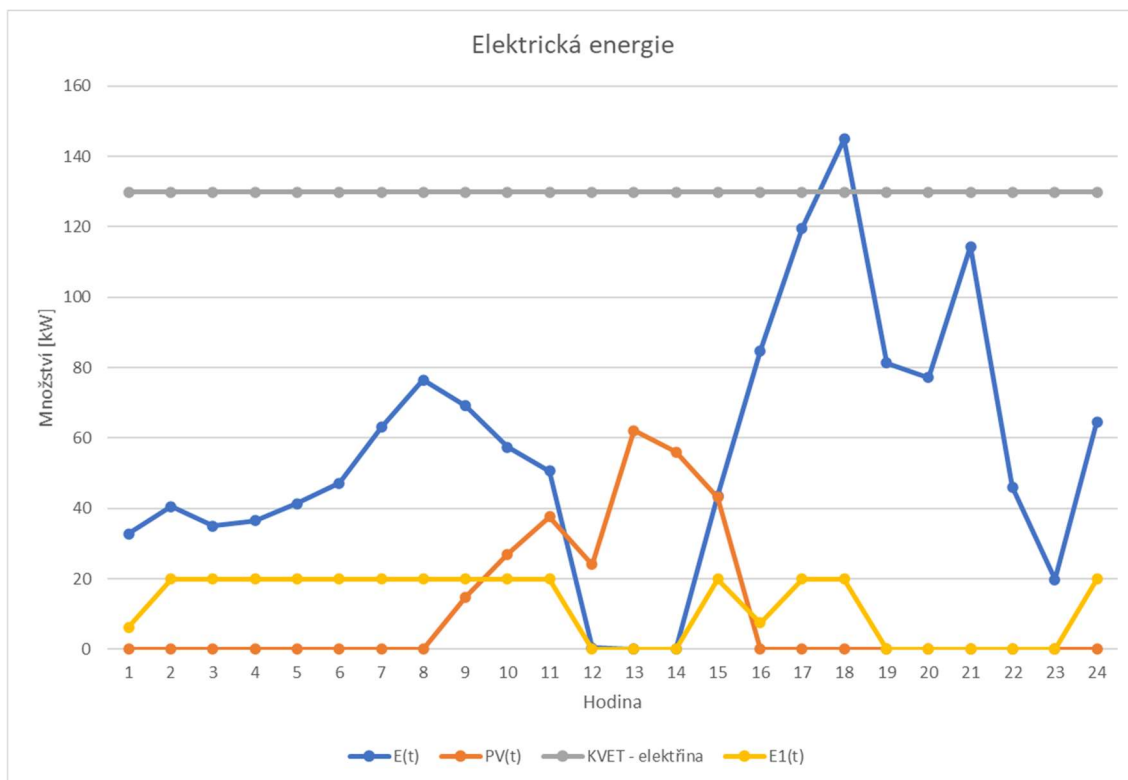
IBM ILOG CPLEX 30.3.0 rc5da09e Released Mar 06, 2020 WEI x86 64bit/MS Window
*** This solver runs with a demo license. No commercial use.
Cplex 12.10.0.0

Space for names approximately 0.01 Mb
Use option 'names no' to turn use of names off
MIP status(101): integer optimal solution
Cplex Time: 0.00sec (det. 1.89 ticks)
Fixing integer variables, and solving final LP...
Fixed MIP status(1): optimal
Cplex Time: 0.00sec (det. 0.56 ticks)
Proven optimal solution.

MIP Solution:      17708.923223      (53 iterations, 0 nodes)
Final Solve:      17708.923223      (55 iterations)
```

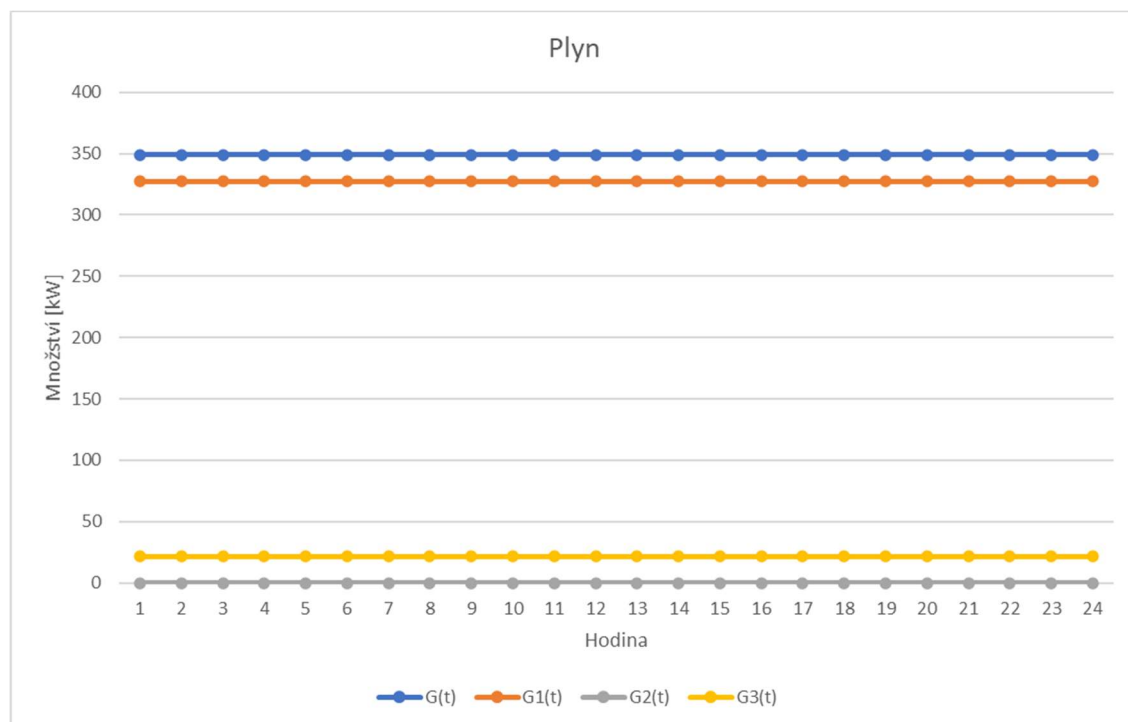
Obrázek 6.25: GAMS – report varianty 5

Hodnota objektivní funkce pro variantu 1 je **17 708,92 Kč**.



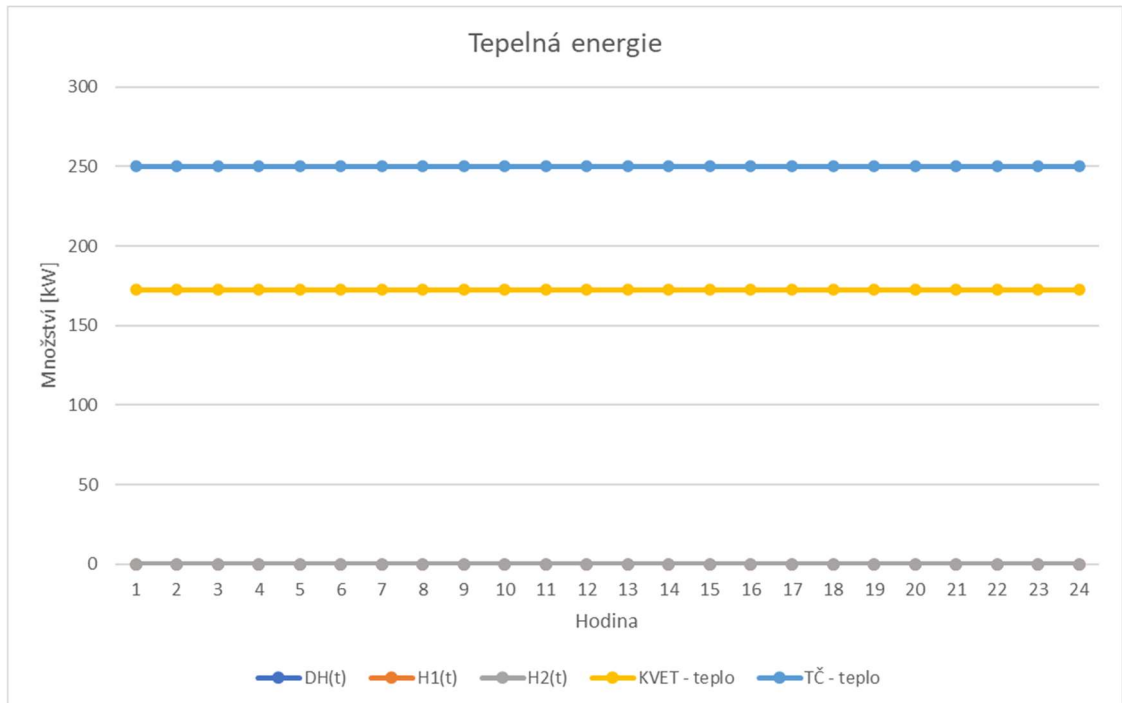
Graf 6.15: Elektrická energie – varianta 5

Graf č. 6.15 zobrazuje průběh odběru elektrické energie z distribuční sítě $E(t)$, dodaný výkon fotovoltaickými panely $PV(t)$, výrobu elektrické energie kogenerační jednotkou a elektrickou energii vstupující do bateriového úložiště $E1(t)$.



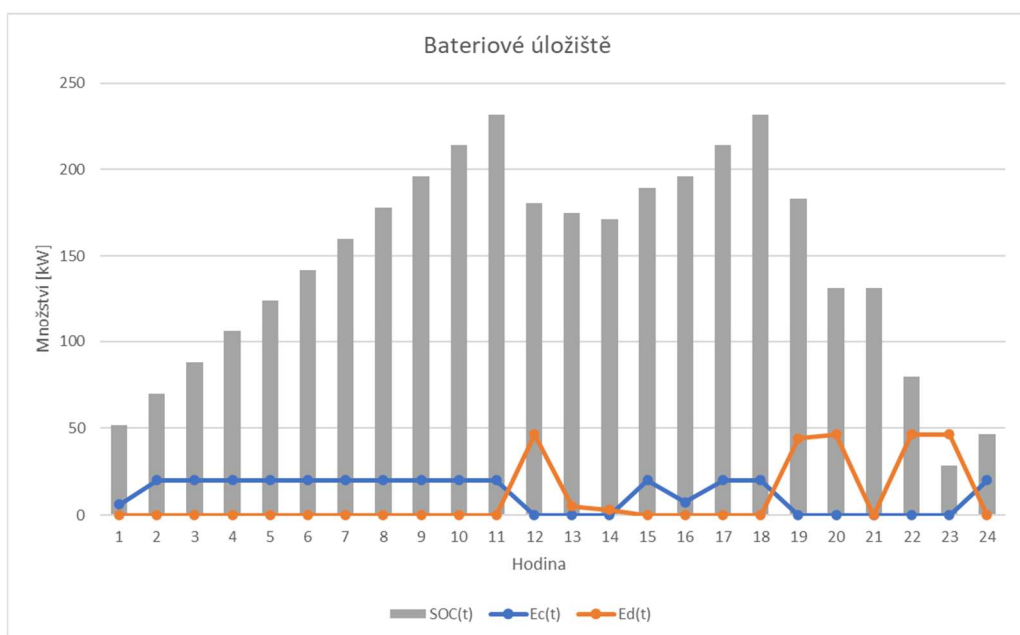
Graf 6.16: Odběr plynu – varianta 5

Graf č. 6.16 ukazuje odebíraný plyn a jeho rozložení mezi komponenty, které plyn spotřebovávají ($G1(t)$ - kogenerační jednotka, $G2(t)$ – plynový kotel) a odběr plynu uživateli k přímé spotřebě $G3(t)$.



Graf 6.17: Tepelná energie – varianta 5

Graf č. 6.17 ukazuje průběh výroby tepelné energie plynovým kotlem $H1(t)$, tepelným výměníkem $H2(t)$, kogenerační jednotkou, tepelným čerpadlem a odběr tepelné energie z distribuční sítě tepla $DH(t)$.



Graf 6.18: Bateriové úložiště – varianta 5

Graf č. 6.18 ukazuje průběh nabíjení $E_c(t)$, vybíjení $E_d(t)$ a stav nabití bateriového úložiště $SOC(t)$.

6.10. Vyhodnocení výsledků

Výsledky pro jednotlivé varianty EnergyHubů jsou shrnuty v Tabulka 6.18:

Varianta:	Hodnota objektivní funkce:
Varianta 1	18 683,95 Kč
Varianta 2	18 031,56 Kč
Varianta 3	17 708,92 Kč
Varianta 4	17 708,92 Kč
Varianta 5	17 708,92 Kč

Tabulka 6.18: Shrnutí denních nákladů na energii jednotlivých variant

Z výsledků můžeme pozorovat, že využitím fotovoltaického systému a bateriového úložiště došlo ke snížení denních nákladů na energii EnergyHubu.

Zavedení modelu EnergyHubu může přinést reálné úspory nákladech na energii oproti stávajícímu stavu. Denní náklady na energii stávajícího stavu činí **34 233,57 Kč**, nejúspornější varianty modelu EnergyHubu ukazují, že by denní náklady na energii mohli klesnout až na **17 708,92 Kč**. Tedy možná úspora je **16 524,65 Kč**.

Varianty 3, 4, 5 mají shodné denní náklady na energii z důvodu toho, že poptávka po tepelné energii je pokryta hlavně výrobou tepla z tepelného čerpadla. Topný faktor tepelného čerpadla, i při takto nízkých teplotách, poskytuje dostatečný výkon a tím i ekonomickou výhodu pro využití tepelného čerpadla jak v EnergyHubech, tak pro běžné vytápění a přípravu TUV v rodinných domech.

Tepelné čerpadlo v rámci celého dne funguje na maximální výkon a zbylá tepelná energie je vyrobena kogenerační jednotkou. Z toho je patrné, že výroba tepla spalováním plynu v plynovém kotli nebo využití dálkového tepla pro uspokojení poptávky po tepelné energii není z ekonomického hlediska oproti využití tepelných čerpadel pro pokrytí této poptávky lukrativní.

Jelikož je tepelné čerpadlo velmi komplexní zařízení, které může být náchylné na poruchy, bylo by velmi praktické zanechat v EnergyHubu i záložní zdroj tepelné energie, a to buď ve formě plynového kotle nebo tepelného výměníku napojeného na distribuční síť tepla.

Kompletní report výpočtu objektivní funkce pro nejkompexnější variantu 5 je přiložen v příloze této diplomové práce.

Při zkoumání výsledků také musíme brát v potaz, že tyto varianty jsou spočteny pro nejnepříznivější den v roce. V případě zkoumání jiných dnů (například letních) by byly výsledky jiné. Nejsou také zahrnuty další možné náklady spojené s provozem EnergyHubu, do výpočtů vstupují čistě náklady na energie. Nejobektivnějších výsledků by se dosáhlo v případě modelace fungování variant EnergyHubu po celý rok, zahrnutím a porovnáním dalších nákladů spojených s provozem EnergyHubu. To už ovšem není v této diplomové práci kvůli rozsahu zahrnuto.

7. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo nalezení optimální varianty EnergyHubu pro zadanou konkrétní oblast.

Tohoto cíle bylo dosaženo skrze studium současného stavu spotřeby energií, dostupných technických řešení snižování spotřeb těchto energií za pomoci využití a zapojení decentralizovaných energetických zdrojů, proměny distribučních sítí energií, integrovaných komunitních energetických systémů a hlavně EnergyHubů – energetických center.

EnergyHub byl zkoumán z pohledu matematického modelu a jeho optimálního fungování. Tohoto dílčího cíle bylo dosaženo pomocí software GAMS, který umožňuje sestavovat, analyzovat a řešit komplexní matematické modely.

Z dostupných výsledků je zřejmý potenciál EnergyHubů pro snižování spotřeb energií a nákladů na energie. Výsledky ze zkoumané oblasti ukazují ekonomickou úsporu 51,7 %.

Výsledky také ukazují hlavní přednosti tepelných čerpadel a kogeneračních jednotek. Jejich velké účinnosti a dostupný výkon skýtají velký potenciál pro jejich rozvoj.

Bibliografie

- [1] MOHAMMADI, Mohammad, Younes NOOROLLAHI, Behnam MOHAMMADI-IVATLOO a Hossein YOUSEFI. Energy hub: From a model to a concept – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2017, **80**, 1512-1527 [cit. 2020-04-24]. DOI: 10.1016/j.rser.2017.07.030. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117310985>
- [2] SOVACOOOL, Benjamin a Marilyn BROWN. Competing Dimensions of Energy Security: An International Perspective. *Annual Review of Environment and Resources* [online]. 2010, **35**(1), 77-108 [cit. 2020-05-24]. DOI: 10.1146/annurev-environ-042509-143035. ISSN 1543-5938. Dostupné z: <http://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-environ-042509-143035>
- [3] Dálkové vytápění. *Dálkové vytápění - ekologické teplo bez starostí* [online]. [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <http://www.naseteplo.cz/>
- [4] *Final energy consumption by sector and fuel in Europe: Is final energy consumption decreasing in Europe?* [online]. 2020 [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/final-energy-consumption-by-sector-10/assessment>
- [5] *Požadavky na energetickou náročnost budov se stavebním povolením od 1. 1. 2020* [online]. In: . 2019 [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/energeticka-ucinnost/2019/11/NZEB-pozadavky-web-MPO.pdf>
- [6] Energie v domácnosti aneb jak ušetřit peněženku i životní prostředí. *CENIA, česká informační agentura životního prostředí* [online]. [cit. 2020-04-30]. Dostupné z: [http://zelenenakupovani.cz/web/www/zaloha/cenia-akt-tema.nsf/\\$pid/MZPMSFUZVGGA](http://zelenenakupovani.cz/web/www/zaloha/cenia-akt-tema.nsf/$pid/MZPMSFUZVGGA)
- [7] Ochrana klimatu a energetika. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. [cit. 2020-04-30]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/ochrana_klimatu_energetika
- [8] Klimaticko-energetický balíček do roku 2020. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. [cit. 2020-04-30]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/klimaticko_energeticky_balicek_2020
- [9] 2030 climate & energy framework. *European Commission* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en
- [1] 2050 long-term strategy. *European Commission* [online]. [cit. 2020-05-23].
- 0] Dostupné z: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en

- [1] *Energie nadosah: bezpečnostní, sociální a ekonomické výzvy decentralizované energetiky*. Praha: Zelený kruh, 2008. APEL. ISBN 978-80-903968-3-8.
- [1] VASTL, Jiří. *Využití smart meteringu v systému zúčtování elektrické energie I.*
 [2] [online]. 2008 [cit. 2020-05-2]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/17415-vyuziti-smart-meteringu-v-systemu-zuctovani-elektricke-energie-i>
- [1] Slovník pojmů. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2020-05-2]. Dostupné z:
 [3] <https://www.cez.cz/cs/caste-dotazy/slovník-pojmu.html#T>
- [1] *Vyhláška č. 408/2015 Sb.: Vyhláška o Pravidlech trhu s elektřinou*. In: . 2015, ročník
 [4] 2015, číslo 408. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2015-408/zneni-20160101>
- [1] *Spotřeba paliv a energií v domácnostech* [online]. 2016 [cit. 2020-05-4]. Dostupné
 [5] z: <https://www.czso.cz/csu/czso/spotreba-paliv-a-energie-v-domacnostech#>
- [1] CHYTRA, Martin. *Analýza rozdílů mezi modelovanou spotřebou elektřiny a její
 [6] reálnou hodnotou* [online]. Praha, 2019 [cit. 2020-05-4]. Dostupné z:
https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/82541/F3-DP-2019-Chytra-Martin-Analyza_rozdilu_mezi_modelovanou_spotrebou_elektriny_a_jeji_skutecnou_hodnotou.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Petr Kusý.
- [1] Přenosová a distribuční soustava - 1. část: Vedení velmi vysokého napětí (VVN).
 [7] *Provozujeme distribuční síť elektřiny a plynu | E.ON Distribuce* [online]. [cit. 2020-05-5]. Dostupné z: <https://www.eon-distribuce.cz/clanek/prenosova-distribucni-soustava-1-cast>
- [1] NUNO, Silva. TRACING THE TRANSITION FROM PASSIVE TO ACTIVE DISTRIBUTION
 [8] NETWORKS. *INNOVATIVE CONTROLS FOR RENEWABLE SOURCE INTEGRATION INTO SMART ENERGY SYSTEMS* [online]. [cit. 2020-05-5]. Dostupné z: <http://www.incite-itn.eu/blog/tracing-the-transition-from-passive-to-active-distribution-networks/>
- [1] BUDÍN, Jan. Stav přenosové soustavy v Německu ohrožuje ČR. *OEnergetice.cz -
 [9] denní zpravodajství z energetiky* [online]. [cit. 2020-05-6]. Dostupné z:
<https://oenergetice.cz/elektrina/nedostatecne-prenosove-kapacity-v-nemecku>
- [2] Nové české PST transformátory regulují toky elektrické energie z Německa. *ČEPS,
 [0] a.s.* [online]. [cit. 2020-05-6]. Dostupné z:
<https://www.ceps.cz/cs/aktuality/novinka/nove-ceske-pst-transformatory-reguluji-toky-elektricke-energie-z-nemecka>
- [2] *Heating network guideline for municipalities* [online]. [cit. 2020-05-7]. Dostupné z:
 [1] https://northsearegion.eu/media/7117/energielandschap-toolkitwarmtenetten-a4lig-bw-cc18_en_web-2.pdf

- [2] HIDALGO, Rodrigo, Chad ABBEY a Géza JOÓS. A review of active distribution networks enabling technologies. In: *IEEE PES General Meeting* [online]. IEEE, 2010, s. 1-9 [cit. 2020-05-24]. DOI: 10.1109/PES.2010.5590051. ISBN 978-1-4244-6549-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5590051/>
- [2] Úspěšnost předpovědí počasí pro Českou republiku od roku 1973. *Portál ČHMÚ : Home* [online]. [cit. 2020-05-6]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/predpovedi/predpovedi-pocasi/ceska-republika/uspesnost-predpovedi-pocasi/rocní>
- [2] Měření a regulace. *TZB-info - Stavebnictví. Úspory energií. Technická zařízení budov.* [online]. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/mereni-a-regulace>
- [2] *Danfoss District Heating Controls* [online]. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://www.mandmcontrols.co.uk/Danfoss+District+Heating+Controls--52>
- [2] GARLÍK, Bohumír. *Od chytrých sítí po chytré budovy, města a dopravu v prostředí umělé inteligence*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2020. ISBN 978-80-01-06624-9.
- [2] CAMPILLO, Javier. *From Passive to Active Electric Distribution Networks* [online]. Västerås, 2016 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:928460/FULLTEXT02>. Disertační práce. Mälardalen University. Vedoucí práce Erik Dahlquist.
- [2] Přenosová a distribuční soustava - 2. část: Transformovny. *Provozujeme distribuční síť elektřiny a plynu | E.ON Distribuce* [online]. [cit. 2020-05-7]. Dostupné z: <https://www.eon-distribuce.cz/clanek/prenosova-distribucni-soustava-2-cast>
- [2] Přenosová a distribuční soustava - 4. část: Vedení vysokého (VN) a nízkého napětí (NN). *Provozujeme distribuční síť elektřiny a plynu | E.ON Distribuce* [online]. [cit. 2020-05-7]. Dostupné z: <https://www.eon-distribuce.cz/clanek/prenosova-distribucni-soustava-4-cast>
- [2] Přenosová a distribuční soustava - 5. část: Transformační a spínací stanice, vedení nízkého napětí (NN). *Provozujeme distribuční síť elektřiny a plynu | E.ON Distribuce* [online]. [cit. 2020-05-7]. Dostupné z: <https://www.eon-distribuce.cz/clanek/prenosova-distribucni-soustava-5-cast>
- [3] *Intelligentní distribuční trafostanice pro budoucí bezpečnou distribuci energie* [online]. 2013 [cit. 2020-05-8]. Dostupné z: <https://www.siemens.cz/smartcities/download.php?fid=826>
- [3] VEZZOLI, Carlo, Fabrizio CESCHIN, Lilac OSANJO, Mugendi M'RITHAA, Richie MOALOSI, Venny NAKAZIBWE a Jan DIEHL. Distributed/Decentralised Renewable Energy Systems. VEZZOLI, Carlo, Fabrizio CESCHIN, Lilac OSANJO, Mugendi M'RITHAA, Richie MOALOSI, Venny NAKAZIBWE a Jan DIEHL. *Designing Sustainable Energy for All* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2018, s. 23-39 [cit. 2020-05-24]. Green Energy and Technology. DOI: 10.1007/978-3-319-70223-0_2.

ISBN 978-3-319-70222-3. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-70222-3>

- [3 LALLANILLA, Marc. *What is a Smart Grid?* [online]. 2013 [cit. 2020-05-8]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/41920-smart-grid.html>
- [3 HOLASOVÁ, Adéla. *EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ MODELU KONCEPTU SMART GRIDS* [online]. Praha, 2014 [cit. 2020-05-8]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/23736/F3-DP-2014-Holasova-Adela-prace.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Jiří Beranovský.
- [3 ELGENEDY, M., A. MASSOUD a S. AHMED. Smart grid self-healing: Functions, applications, and developments. In: *2015 First Workshop on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE)* [online]. IEEE, 2015, s. 1-6 [cit. 2020-05-24]. DOI: 10.1109/SGRE.2015.7208737. ISBN 978-1-4673-6765-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7208737/>
- [3 KOIRALA, Binod, José CHAVES ÁVILA, Tomás GÓMEZ, Rudi HAKVOORT a Paulien HERDER. Local Alternative for Energy Supply: Performance Assessment of Integrated Community Energy Systems. *Energies* [online]. 2016, 9(12) [cit. 2020-05-24]. DOI: 10.3390/en9120981. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1073/9/12/981>
- [3 Rodinné domy – zdroje energie. *Nová zelená úsporám – Dotace pro úsporné bydlení* [online]. [cit. 2020-05-8]. Dostupné z: <https://www.novazelenausporam.cz/nabidka-dotaci/rodinne-domy-zdroje-energie/>
- [3 KOIRALA, Binod Prasad. *Integrated Community Energy Systems* [online]. Delft, 2017 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: https://research.utwente.nl/files/19839834/ICES_Koirala_final.pdf. Disertační práce. Delft University of Technology. Vedoucí práce P.M. Herder.
- [3 BAYOD-RÚJULA, Angel, Yue YUAN, Amaya MARTÍNEZ-GRACIA, Jiangyu WANG, Javier UCHE a Huanxin CHEN. Modelling and Simulation of a Building Energy Hub. *Proceedings* [online]. 2018, 2(23) [cit. 2020-05-24]. DOI: 10.3390/proceedings2231431. ISSN 2504-3900. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2504-3900/2/23/1431>
- [4 HA, Thanh, Yongjun ZHANG, Jinbao HAO, V. THANG, Canbing LI a Zexiang CAI. Energy Hub's Structural and Operational Optimization for Minimal Energy Usage Costs in Energy Systems. *Energies* [online]. 2018, 11(4) [cit. 2020-05-24]. DOI: 10.3390/en11040707. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1073/11/4/707>
- [4 THANH-TUNG HA, , YONG-JUN ZHANG, JIAN-ANG HUANG a V. THANG. Energy Hub modeling for minimal energy usage cost in residential areas. In: *2016 IEEE International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)* [online]. IEEE,

- 2016, s. 659-663 [cit. 2020-05-24]. DOI: 10.1109/ICPRE.2016.7871161. ISBN 978-1-5090-3068-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7871161/>
- [4 THANG, V., Yongjun ZHANG, Thanhtung HA a Siliang LIU. Optimal operation of
2] energy hub in competitive electricity market considering uncertainties. *International Journal of Energy and Environmental Engineering* [online]. 2018, **9**(3), 351-362 [cit. 2020-05-24]. DOI: 10.1007/s40095-018-0274-8. ISSN 2008-9163. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s40095-018-0274-8>
- [4 SOROUDI, Alireza. *Power System Optimization Modeling in GAMS*. První vydání.
3] Cham: Springer International Publishing, 2017. ISBN 978-3-319-62349-8.
- [4 HA, Thanh-tung, Yong-jun ZHANG, Jin-bao HAO a T PHAM. Optimal operation of
4] energy hub with different structures for minimal energy usage cost. In: *2017 2nd International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)* [online]. IEEE, 2017, s. 31-36 [cit. 2020-05-24]. DOI: 10.1109/ICPRE.2017.8390495. ISBN 978-1-5386-2156-1. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8390495/>
- [4 HA, Thanhtung, Yongjun ZHANG, V. THANG a Jianang HUANG. Energy hub modeling
5] to minimize residential energy costs considering solar energy and BESS. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* [online]. 2017, **5**(3), 389-399 [cit. 2020-05-24]. DOI: 10.1007/s40565-017-0281-4. ISSN 2196-5625. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s40565-017-0281-4>
- [4 An Introduction to GAMS. *GAMS - Cutting Edge Modeling* [online]. [cit. 2020-05-18].
6] Dostupné z: <https://www.gams.com/products/introduction/>
- [4 ABDI, Hamdi, Behnam MOHAMMADI-IVATLOO, Saeid JAVADI, Amir KHODAEI a
7] Ehsan DEHNAVI. Energy Storage Systems. *Distributed Generation Systems* [online]. Elsevier, 2017, s. 333-368 [cit. 2020-05-24]. DOI: 10.1016/B978-0-12-804208-3.00007-8. ISBN 9780128042083. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128042083000078>
- [4 MAJLING, Eduard. Transformátor - základní vlastnosti a dělení. *OEnergetice.cz -
8] denní zpravodajství z energetiky* [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/transformator-zakladni-vlastnosti-a-deleni>
- [4 Jak funguje kogenerační jednotka. *ČEZ Energo* [online]. [cit. 2020-05-16]. Dostupné
9] z: <http://www.cezenergo.cz/cs/o-kogeneraci/jak-funguje-kogenerace.html>
- [5 12. PLYNOVÉ KOTLE PRO VYTÁPĚNÍ. *TZB pro FBI* [online]. [cit. 2020-05-20].
0] Dostupné z: http://fast10.vsb.cz/tzb_FBI/12.html
- [5 KÁZMEROVÁ, Kristína. *Sorpční chladicí zařízení a tepelná čerpadla* [online]. [cit.
1] 2020-05-19]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/klimatizace-a-chlazení/7712-sorpcni-chladici-zarizeni>

- [5 BUDÍN, Jan. Tepelná čerpadla - princip funkce a rozdělení. *OEnergetice.cz - denní zpravodajství z energetiky* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/teplarenstvi/tepelna-cerpadla>
- [5 EVINS, Ralph, Kristina OREHOUNIG, Viktor DORER a Jan CARMELIET. New formulations of the 'energy hub' model to address operational constraints. *Energy* [online]. 2014, **73**, 387-398 [cit. 2020-05-24]. DOI: 10.1016/j.energy.2014.06.029. ISSN 03605442. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544214007270>
- [5 *Příručka typologií obytných budov: s příklady opatření ke snížení jejich energetické náročnosti* [online]. 2011 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: https://episcopo.eu/fileadmin/tabula/public/docs/brochure_until2012/CZ_TABULA_TypologyBrochure_STU-K_2011.pdf
- [5 ISKAKOVA, Tamiris. *MODELOVÁNÍ A HODNOCENÍ ÚZEMNÍCH MĚSTSKÝCH JEDNOTEK* [online]. Praha, 2019 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/84254/F1-DP-2019-Iskakova-Tamiris-DP.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Bohumír Garlík.
- [5 JŮZA, Pavel. KTERÝ JE NEJCHLADNĚJŠÍ DEN V ROCE V PRAZE-KLEMENTINU?. *INFOMET | Informační web ČHMÚ | Český hydrometeorologický ústav | meteorologie, klimatologie, hydrologie, čistota ovzduší, předpověď počasí* [online]. [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: <http://www.infomet.cz/index.php?id=read&idd=1363713641>
- [5 3. Domácnosti: 3.1 Vývoj počtu a struktury domácností. *Český statistický úřad | ČSÚ* [online]. [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/czso/13-2135-03-3_1_vyvoj_poctu_a_struktury_domacnosti
- [5 *Výpočet zásobníku TV, Výpočet tepelného výkonu pro vytápění, Výpočet roční potřeby tepla* [online]. [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: http://tzb.fsv.cvut.cz/vyucujici/91/6_vytapeni_ohrev_tv/6a_pripravatv_potreba_tepla
- [5 VARGA, Martin. *Problematika stanovení Uem u vícezónových budov* [online]. [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: <https://deksoft.eu/technicke-forum/pdf?id=60>
- [6 Jak odhadnout spotřebu plynu v domácnosti. *Dodavatelektriny.cz - O energiích jasně a srozumitelně | Přehled dodavatelů elektrické energie a zemního plynu* [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://dodavatelektriny.cz/uzitecne-informace/jak-odhadnout-spotrebu-plynu>
- [6 *Statistika: Normalizované TDD* [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/typove-diagramy-dodavek-elektriny/normalizovane-tdd?date=2015-01-15>

- [6] Ceny elektrické energie platné od 1.1.2015 do 31.12.2015. *TZB-info - Stavebnictví*.
 2] *Úspory energií. Technická zařízení budov*. [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/13890-ceny-elektricke-energie-platne-od-1-1-2015-do-31-12-2015>
- [6] *Platnost HDO* [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z:
 3] <https://www.predistribuce.cz/cs/potrebuji-zaridit/zakaznici/stav-hdo/>
- [6] *Prodejní ceny zemního plynu Pražské plynárenské, a. s., platné od 1. ledna 2015 pro*
 4] *zákazníky kategorie Maloodběratel a Domácnost* [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: https://www.ppas.cz/sites/default/files/pdf/ceniky/plyn/2015/ppd/Cenik_PP_01_01_2015_MODOM_PPD.pdf
- [6] HODBOŇ, Josef. Ceny tepelné energie pro konečné spotřebitele ve vztahu k palivům
 5] a lokalitám. *TZB-info - Stavebnictví. Úspory energií. Technická zařízení budov*. [online]. 2017 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/ceny-paliv-a-energie/15366-ceny-tepelne-energie-pro-konecne-spotrebitele-ve-vztahu-k-palivum-a-lokalitam>
- [6] Co je GJ a MW (kW)?. *Severočeská teplárenská, a.s* [online]. [cit. 2020-05-20].
 6] Dostupné z: [https://setep.cz/co-je-gj-a-mw-\(kw\)](https://setep.cz/co-je-gj-a-mw-(kw))
- [6] *Výměníky tepla* [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z:
 7] http://users.fs.cvut.cz/tomas.matuska/wordpress/wp-content/uploads/2019/03/AZE2_P4_vymenik.pdf
- [6] *Fotovoltaika* [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: [https://oze.tzb-](https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika)
 8] [info.cz/fotovoltaika](https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika)
- [6] *PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM* [online]. [cit. 2020-05-20].
 9] Dostupné z: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP
- [7] POWERPACK: Utility and Business Energy Storage. *Electric Cars, Solar Panels &*
 0] *Clean Energy Storage | Tesla* [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.tesla.com/powerpack>
- [7] CHP UNITS. *TEDOM - Cogeneration, Trigeneration, Gas Heat Pump* [online]. [cit. 1]
 1] 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.tedom.com/wp-content/uploads/2020/05/TEDOM-CHP-Units-50-Hz-05-2020-1.pdf>
- [7] G700. *Viadrus - kotle pro domácnosti a průmysl* [online]. [cit. 2020-05-24].
 2] Dostupné z: https://www.viadrus.cz/doc/cms_library/cz_g700_120802-27.pdf
- [7] Princip tepelných výměníků. *Deskové výměníky tepla SWEP [Pájené, rozebíratelné*
 3] *]* [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.vymeniky-tepla.cz/princip/>
- [7] Vitocal 300-A. *Topné, průmyslové a chladicí systémy | Viessmann Česká republika*
 4] [online]. [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: <https://www.viessmann.cz/content/dam/vi->

brands/CZ/Pdf/LTU/Listy/Cerpadla/Vitocal 300-A AWO
301.pdf/_jcr_content/renditions/original.media_file.download_attachment.file/Vi
total 300-A AWO 301.pdf

[7 VRÁNA, Václav. *TRANSFORMÁTORŮ: 10. 2015* [online]. [cit. 2020-05-21]. Dostupné
5] z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/BC_FBI/Prednasky/Trafa_bc.pdf

Seznam obrázků

Obrázek 3.1: Toky forem energie v integrovaném energetickém systému.....	27
Obrázek 3.2: Integrovaný komunitní energetický systém s napojením na distribuční síť nebo sousední komunitu.....	31
Obrázek 3.3: Modelovací rámec integrovaných komunitních energetických systémů ..	33
Obrázek 4.1: Obecná struktura energetického systému	35
Obrázek 4.2: Obecný model EnergyHubu	36
Obrázek 4.3: Vstupy a výstupy EnergyHubu	37
Obrázek 4.4: Vazební matice EnergyHubu	37
Obrázek 4.5: Tradiční modely	37
Obrázek 4.6: Obecní struktura EnergyHubu	38
Obrázek 4.7: Různé druhy EnergyHubů	39
Obrázek 5.1: Výchozí model EnergyHubu	46
Obrázek 5.2: Kód vstupních dat	60
Obrázek 5.3: Proměnné výchozího matematického modelu.....	61
Obrázek 5.4: Formulace rovnic matematického modelu v kódu GAMS.....	62
Obrázek 5.5: Sestavení rovnice a zavolání řešitele v GAMS	63
Obrázek 5.6: Report řešitele pro výchozí model EnergyHubu.....	63
Obrázek 6.1: Zkoumaná oblast.....	65
Obrázek 6.2: Rozložení a typy budov v zadané oblasti	66
Obrázek 6.3: Varianta 1.....	81
Obrázek 6.4: Varianta 2.....	82
Obrázek 6.5: Varianta 3.....	83
Obrázek 6.6: Varianta 4.....	84
Obrázek 6.7: Varianta 5.....	85
Obrázek 6.8: Celky fotovoltaických panelů	86
Obrázek 6.9: Kód GAMS – vstupní data	97
Obrázek 6.10: Kód GAMS – objektivní funkce	98
Obrázek 6.11: Kód GAMS – proměnné varianty 1	98
Obrázek 6.12: Kód GAMS – matematický model varianty 1	99
Obrázek 6.13: Kód GAMS – proměnné varianty 2	99

Obrázek 6.14: Kód GAMS – matematický model varianty 2.....	100
Obrázek 6.15: Kód GAMS – proměnné varianty 3.....	100
Obrázek 6.16: Kód GAMS – matematický model varianty 3.....	101
Obrázek 6.17: Kód GAMS – proměnné varianty 4.....	101
Obrázek 6.18: Kód GAMS – matematický model varianty 4.....	102
Obrázek 6.19: Kód GAMS – proměnné varianty 5.....	102
Obrázek 6.20: Kód GAMS – matematický model varianty 5.....	103
Obrázek 6.21: GAMS – report varianty 1.....	104
Obrázek 6.22: GAMS – report varianty 2.....	106
Obrázek 6.23: GAMS – report varianty 3.....	109
Obrázek 6.24: GAMS – report varianty 4.....	112
Obrázek 6.25: GAMS – report varianty 5.....	115

Seznam tabulek

Tabulka 5.1: Vstupní data.....	57
Tabulka 6.1: Parametry BD – ulice Ve Struhách.....	69
Tabulka 6.2: Parametry BD – ulice M. J. Lermontova	70
Tabulka 6.3: Parametry BD – ulice M. J. Lermontova	71
Tabulka 6.4: Souhrn budov	72
Tabulka 6.5: Hodinová spotřeba tepla na vytápění	73
Tabulka 6.6: Spotřeba TUV v zadané oblasti.....	74
Tabulka 6.7: Hodinová spotřeba plynu	75
Tabulka 6.8: Hodinová spotřeba elektrické energie domácnosti	76
Tabulka 6.9: Počet domácností v oblasti.....	77
Tabulka 6.10: Celková hodinová spotřeba elektrické energie v oblasti.....	77
Tabulka 6.11: Platnost nízkého a vysokého tarifu	78
Tabulka 6.12: Instalované fotovoltaické panely	87
Tabulka 6.13: Dostupný výkon fotovoltaických panelů	88
Tabulka 6.14: Souhrn vstupních dat.....	95
Tabulka 6.15: TEDOM Cento 210 – specifikace	96
Tabulka 6.16: VIADRUS G700 - specifikace	96
Tabulka 6.17: Vitocal 300-A - specifikace	96
Tabulka 6.18: Shrnutí denních nákladů na energie jednotlivých variant.....	118

Seznam grafů

Graf 2.1: Porovnání skutečné spotřeby oproti TDD	14
Graf 5.1: Hodinové spotřeby vstupních komodit	64
Graf 6.1: Elektrická energie – varianta 1	104
Graf 6.2: Odběr plynu – varianta 1	105
Graf 6.3: Tepelná energie – varianta 1	106
Graf 6.4: Elektrická energie – varianta 2	107
Graf 6.5: Odběr plynu – varianta 2	107
Graf 6.6: Tepelná energie – varianta 2	108
Graf 6.7: Elektrická energie – varianta 3	109
Graf 6.8: Odběr plynu – varianta 3	110
Graf 6.9: Tepelná energie - varianta 3	110
Graf 6.10: Bateriové úložiště – varianta 3	111
Graf 6.11: Elektrická energie – varianta 4	112
Graf 6.12: Odběr plynu – varianta 4	113
Graf 6.13: Tepelná energie – varianta 4	114
Graf 6.14: Bateriové úložiště – varianta 4	114
Graf 6.15: Elektrická energie – varianta 5	116
Graf 6.16: Odběr plynu – varianta 5	116
Graf 6.17: Tepelná energie – varianta 5	117
Graf 6.18: Bateriové úložiště – varianta 5	117

Přílohy

Příloha č. 1: Report programu GAMS – výchozí matematický model

Příloha č. 2: Report programu GAMS – varianta 5