

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky

Disertační práce

Jan Votava

Decentralizovaná energetika a její optimalizace

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika (P2612)

Studijní obor: Elektroenergetika (3907V001)

Školitel: Doc. Ing. Zdeněk Muller, PhD.

Praha, Říjen, 2024

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Doc. Ing. Zdeňkovi Mullerovi, PhD. za vedení v průběhu studia, za odborné rady a pomoc, které přispěly k vytvoření této práce.

Dále bych chtěl poděkovat celému kolektivu Katedry elektroenergetiky FEL ČVUT v Praze za spolupráci, bez které by tato práce nemohla vzniknout.

V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu během studia.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

V Praze dne 24. 10. 2024

Jan Votava

Abstrakt

Práce analyzuje probíhající změny v energetice, které se týkají všech jejích částí, tedy výroby, přenosu a distribuce. Tyto změny byly odstartovány klesajícím podílem konvenčních zdrojů v elektrizační soustavě a také novými spotřebiči. Zajištění spolehlivé dodávky se stává stále těžším úkolem jak pro přenosovou soustavu, tak pro distribuci.

V návaznosti na tyto skutečnosti se práce zabývá prvky a principy, které tvoří decentralizované soustavy, jakožto nástroje, který může zmírnit negativní dopady probíhajících změn. Cílem je odhalit možnosti řízení a provozu decentralizovaných soustav, aby se z hlediska soustavy celé elektrizační soustavy chovaly neutrálně z pohledu potřeby služeb výkonové rovnováhy, případně soustavě ulehčily.

Práce se dále zabývá matematickým modelováním prvků spotřeby, výroby a akumulace v decentralizovaných soustavách, dále návrhem jejich provozu a výslednou optimalizací, která povede z pohledu decentralizované soustavy k úsporám a z pohledu elektrizační soustavy ke sníženým nárokům na výrobu a na služby výkonové rovnováhy.

Pro ukázkou přínosů vytvořeného modelu byl vybrán reálný modelový případ malé decentralizované soustavy v podobě výrobního podniku s více zdroji energonositelů. Byly vypočítány průběhy výkonů a energií s optimalizovaným řízením spotřeb energií a byl vyhodnocen jeho přínos na spotřební diagram.

Přínosem této práce je změna pohledu na spotřebu jakožto pasivní prvek energetiky, práce poskytuje různé cesty jak co nejvíce přizpůsobit spotřebu podle potřeb elektrizační soustavy. Za indikátor potřeb elektrizační soustavy je pro potřeby této práce uvažována cena elektřiny na denním trhu.

Klíčová slova

Flexibilita, služby výkonové rovnováhy, regulační energie, decentralizovaná distribuční síť, lokální distribuční síť, kogenerace, bateriové úložiště

Abstract

This work analyzes ongoing changes in the energy sector, which affect all its components - generation, transmission, and distribution. These changes have been triggered by the decreasing share of conventional sources in the power grid and the introduction of new types of consumption devices. Ensuring reliable supply is becoming an increasingly difficult task for both transmission and distribution systems.

In response to these developments, the paper focuses on elements and principles that form decentralized systems, which can serve as tools to mitigate the negative impacts of these changes. The goal is to explore management and operational possibilities of decentralized systems so that they behave neutrally in terms of power balance services from the perspective of the overall power grid, or even ease the burden on the grid.

The paper also deals with mathematical modeling of consumption, generation, and storage components in decentralized systems, as well as the design of their operation and subsequent optimization. This leads to cost savings from the perspective of decentralized systems and reduced demands on generation and power balance services from the perspective of the grid.

For demonstration purposes, a real model case of a small decentralized system, in the form of a production company with multiple energy sources, was selected. Power and energy profiles were calculated using optimized energy management, and its contribution to the consumption diagram was evaluated.

The contribution of this work is a shift in the perception of consumption as a passive element of the energy sector. It provides various ways to adapt consumption to meet the needs of the power grid. In this work, the indicator of grid needs is the electricity price on the day-ahead market.

Keywords: Flexibility, balancing services, regulation energy, decentralized distribution network, local distribution network, cogeneration, battery storage

Seznam použitých pojmů a zkratek

AC	Alternating current (střídavý proud)
ASEK	Aktualizovaná státní energetická koncepce
AMI	Automatic Metering Infrastructure
AMR	Automatic Meter Reading
BESS	Battery Energy Storage System (Bateriové úložiště)
CNG	Compressed Natural Gas (stlačený zemní plyn)
ČEPS	Provozovatel PS ČR
ČR	Česká republika
DC	Direct current (stejnoseměrný proud)
DS	Distribuční soustava
EV	Elektrické vozidlo
EP	Evropský parlament
ES	Elektrizační soustava
EU	Evropská unie
FVE	Fotovoltaická elektrárna
KJ	Kogenerační jednotka
KVET	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla
LDS	Lokální distribuční soustava
LPG	Liquified Petroleum Gas
NAP CM	Národní akční plán čisté mobility
NAP SG	Národní akční plán pro chytré sítě
NN	Nízké napětí
PS	Přenosová soustava
SG	Smart grids
TV	Teplá voda
TAČR	Technologická agentura ČR
VN	Vysoké napětí
V2G	Vehicle-to-grid
V2H	Vehicle-to-home

Obsah

1. Úvod.....	1
Cíle práce.....	2
2. Současný stav řešené problematiky.....	3
2.1 Decentralizovaná energetika	6
2.1.1 Prvky decentralizované energetiky.....	7
Fotovoltaické systémy	8
Kombinovaná výroba elektřiny a tepla (KVET)	13
Větrné elektrárny	17
Vodní elektrárny	19
Bateriová úložiště	20
Parní akumulátor	21
Elektromobilita	23
Smart grids.....	25
2.2 Nové struktury a služby.....	28
Flexibilita.....	28
Sdílená energetika, energetická společenství, komunitní energetika	29
Virtuální elektrárna.....	31
2.4 Podpůrné služby v ČR.....	33
2.4.1 Služby výkonové rovnováhy (SVR).....	33
Zálohy pro automatickou regulaci frekvence FCR	33
Zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s automatickou aktivací aFRR	34
Zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s manuální aktivací mFRRt.....	34
Proces náhrady záloh RR.....	35
2.4.2 Ostatní podpůrné služby	35
2.4.3 Význam podpůrných služeb v decentralizovaných soustavách.....	35
2.5 Lokální distribuční soustava (LDS).....	36
3. Inovativní přístup k provozu decentralizované distribuční soustavy v rámci LDS a velkých spotřebitelů energií.....	36
3.1 Současný stav poznání.....	37
3.2 Cíle vytvořeného modelu	37
3.3 Metodický postup tvorby modelu.....	38
3.4 Obecný model energetického systému	39
3.4.1 Modely jednotlivých prvků	39
Modelování akumulace teplé/studené vody	39

Modelování parního akumulátoru	40
Akumulace elektrické energie do bateriového úložiště.....	41
Akumulace bioplynu	41
Modelování otopné soustavy	41
Modelování kogenerační jednotky	43
3.5 Obecný optimalizační přístup.....	44
3.5.1 Definice optimalizační úlohy	46
Identifikace problému.....	46
Reprezentace modelu.....	46
Analýza modelu.....	47
Vytvoření matematického modelu	49
Počáteční podmínka.....	50
Okrajové podmínky	50
Vyhodnocení modelu.....	51
Optimalizační modul	51
Simulované ochlazování.....	53
Zakázané prohledávání	55
Genetické algoritmy	57
Ukončovací modul.....	59
3.6 Optimalizační strategie.....	59
3.7 Případová studie	63
3.7.1 Popis modelové situace	64
3.7.2 Navrhovaná opatření a provoz pro modelový případ	66
3.7.3 Výchozí stav před optimalizací	69
Analýza otopné soustavy.....	69
3.7.4 Výsledky optimalizace	70
Elektrický parní vyvíječ	70
Parní akumulátor	72
Kogenerační jednotka	74
Akumulační nádrž	77
Bateriové úložiště	77
Ekonomické přínosy optimalizace spotřeby modelové soustavy.....	80
3.8 Dílčí závěry	83
4. Závěr.....	84
Naplnění cílů práce a uplatnění výsledků v praxi	85
Závěry pro další rozvoj vědy a realizace v praxi.....	86
5. Literatura	87

6. Seznam publikací	93
Publikace vztahující se k tématu disertační práce	93
Ostatní publikace nevztahující se k tématu disertační práce	94
Ohlasy.....	94
7. Přílohy	95
7.1 Regrese ročního průběhy spotřeby technologického tepla.....	95
7.2 Konstanty otopné soustavy.....	96
7.3 Omezující podmínky modelu (optimalizace pro trénování neuronových sítí).....	98

Seznam obrázků

Obrázek 1 Výhled vývoje netto instalovaného výkonu fotovoltaických a větrných elektráren – Realistická predikce [3].....	3
Obrázek 2 Výhled vývoje BESS [3].....	4
Obrázek 3 Predikce instalovaného výkonu pro jednotlivé roky a kategorie zdrojů [3]	5
Obrázek 4 Centralizovaná vs decentralizovaná výroba elektrické energie.....	7
Obrázek 5 Závislost entalpie vody a výparného tepla na tlaku. [19]	21
Obrázek 6 Řez parním akumulátorem	23
Obrázek 7 Predikce vývoje spotřeby elektrické energie a počtu EV. [3].....	23
Obrázek 8 Schéma lokální distribuční sítě. [34]	36
Obrázek 9 Schéma metodiky hledání optimální strategie	45
Obrázek 10 Strom výběru optimalizačních metod [57]	52
Obrázek 11 Algoritmus simulovaného ochlazování [53][54]	54
Obrázek 12 Algoritmus zakázaného prohledávání.....	56
Obrázek 13 Genetický algoritmus	58
Obrázek 14 Obecný vývojový diagram pro optimalizaci spotřeby	60
Obrázek 15 Roční průběh cen energií pro případovou studii. [34]	66
Obrázek 16 Strategie nasazování zdrojů a spotřeb pro modelový případ	68
Obrázek 17 Průběh spotřeb energií před optimalizací.	69
Obrázek 18 Průběh spotřeb energií před optimalizací bez energií pro potřebu vytápění.	70
Obrázek 19 Průběh spotřeby plynu pro vytápění.	70
Obrázek 20 Průběh výkonu parního vyvíječe (spouštění v závislosti na ceně energie na denním trhu).	71
Obrázek 21 Roční využití parního vyvíječe.	72
Obrázek 22 Využití parního akumulátoru během za vybraný typický časový úsek.	73
Obrázek 23 Průběh ročního využití parního akumulátoru, celková akumulovaná energie 521 MWh.....	74
Obrázek 24 Provoz kogenerační jednotka a akumulace tepla pro vybraných 14 dní v roce....	75
Obrázek 25 Výroba tepla a elektrické energie během sledovaného období.....	76
Obrázek 26 Průběh ročního využití parního akumulátoru, celková akumulovaná energie 325 MWh.....	77
Obrázek 27 Průběh ročního využití BESS 5 MWh v rámci vybraných 14 dnů v roce.....	78
Obrázek 28 Průběh ročního využití BESS 5 MWh, celková akumulovaná energie 4094 MWh.	79
Obrázek 29 Průběh ročního využití BESS 1 MWh v rámci vybraných 14 dnů v roce.....	80

Seznam tabulek

Tabulka 1 Vynucené investice do přenosové a distribuční soustavy [3].....	5
Tabulka 2 Rozdělení požadavků RfG na příslušné kategorie výrobních modulů [10]	11
Tabulka 3 Výkonové kategorie výrobních modulů [10]	12
Tabulka 4 Ekonomické zhodnocení	83

1. Úvod

Elektroenergetika prochází v současné době první velkou revolucí za dobu své existence. Tuto revoluci definitivně odstartovala v České republice revize kodexu přenosové soustavy v roce 2020 [1], která vznikla na základě Nařízení Komise 2017/2195¹. Při této revizi došlo ke změně názvosloví PpS², tradiční služby jako je primární regulace, sekundární regulace, minutové zálohy změnilly své názvosloví a nově patří do podskupiny PpS, kterou jsou SVR³. Hlavní změnou jsou podmínky poskytování těchto služeb, snížily se minimální výkony výroben pro poskytování těchto služeb a přestala platit fixace na konvenční točivé zdroje. Od roku 2021 je možné poskytovat PpS pomocí bateriových úložišť.

Tyto změny nastartovaly další nástroje pro udržení výkonové rovnováhy, a to snahu o agregaci flexibility [2] (flexibilita představuje možnost změny množství elektřiny odebírané z PS nebo DS nebo dodávané do PS⁴ nebo DS⁵ v daném časovém intervalu oproti sjednaným/předpokládaným diagramům odběru nebo dodávky, výchozí diagram, v reakci na cenové signály nebo povely.), přičemž na vzniku flexibility má zájem jak EU, tak skupina ČEPS.

Veškeré zmíněné změny jsou hnány dopředu mimo jiné růstem cen elektřiny, který je způsoben penalizací klasických zdrojů, rostoucím podílem nepredikovatelných obnovitelných zdrojů na výrobě, zdražením zemního plynu jakožto hlavního paliva pro rychlé zdroje. v roce 2022 navíc nastal boom instalace mikrozdrojů, které již dnes představují v některých částech distribuce komplikace a jsou omezovány na rezervované kapacitě. v Polsku již v roce 2023 došlo ke značnému omezení a navyšování distribučních poplatků, v ČR je situace obdobná.

Přes výše popsané změny zůstává realitou, že je většina subjektů na celoevropském trhu navyklá nakupovat elektřinu a zemní plyn za fixované ceny. Tím většina odběratelů elektřiny získala "slepotu" vůči reálným cenám na denním trhu a nyní jí chybí know-how, jak efektivněji energie spotřebovat. Přestože je v určitých hodinách v průběhu dne cena elektřiny na úrovni např. 10-20 eur za MWh a v jiných hodinách 120-180 eur za MWh, tak pouze malá část odběratelů má chuť nízkých cen flexibilně využít ve svůj prospěch. Dodavatelé na sebe převzali rizika výkyvů cen energií na denním trhu a přenášejí je do fixní ceny elektřiny v podobě marže a veškeré vyrovnání poptávky zůstává na provozovateli přenosové sítě (ČEPS). Do budoucna celý energetický trh očekává, že s extenzivní instalací OZE budou ceny energií mnohem rozkolísanější.

¹ Nařízení Komise (EU) 2017/2195 ze dne 23. listopadu 2017, kterým se stanoví rámcový pokyn pro obchodní zajišťování výkonové rovnováhy

² Poskytování podpůrných služeb

³ Služby výkonové rovnováhy

⁴ Přenosová soustava

⁵ Distribuční soustava

O aktuálnosti tématu také svědčí nárůst státem financovaných projektů (často se spoluřešiteli jako je ČEPS a MPO) týkajících se flexibility, decentralizace, smart grids, agregovaných služeb a optimalizace distribučních sítí, dále pak vznik nových obchodníků, kteří chtějí nabízet agregovanou flexibilitu.

Tato práce se zabývá možnostmi jak „energetickou revoluci“ posunout vpřed v oblasti přizpůsobování spotřeby, a to poskytováním flexibility, optimalizací spotřeby a výrobou v lokálních distribučních sítích.

Cíle práce

Práce si klade za cíl detailně představit problematiku decentralizované energetiky a zmapovat klíčové prvky, které tvoří tuto inovativní energetickou infrastrukturu. Od technických aspektů po legislativní rámec, bude práce analyzovat kompletní spektrum faktorů, které ovlivňují decentralizované sítě.

Druhá část práce se zaměří na důkladné vysvětlení funkce LDS⁶ a možností, které se naskýtají v oblasti změn v jejich provozu. Tato sekce bude důkladně rozebírat technické a provozní mechanismy, které stojí za fungováním LDS, a zároveň reflektovat možné inovace a nové trendy v oblasti decentralizované energetiky.

Poslední část práce pak bude věnována návrhu provozního režimu LDS, jakožto součásti decentralizované energetiky, s důrazem na jeho ekonomickou optimalizaci a možnost poskytovat další služby jako je flexibilita. Navrhovaný operační model pro LDS bude proveden s ohledem na aktuální a budoucí potřeby energetického trhu.

Navrhovaný výpočetní model je zaměřen na optimalizaci nasazování spotřebičů a výrobních zdrojů (kogenerační jednotky, bioplynové stanice, diesel agregáty) v průmyslových areálech, komerčních budovách nebo LDS s akumulací členy (ledobanky, akumulace tepla, akumulace bioplynu, bateriové úložiště a v budoucnu nabíjecí stanice pro elektromobily) v závislosti na spotových cenách, případně na diagramu výroby nepredikovatelných zdrojů energie. Vstupními daty pro optimalizaci jsou tepelně technické parametry budov, data z měření podružných měření, data z MaR⁷ instalovaných technologií, předpověď počasí, statistika o typickém příkonu v daném období a údaje o cenách na spotovém trhu. Pro LDS z takového řízení budou plynout ekonomické úspory ve všech vrstvách podnikání, tzn. ve výrobě, distribuci, obchodě i poskytování podpůrných služeb. Pro vlastníky budov, nebo odběrných míst, bude přínosem významné snížení nákladů na energie vzhledem k tomu, že spotřeba bude řízena s ohledem na situaci na trhu a bude využívat řízení ke zvýšení spotřeby v časech nízkých cen a snížení spotřeby v časech vysokých cen. Vedlejším efektem tohoto řešení bude kladný

⁶ Lokální Distribuční Soustava

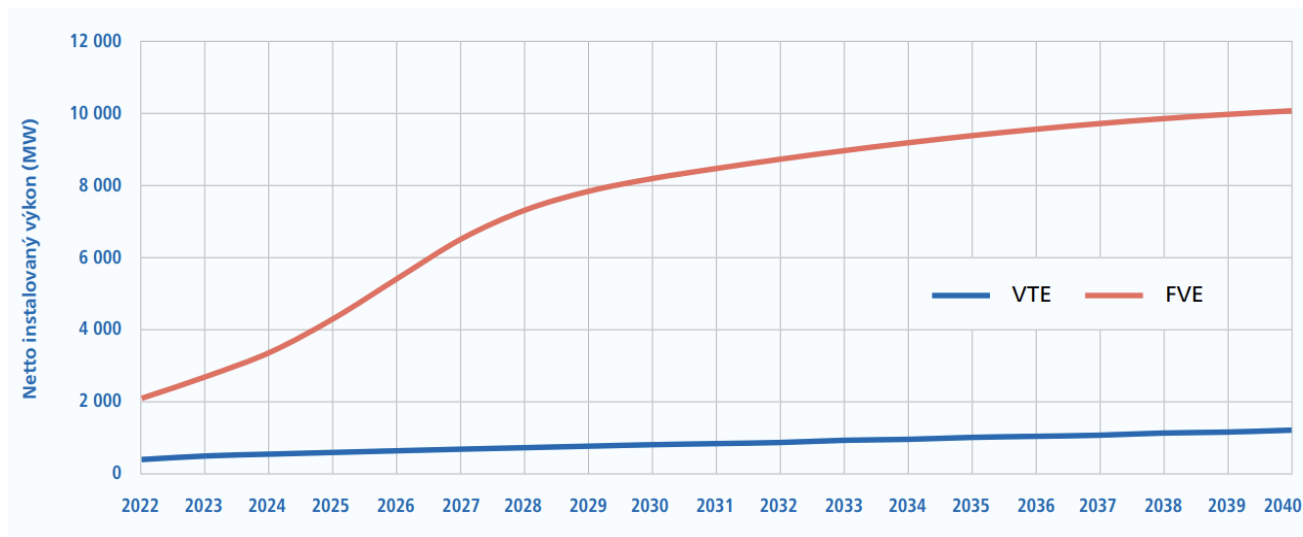
⁷ Měření a Regulace

vliv na rovnováhu v distribučních a přenosových sítích, snížení nákladů na systémové služby, lepší využití OZE a tím pádem snížení emisí CO₂.

2. Současný stav řešené problematiky

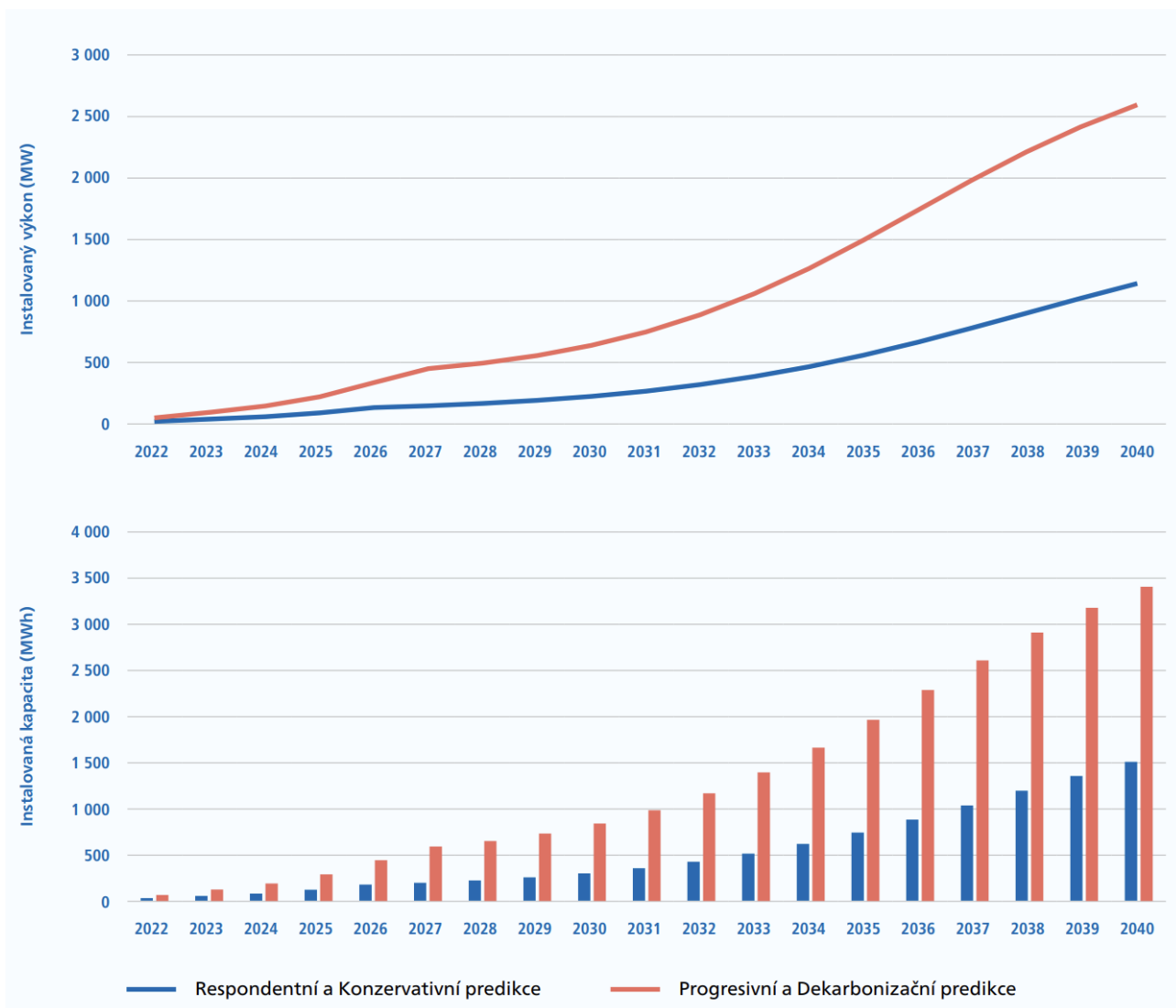
Tato kapitola se věnuje zhodnocení aktuálního stavu problematiky v České republice a ve světě. Jsou popsány nejdůležitější pojmy, technologie a přístupy k problematice decentralizované energetiky, není opomenuta ani podpora projektů, která ukazuje směr energetické politiky. Dále je potřeba si uvědomit, že energetika je přísně regulované odvětví, od výroby až po distribuci, jedná se o oblast s vysokým sociálním dopadem, samotná distribuce a přenos je služba ve veřejném zájmu. Proto se tato kapitola věnuje také legislativě, která přímo ovlivňuje vývoj nových technologií a služeb v energetice.

Pokud očekáváme, že v letech 2023-2040 [3] dojde k pětinasobnému instalovanému výkonu fotovoltaických a větrných elektráren, než máme nainstalováno nyní, viz obr. 1 a zároveň k odstavení uhelných zdrojů viz obr. 3, pak bude potřebné tyto nepredikovatelné výrobní zdroje doplnit buď dalšími výrobními zdroji (plyn, jádro) případně BESS⁸ viz obr. 2, které zajistí výkonovou rovnováhu (náklady pro rok 2023 jsou očekávány na 20 mld. Kč pro ČR). Další možností bude uřídit alespoň částečně spotřebu, což by výrazně snížilo investiční náklady. Tento aspekt přinese vytvořenému modelu obrovský potenciál uplatnění.

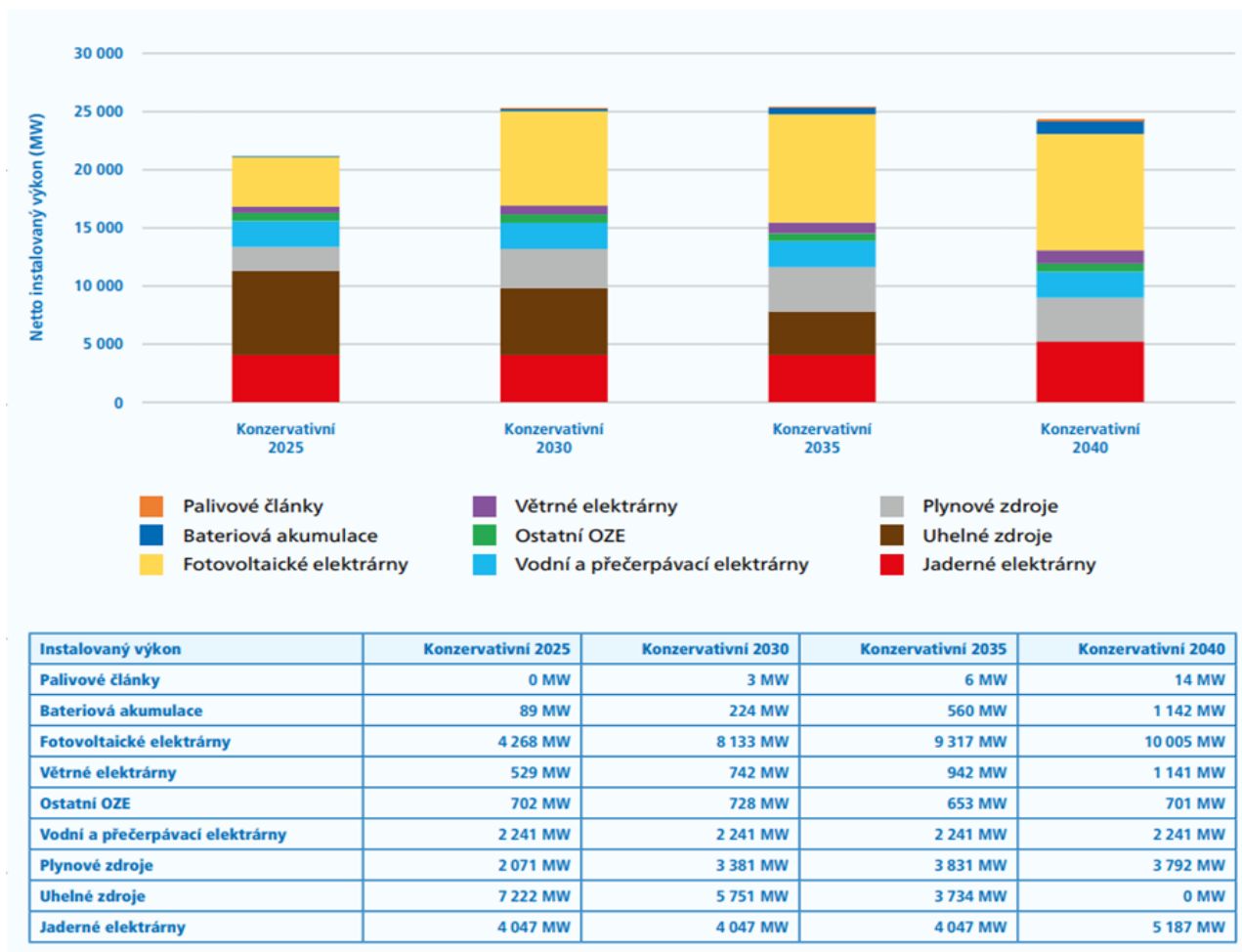


Obrázek 1 Výhled vývoje netto instalovaného výkonu fotovoltaických a větrných elektráren – Realistická predikce [3]

⁸ Battery Energy Storage System



Obrázek 2 Výhled vývoje BESS [3]



Obrázek 3 Predikce instalovaného výkonu pro jednotlivé roky a kategorie zdrojů [3]

Investice však nebudou jen na straně výroby, v tabulce 1 jsou přehledně shrnuty celkové plánované investice za provozovatele přenosové soustavy a dále za regionální provozovatele distribučních soustav (společnosti ČEPS, a.s., ČEZ Distribuce, a.s., EG.D., a.s. a PREDistribuce, a.s.). Jedná se zejména o investice související s přiměřeným rozvojem elektromobility [3] a budováním související dobíjecí infrastruktury [4], rozvojem akumulace, integrací decentralní výroby a obnovitelných zdrojů, dále s rozvojem flexibility a agregace, nárůstem přenosu dat a tím zvyšujícími se nároky na IT systémy a jejich zabezpečení.

(mil. Kč)	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
ČEPS	6 809	9 030	11 822	7 694	6 851	9 090	9 382	7 452	6 789
ČEZD	14 224	14 956	15 593	16 035	16 244	16 090	16 509	16 795	16 561
EG.D	6 219	7 096	8 643	8 973	9 085	9 450	9 635	9 961	10 202
PREDi	1 954	2 057	2 095	2 209	2 395	2 477	2 770	2 886	3 253
Celkem	29 206	33 139	38 152	34 910	34 574	37 107	38 296	37 093	36 804

Tabulka 1 Vynucené investice do přenosové a distribuční soustavy [3]

Z tabulky je patrné, jak nákladné bude připravit přenosovou a distribuční síť na budoucí stav. Přitom výrazné finanční prostředky bude možné uspořit, pokud by se budoucí požadavky řešily nejen na straně dodatečných vyrovnávacích zdrojů, ale také na straně řízení spotřeby.

2.1 Decentralizovaná energetika

Nejprve je důležité formulovat, co se decentralizovanou energetikou myslí. DE⁹ se odlišuje od tradičního centralizovaného modelu energetiky, kde je energie vyráběna v malém počtu velkých elektráren a distribuována na velké vzdálenosti. DE klade důraz na lokální výrobu a spotřebu energie, s využitím menších, rozptýlených zdrojů energie, a to především z OZE¹⁰ [5], dále pak kogeneračních jednotek [6] a do budoucna modulárních reaktorů [7]. Počítá se také se zapojením současných spotřebitelů elektrické energie do výroby.

Stavební prvky decentralizované energetiky jsou:

- Lokální výroba energie: Výroba energie v blízkosti místa spotřeby, čímž se snižují ztráty při přenosu a distribuci. Dále se snižují požadavky na přenosovou kapacitu distribučních a přenosových sítí.
- Obnovitelné zdroje energie: OZE jsou v současné době podporované zdroje, dále patří z hlediska realizace k nejsnáze realizovatelným zdrojům. Proto jsou základním stavebním kamenem decentralizované energetiky, do budoucna se očekává zapojením modulárních reaktorů.
- Inteligentní sítě (smart grids): v menším měřítku energetických sítí navíc tvořených vysokým procentem nepredikovatelných zdrojů nelze počítat s tak vysokým vyrovnaním spotřebního diagramu jako v centrálních sítích. Proto se pro efektivní řízení a optimalizaci energetických toků využívají pokročilé informační a komunikační technologie k efektivnějšímu, spolehlivějšímu a udržitelnějšímu řízení a distribuci elektrické energie. Sítě s těmito prvky nazýváme smart grids.

Výhody přechodu k DE:

- Zachování spolehlivosti v energetice i při opuštění tradičních zdrojů elektrické energie.
- Zvýšení energetické nezávislosti, a to jak na úrovni státní, tak z hlediska samotných spotřebitelů, případně komunit.
- Integrace flexibility, s úbytkem klasických zdrojů se snižuje množství dostupných podpůrných služeb pro přenosovou soustavu, při přechodu na decentralizovanou energetiku bude možné tento výpadek nahradit agregovanou flexibilitou.
- Snížení emisí CO₂, s decentralizovanou energetikou je možné začlenit do sítě více OZE a dojde k poklesu potřeby výroby o snížené ztráty při přenosu a distribuci [6].

⁹ Decentralizovaná energetika

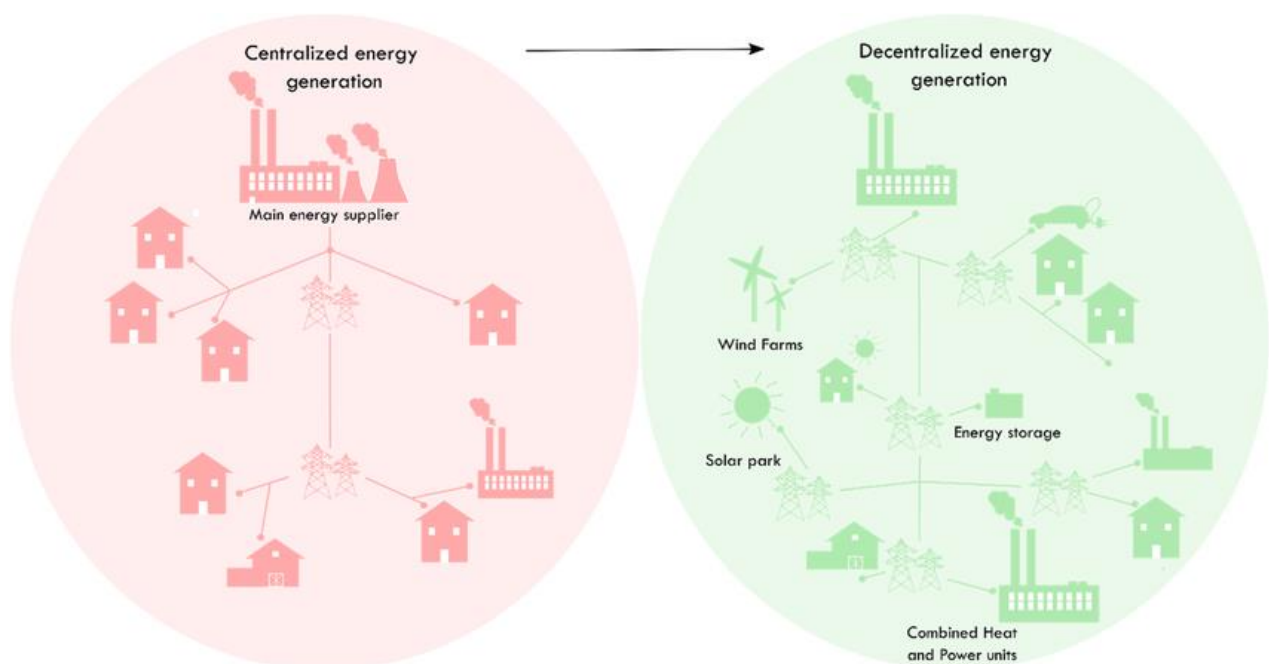
¹⁰ Obnovitelné zdroje energie

- Zvýšení energetické demokracie, bude umožněno větší zapojení občanů do energetického systému, dojde k omezení monopolů a vyšší konkurenci v elektroenergetice[8].

Nevýhody přechodu k DE:

- Vysoké počáteční investice do zdrojů, distribučních soustav, měřících a řídicích členů atd.
- Technická komplexnost, řada stávajícího technického zařízení bude potřebovat vyměnit, dojde k násobně větší potřebě sběru dat a nárůstu výpočetního výkonu pro řízení elektrizační soustavy.
- Kybernetická bezpečnost, systémy bude nutné chránit před kybernetickými útoky.
- GDPR
- Změna legislativy.

Decentralizovaná energetika představuje alternativní přístup k tradičním centralizovaným energetickým systémům a hraje klíčovou roli v posilování udržitelnosti, zvyšování energetické nezávislosti a další prostor pro zvyšování množství OZE [9].



Obrázek 4 Centralizovaná vs decentralizovaná výroba elektrické energie.

2.1.1 Prvky decentralizované energetiky

Decentralizovanou energetiku tvoří následující prvky, jejichž charakteristikou jsou nižší investiční náklady oproti prvkům klasické energetiky, dále relativně krátká doba realizace a malé nároky na obsluhu.

Fotovoltaické systémy

Fotovoltaické systémy jsou nejnadhěji realizovatelné zdroje elektrické energie, a to jak z realizačního hlediska, tak z hlediska legislativního. Snadná realizace je dána podstatou malého počtu komponentů tvořících funkční zdroj. Snadná připojitelnost je dána masivním rozvojem v rezidenčním sektoru, který měl za následek certifikaci velkého množství měničů napětí z hlediska požadavků na chování v sítích a dále pak snadnou říditelností polovodičových měničů například oproti asynchronnímu generátoru v MVE. v současné době se tak jedná o zdroj, který tvoří největší zastoupení v decentralizované energetice a v budoucnosti si tuto pozici fotovoltaické systémy udrží. Nevýhodou těchto systémů je jejich minimální schopnost přispívat ke stabilitě soustavy, tak jako se to děje u klasických točivých zdrojů se setrvačností.

Komponenty FVE¹¹ a technické řešení

Fotovoltaické panely

Ty mohou být monokrystalické, polykrystalické nebo tenkovrstvé, s každým typem nabízejícím odlišné výhody výkonu a nákladů.

- Monokrystalické panely

Vyrábějí se z monokrystalického křemíku, v současnosti poskytují nejvyšší účinnost, která činí v současnosti na úrovni celého modulu až 22,5 % u běžně dostupných modelů. Cena se pohybuje kolem 0,16 EUR/Wp a jde tak o nejlevnější dostupné moduly.

- Polykrystalické panely

Vyrábějí se z polykrystalického křemíku, který mívá nižší výrobní náklady vykoupené nižší účinností (do 19 %), nicméně se již standardně nevyrábějí a staly se tak dražšími a nedostupnými oproti modulům z monokrystalickými články.

- Tenkovrstvé panely (CIGS)

Vyrábějí se nanášením tenké amorfní vrstvy na podpurný substrát. Jsou lehčí a pružnější než krystalické panely, mají však nižší účinnost i životnost a od jejich použití se ustupuje. v rámci oprav jsou měněny za moduly krystalické.

Měniče/střídače

Fotovoltaické panely jsou zdroje stejnosměrného proudu, jejich výstup by v podstatě pro energetiku neměl reálné využití. Pro použití v energetice je potřeba zdroj střídavého napětí o definovaných parametrech, s možností regulace PQ-U¹². k tomu souží u fotovoltaických

¹¹ FVE, fotovoltaická elektrárna.

¹² Řízení činného a jalového výkonu pro udržení napětí.

zdrojů polovodičové střídače/měniče. Tato zařízení vytvoří zdroj, který je vhodný pro distribuci elektrické energie do elektrické sítě. z hlediska energetiky je vhodné rozlišovat:

- **Střídače symetrické**

Konstrukčně jsou řešeny jako třífázové můstky, to znamená, že výstup těchto střídačů může být pouze třífázově symetrický. Takové řešení je vhodné pro dodávku energie do sítě, případně pro provozy se symetrizovanou spotřebou. Běžně nemají integrovány síťové ochrany, ty jsou zajištěny externím řízením v kombinaci s externími ochranami.

- **Střídače asymetrické**

Na rozdíl od symetrických měničů jsou řešeny třemi nezávislými jednofázovými můstky a jsou tak schopné dodávat výkon do každé fáze nezávisle v rozsahu 0-100%. Toto řešení je vhodné pro autonomní systémy, rezidenční elektrárny, ale může nalézt uplatnění i v malých LDS, které připojují další nezávislé subjekty s nesymetrickou spotřebou. v rámci těchto LDS to umožňuje provozovatelům například získat vyšší rezervovanou kapacitu od nadřazené distribuční společnosti.

- **Hybridní měniče**

Hybridní měniče jsou téměř výlučně realizovány jako asymetrické, jejich přidanou funkcionalitou je možnost funkce jako nabíječe baterií a zároveň možnost energii z baterie dodávat na svém AC¹³ výstupu. Jedná se však o stroj, který nebude instalován u zdrojů nad 100 kW.

Odběrná a předávací místa (OPM)

Fotovoltaické systémy jsou často připojovány do stávajících odběrných míst na straně NN, jedinou podmínkou je nepřekročení rezervované kapacity odběrného místa a dosažení požadavků na příslušný VM¹⁴, to většinou zahrnuje pouze malé úpravy odběrného místa.

Další variantou je zřízení nového odběrného místa, zde se předpokládá zřízení pouze za účelem FVE. Zde záleží na plánovaném výkonu, od kterého se bude odvíjet napěťová hladina přípojky. Hladina napětí se volí takto:

- FVE s instalovaným výkonem nad 1 MW: Pro FVE nad 1 MW je ze zákona povinné připojení na stranu VN¹⁵. v případě naplněné kapacity sítě NN¹⁶ může DS požadovat připojení FVE na VN i pro menší elektrárny. v případě delších vzdáleností od trafostanice může být připojení na straně VN ekonomičtější.

¹³ Alternating current (střídavý proud)

¹⁴ Výrobní modul je v rámci přenosové a distribuční soustavy, definován jako zařízení nebo skupina zařízení, která společně vyrábějí elektrickou energii. Výrobní moduly se dále dělí na synchronní a asynchronní.

¹⁵ Vysoké napětí

¹⁶ Nízké napětí

- FVE s instalovaným výkonem do 1 MW: Pro FVE do 400 kW je standardní připojení na stranu nízkého NN, pro vyšší výkony se doporučuje připojení na straně VN.

Řízení výroby a chování v síti:

Dle instalovaného výkonu fotovoltaického pole se kladnou na FVE (tyto požadavky platí pro všechny nesynchronní zdroje a s malými odlišnostmi pro synchronní) odlišné požadavky z hlediska chování VM v síti, přičemž chováním VM v síti se myslí plnění technických požadavků **RfG**¹⁷. Nařízením se stanoví kodex sítě pro požadavky, tabulka 2, na připojení výroben jednotlivých kategorií k elektrizační soustavě, tabulka 3. Nařízení RfG zároveň zavádí výkonové hranice pro VM (kategorie VM dle instalovaného výkonu), tabulka 3.

Článek	Požadavky RfG	Typ Modulu					
		A1	A2	B1	B2	C	D
13.1a	Frekvenční rozsahy a časové limity pro VM	X	X	X	X	X	X
13.1b	Hodnota rychlosti změny frekvence (ROCOF)	X	X	X	X	X	X
13.2	Omezený frekvenčně závislý režim při nadfrekvenci LFSM-O	X	X	X	X	X	X
13.4,5	Přípustné snížení činného výkonu s klesající frekvencí	X	X	X	X	X	X
13.6	Logické rozhraní pro přerušení dodávky činného výkonu	X					
13.7	Podmínky pro automatické připojení k soustavě	X	X	X	X	X	
14.2	Rozhraní pro snížení činného výkonu		X	X			
14.3	Překlenutí poruchy – FRT	X	X	X	X	X	
14.4	Podmínky opětovného připojení VM k soustavě po odpojení způsobené poruchou v soustavě		X	X	X	X	X
14.5d, 15.2g	Komunikace a výměna informací			X	X	X	X
15.2a,b	Regulovatelnost činného výkonu			X	X	X	X
15.2c	Omezený frekvenčně závislý režim při podfrekvenci LFSM-U				X	X	X
15.2d	Frekvenčně závislý režim – FSM					X	X

¹⁷ **Requirements for Generators**, což je nařízení Evropské unie (2016/631) ze dne 14. dubna 2016, které stanovuje požadavky na připojení elektrických generátorů k elektrizační soustavě.

15.5a	Schopnost startu ze tmy				X1	X	X
15.5b	Schopnost ostrovního provozu					X	X
15.5c	Rychlé opětovné přifázování					X	X
15.6a	Kritéria pro detekci ztráty úhlové stability nebo ztráty regulace					X	X
15.6b	Přístrojové vybavení		X	X	X	X	X
15.6c	Simulační modely				X	X	X
15.6e	Minimální a maximální limity rychlosti změn činného výkonu				X	X	X
16.2a,b	Doby připojení VM k soustavě v případě přepětí a podpětí						X
16.2c	Automatické odpojení na základě hodnoty napětí						X
16.3	Překlenutí poruchy – FRT						X
16.4	Nastavení synchronizačních zařízení						X
17.2a	Dodávka jalového výkonu		X	X			
17.3	Velikost a dobu obnovy činného výkonu po poruše			X	X	X	X
18.2	Dodávka jalového výkonu				X	X	X
20.2a	Dodávka jalového výkonu u nesynchronních VM		X	X			
20.2b,c	Rychlý poruchový proud v případě poruchy			X	X	X	X
20.3	Obnovení činného výkonu po poruše		X	X	X	X	X
21.2	Umělá setrvačnost				X	X	X
21.3b,c	Dodávka jalového výkonu				X	X	X
21.3d	Režimy regulace jalového výkonu				X	X	X
21.3e	Priorita příspěvků činného nebo jalového výkonu			X	X	X	X
21.3f	Tlumení výkonových oscilací				X	X	X

Tabulka 2 Rozdělení požadavků RfG na příslušné kategorie výrobních modulů [10]

Kategorie výrobního modulu	Limit	Podkat.	Hranice PDS	Nejvýznamnější požadavky
A	800 W	A1	≥ 800 W; ≤ 11 kW	podle čl. 13 pro výrobní moduly A
		A2	> 11 kW; < 100 kW	podle čl. 13 pro výrobní moduly A a čl. 14.2, 14.3, 14.4, 14.5 pro výrobní moduly B a čl. 20 pro nesynchronní výrobní moduly kategorie B
B	1 MW	B1	≥ 100 kW; < 1 MW	podle čl. 14 pro výrobní moduly B, čl. 17 pro synchronní výrobní moduly B a čl. 20 pro nesynchronní výrobní moduly kategorie B
		B2	≥ 1 MW; < 30 MW	podle čl. 14 pro výrobní moduly B, čl. 17 pro synchronní výrobní moduly B a čl. 15.2, 15.3, 15.4, 15.5a, 15.5b, 15.5c, 15.6a, 15.6b, 15.6c pro výrobní moduly C, podle čl. 18 pro synchronní výrobní moduly C a podle čl. 21 pro nesynchronní výrobní moduly kategorie C
C	50 MW	C	≥ 30 MW < 75 MW	podle čl. 15, čl. 18 a čl. 21
D	75 MW	D	≥ 75 MW	podle čl. 16, čl. 19 a čl. 22

Tabulka 3 Výkonové kategorie výrobních modulů [10]

Z tabulky vyplývá, že pro výrobní moduly nad 100 kW je požadována regulovatelnost činného výkonu, pro výrobní moduly nad 1 MW je požadována regulovatelnost i jalového výkonu. Požadavky na regulaci jsou přijímány z dispečerského řízení distribučních společností, za tímto účelem musí být výrobní moduly vybaveny rozváděči dispečerského řízení RTU¹⁸, které slouží k dálkovému monitorování a ovládání elektrárny, ovládací pokyny z RTU jsou poté předány monitoringu elektrárny, který předá řídicí povely jednotlivým komponentům, akčními členy mohou být samotné střídače, nebo u starších výroben rozváděče vybavené vypínači pro jednotlivé sekce FV polí a kompenzací, například rozváděče R-P, R-PQ od dodavatele EGC [11].

RTU disponují:

- Sběrem dat v reálném čase (shromažďují data z různých komponent FVE, jako jsou střídače, měřiče energie, senzory teploty, údaje z meteorologických stanic a další)
- Přenosem dat v požadovaných časových intervalech do centrálního monitorovacího systému (přenos dat probíhá obvykle prostřednictvím mobilní sítě, GPRS, Internet).
- Ovládáním elektrárny, umožňují dálkové ovládání některých funkcí FVE, jako je zapínání a vypínání střídačů, regulace výkonu, změna nastavení a další. Ovládání elektrárny se obvykle provádí z centrálního monitorovacího systému.

¹⁸ **Remote Terminal Unit** (dálková terminálová jednotka), je elektronické zařízení používané v průmyslové automatizaci a systémech pro sběr dat a řízení. V energetice plní funkci rozváděče dispečerského řízení.

- Dalšími funkcemi jako je upozornění na poruchy, výpadky atd.

Kombinovaná výroba elektřiny a tepla (KVET)

Kogenerační jednotky jsou zařízení, která produkují současně elektřinu a teplo. Mají vysokou celkovou účinnost přeměny primární energie. z hlediska produkované elektřiny se dají s trochou nadsázky považovat za zdroje se 100 % účinností přeměny tepla na elektřinu, protože se obvykle používají na místech, kde by se množství odpadního tepla stejně muselo vyrábět, pravděpodobně ze stejně kvalitního zdroje primární energie. Hlavní nevýhodou kogeneračních jednotek je ve většině případů právě nutnost současné výroby elektřiny a tepla, to znamená omezené použití v případě malého odběru tepla a potřebě elektřiny vyšší, než odpovídá poměru výroby.

Dělení kogeneračních jednotek:

Podle výkonu:

Mikro-Kogenerační jednotky (do 50 kW)

Mini-Kogenerační jednotky (50 kW – 500 kW)

Malé kogenerační jednotky (500 kW – 1 MW)

Střední kogenerační jednotky (1 MW – 50 MW)

Velké kogenerační jednotky (nad 50 MW)

Podle typu paliva:

Plynové (zemní plyn, bioplyn, LPG¹⁹)

Spalující kapalná paliva (nafta, benzín, mazut, MEŘO, FAME, biolih)

Spalující pevná paliva (biomasa, uhlí, dřevo)

Podle typu tepelného stroje:

S vnitřním spalováním (ICE)

- **Pístové motory** jsou nejčastěji používané KJ²⁰ v oblasti výkonů jednotek kW až jednotek MW. Vynikají rychlým startem, velmi rychlou reakcí na změnu zatížení oproti ostatním strojům, vysokou mechanickou (elektrickou) účinností (u velkých jednotek nad 40 %). Mají snadnou údržbu, jednoduché řízení a tím i snadnou dosažitelnost správného chování v síti. Pro vysoké výkony jsou však drahé, hlučné a zbytečně komplikované. Palivem mohou být všechna dostupná plynná a kapalná paliva.

¹⁹ Liquified Petroleum Gas, zkapalněný ropný plyn (propan butan).

²⁰ Kogenerační jednotka

Matematicky se modelují pomocí Ottova, případně Mullerova cyklu (ten se liší od Ottova expanzním poměrem). Vztah pro modelování účinnosti Ottova cyklu je [12]

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \quad (1)$$

Kde:

η je termodynamická účinnost motoru,

r je kompresní poměr (ten se u Ottova cyklu značně mění se zatížením, u kogeneračních jednotek vyšších výkonů, které jsou vybaveny technologií Lean Burn ²¹ se tento jev neprojevuje),

γ je poměr měrných telených kapacit při konstantním tlaku a objemu tepel (pro vzduch $\gamma \approx 1.4$).

- **Spalovací turbíny**, pokud nejsou provozovány v paroplynovém cyklu, nedosahují tak vysokých účinností jako pístové spalovací motory. Mají však výhodu možnosti mnohem vyšších výkonů, absolutně i vzhledem k velikosti, vzhledem k výkonům dále vynikají rychlostí startu a náběhu na jmenovitý výkon (u aeroderivativních jednotek do 5 min při výkonu v řádu MW). u průmyslových jednotek je velmi dlouhá doba mezi servisními prohlídkami až 33 000 motohodin, generální opravy po 100 000. Palivem jsou mohou být všechna dostupná plynná a kapalná paliva. Matematicky se plynové turbíny modelují pomocí Braytonova cyklu. Vztah pro účinnost je

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (2)$$

Kde:

η je účinnost cyklu,

T_1 je teplota na vstupu do kompresoru,

T_2 je teplota na výstupu z kompresoru,

P_1 je tlak na vstupu do kompresoru,

P_2 je tlak na výstupu z kompresoru,

γ je poměr měrných telených kapacit při konstantním tlaku a objemu tepel (pro vzduch $\gamma \approx 1.4$).

S vnějším spalováním (ECE)

- **Parní turbíny**

²¹ Lean Burn technologie zahrnuje využití spalování s předkomůrkou, které umožní spalovat chudou směs v Ottově cyklu, díky tomu lze provozovat motor i při částečném zatížení s velkou dynamickou kompresí, tedy bez poklesu účinnosti.

Kogenerační jednotky s vnějším spalováním jsou primárně zastoupeny parními turbínami, jejich hlavní výhodou je, že mohou být integrovány s různými zdroji energie, včetně biomasy, uhlí a jaderné energie. Pracovním médiem je vodní pára.

Cyklus parní turbíny se modeluje pomocí Rankinova cyklu, jeho účinnost lze stavit podle vztahu

$$\eta = \frac{h_a - h_e}{h_a - c t_k} \quad (3)$$

Kde:

h_a je měrná entalpie admisní páry,

h_e je měrná entalpie emisní páry,

c je měrná tepelná kapacita vody,

t_k je teplota kondenzátu.

Výkon parní turbíny lze stanovit podle vztahu

$$P = \dot{m} (h_a - h_e) \quad (4)$$

Kde:

\dot{m} je hmotnostní tok páry,

h_a je měrná entalpie admisní páry,

h_e je měrná entalpie emisní páry.

- Parní stroje

Parní stroje se z hlediska provozu v podstatě neliší od parních turbín, rozhodujícím parametrem pro použití je výkon, případně parametry páry při teplotě provozu.

- Stirlingovy motory

Stirlingovy motory jsou v případě použití v kombinované výrobě dobrou alternativou k tradičním tepelným strojům, výhodami jsou

Vysoká účinnost: Stirlingův stroj může dosahovat vyšší účinnosti ve srovnání s tradičními spalovacími motory, zejména v malých až středních aplikacích, teoreticky je možné považovat jeho cyklus za shodný s Carnotovým.

Flexibilita paliva: Může být poháněn různými zdroji tepla, včetně obnovitelných zdrojů jako je solární teplo, biomasa, geotermální energie nebo dokonce odpadní teplo z průmyslových procesů.

Ekologická šetrnost: Stirlingův stroj nevyžaduje spalování paliva uvnitř motoru, což vede k nižší produkci emisí oxidů dusíku, protože díky vnějšímu splalování není potřeba spalovat s přebytkem vzduchu. Je ideální pro použití v ekologicky citlivých oblastech.

Tichý provoz: Jeho tichý chod je výhodný pro rezidenční oblasti a malé podniky, kde hluk může být problémem.

Mezi nevýhody pak patří:

vyšší pořizovací náklady: Tento tepelný stroj patří mezi nejméně rozšířené tepelné stroje což sebou nese vyšší náklady v průběhu celé realizace.

složitost údržby: Plynoucí z komplikované výměny tepla.

Matematické vztahy pro hodnocení a modelování kombinované výroby

Jedním z hodnocených parametrů je celková účinnost kombinované výroby [13], ta se obvykle se zatížením značně nemění.

$$\eta_{KVET} = \frac{P_{el} + P_{th}}{Q_{in}} \quad (5)$$

Kde:

η_{KVET} je celková účinnost kombinované výroby,

P_{el} je elektrický výkon,

P_{th} je tepelný výkon,

Q_{in} je tepelný příkon paliva.

Dále hodnotíme úsporu primární energie (UPE) [14]

$$UPE = \left(1 - \frac{1}{\frac{Q_{U\check{Z}}/Q_{PAL\ KVET}}{\eta_r^V} + \frac{E_{KVET}/Q_{PAL\ KVET}}{\eta_r^T}} \right) * 100 (\%) \quad (6)$$

Kde:

$Q_{PAL\ KVET}$ je spotřeba energie v palivu použitým v procesu KVET (MWh)

$Q_{U\check{Z}}$ je množství užitečného tepla (MWh)

E_{KVET} je množství elektřiny z KVET (MWh)

η_r^V je harmonizovaná referenční hodnota účinnosti pro oddělenou výrobu **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

η_r^E je výsledná korigovaná harmonizovaná referenční hodnota účinnosti pro oddělenou výrobu elektřiny **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

Kombinovaná výroba elektřiny a tepla nabízí významné výhody v účinnosti a snížení emisí oproti tradičním metodám výroby energie. Integrace KVE systémů do moderních energetických struktur, včetně chytrých a decentralizovaných sítí, přispívá k lepšímu využití lokálních zdrojů, zvyšuje energetickou nezávislost a podporuje udržitelný rozvoj. v případě pístových jednotek a spalovacích turbín se jedná o vysoce flexibilní zdroj elektrické energie, zvláště v kombinaci s akumulací tepla.

Větrné elektrárny

Větrná elektrárna je zařízení, které přeměňuje kinetickou energii větru na elektrickou energii. Tento proces začíná přeměnou kinetické energie proudícího vzduchu pomocí rotoru větrné turbíny, který se skládá z listů (také nazývaných lopatky) upevněných na hřídel spojenou s generátorem, nebo převodovkou generátoru. Větrné turbíny mohou být rozděleny do dvou hlavních kategorií na základě osy rotace: horizontální osy (HAWT) a vertikální osy (VAWT).

Základní principy přeměny kinetické energie

- Větrné turbíny s odporovým principem:

Tyto turbíny využívají odporovou sílu, kterou vítr vyvíjí na plochu rotoru. Rotor má obvykle tvar misky nebo lžice. Jsou jednodušší a levnější na výrobu než turbíny s vztlakovým principem. Mají ale nižší účinnost a menší výkony. Používají se spíše pro malé větrné elektrárny a pro aplikace v oblastech se slabým větrem.

- Větrné turbíny s vztlakovým principem:

Tyto turbíny využívají aerodynamický vztlak, který vzniká na profilu rotoru podobně jako u křídla letadla. Rotor má obvykle tvar křídla s tlustým profilem na návětrné straně a tenkým profilem na závětrné straně. Jsou složitější a dražší na výrobu než turbíny s odporovým principem. Mají ale vyšší účinnost a dosahují větších výkonů. Používají se pro většinu velkých větrných elektráren a pro aplikace v oblastech se silným větrem.

Výkon větrné elektrárny

Výkon větrné turbíny lze modelovat pomocí Betzova zákona, který stanoví maximální možnou účinnost přeměny kinetické energie větru na mechanickou energii. Tento zákon říká, že žádná turbína nemůže zachytit více než 59.3% kinetické energie větru. Matematicky je výkon větrné turbíny vyjádřen jako:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (7)$$

Kde:

ρ je hustota vzduchu (kg/m^3)

A je plocha průřezu rotoru (m^2)

v je rychlost větru (m/s),

C_p (koeficient výkonu) je maximální teoretická účinnost, kterou lze dosáhnout podle Betzova zákona

Technologické aspekty

Moderní větrné elektrárny jsou vybaveny různými technologiemi pro optimalizaci výroby energie a zajištění bezpečnosti. Tyto technologie zahrnují systémy pro sledování a kontrolu, automatické nastavování lopatek rotoru pro maximální efektivitu a systémy pro ochranu proti přetížení při extrémních větrných podmínkách.

Ekologie a ekonomika

Větrné elektrárny jsou považovány za jednu z nečistších metod výroby energie (nevýhodou je složitá recyklace po ukončení životního cyklu), jelikož nevytvářejí emise skleníkových plynů ani jiné znečišťující látky. Ekonomicky jsou po počáteční investici do instalace větrné elektrárny náklady na provoz a údržbu relativně nízké, což činí větrnou energii konkurenceschopnou alternativou k tradičním zdrojům energie.

Role v energetice

Větrné elektrárny jsou z hlediska vyrovnanosti výrobního diagramu příznivější než zdroje fotovoltaické, mohou produkovat energii i v noci a za oblačného počasí mají méně sezónních výkyvů, protože větrné podmínky jsou obvykle stabilnější během celého roku. Průměrná roční výroba elektrické energie větrné elektrárny na 1 MW výkonu v Evropě se značně liší v závislosti na umístění elektrárny a velikosti a typu. Nicméně, podle dat Evropské asociace pro větrnou energii [15] se průměrná roční výroba větrné elektrárny na 1 MW výkonu v Evropě pohybuje mezi 2 000 a 3 000 MWh.

Elektrická část větrných elektráren

Pokud se budeme bavit o energeticky významných větrných elektrárnách, tak mohou být vybaveny dvěma typy generátorů. Větrné elektrárny nad 1 MW obvykle používají dva typy synchronních generátorů:

Asynchronní generátory s kroužkovými rotory buzenými polovodičovými měniči, běžně nazývanými „Double fed induction generator“

DFIG jsou nejběžnějším typem generátoru ve větrných elektrárnách nad 1 MW. Mají stator s vinutím napraveno připojeným k síti a rotor s vinutím, které lze regulovat elektronicky. To umožňuje DFIG regulovat aktivní i jalový výkon, což je důležité pro stabilitu sítě a pro optimalizaci výkonu turbíny. DFIG jsou obvykle menší a lehčí než synchronní generátory s permanentními magnety (PMSG).

Synchronní generátory permanentními magnety (PMSG):

PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator) jedná se o synchronní generátor s buzením permanentními magnety, výhodou je vysoká účinnost elektrického stroje. Ve větrných elektrárnách je však nemožné (bez speciální převodovky) tyto generátory provozovat bez měniče pro přizpůsobení výstupního napětí a frekvence požadavkům sítě. Podstatné je, že narozdíl od DFIG protéká 100 % generovaného výkonu přes tyto měnič.

Náklady na měniče frekvence mohou částečně snižovat benefity nižší ceny PMSG a vyšší účinnosti elektrického stroje v porovnání s DFIG.

Vodní elektrárny

Vodní elektrárny představují klíčovou součást obnovitelných zdrojů energie, využívající potenciální a kinetickou energii vody k výrobě elektrické energie.

Principy vodních elektráren

Vodní elektrárny využívají vodní tok nebo spád vody k pohonu turbín, které jsou mechanicky spojeny s generátory pro výrobu elektrické energie. Existují tři hlavní typy vodních elektráren:

1. **Přečerpávací vodní elektrárny:** Tyto elektrárny ukládají energii tím, že čerpají vodu do vyššího umístěného rezervoáru během nízké poptávky po energii a uvolňují vodu zpět přes turbíny během vysoké poptávky.
2. **Průtočné elektrárny:** Využívají přirozený tok řeky k pohonu turbín bez nutnosti výraznějšího zásahu do přirozeného toku vody.
3. **Akumulační elektrárny:** Tvoří rezervoáry vody za velkými přehradami, kde výškový rozdíl slouží jako zdroj potenciální energie pro výrobu elektrické energie.

Matematický model

Základní matematický model pro vodní elektrárnu může být vyjádřen pomocí následujícího vztahu, který spočítá elektrický výkon generovaný turbínou:

$$P = \eta \rho g Q h \quad (8)$$

Kde:

P je výkon generátoru (W),

η je účinnost systému (bezrozměrná),

ρ je hustota vody (kg/m^3),

g je gravitační zrychlení (m/s^2),

Q je průtok vody (m^3/s),

h je efektivní spád vody (m).

Integrace do chytrých sítí

Integrace vodních elektráren do chytrých sítí přináší řadu výhod [16], včetně lepší reakce na změnu spotřeby, optimalizace provozu v reálném čase a zlepšení spolehlivosti sítě. v chytrých sítích umožňují:

- **Dynamickou regulaci průtoku a výkonu:** Díky real-time datům a pokročilým prediktivním modelům mohou být vodní elektrárny přizpůsobeny tak, aby reagovaly na změny v poptávce a nabídce na síti.
- **Využití jako zdroje pro frekvenční regulaci:** Přečerpávací elektrárny mohou být využívány pro udržení stability frekvence v síti tím, že rychle reagují na potřebu zvýšení nebo snížení výroby energie.

Bateriová úložiště

Bateriová úložiště energie (BESS – battery energy system storage) hrají klíčovou roli v moderních elektrických sítích, zvláště v kontextu zvyšující se penetrace obnovitelných zdrojů energie, jako jsou větrné a solární elektrárny. Tyto systémy nabízejí flexibilní a rychlou odpověď na fluktuace v produkci a spotřebě energie, což zlepšuje stabilitu sítě a umožňuje efektivní využití obnovitelných zdrojů [17][18].

Typické aplikace bateriových úložišť

1. **Frekvenční regulace a stabilizace sítě:** Bateriová úložiště rychle reagují na změny výkonu v síti, čímž pomáhají udržovat frekvenci sítě v předepsaných limitech.
2. **Poskytování činné a jalové energie:** Baterie mohou dodávat činnou energii pro pokrytí špičkové poptávky a jalovou energii pro regulaci napětí v síti.
3. **Zvyšování kvality energie:** Redukují výkyvy napětí a přispívají k lepší kvalitě napájení v distribuční síti.
4. **Podpora pro obnovitelné zdroje:** Umožňují hladší integraci zdrojů s proměnlivou výrobou energie tím, že vyrovnávají jejich výkonové kolísání.

Dostupné konstrukce bateriových úložišť

Bateriová úložiště mohou být konstruována pomocí různých technologií, včetně:

- **Lithium-iontové baterie (LiFePO₄):** v současnosti nejrozšířenější díky své vysoké energetické hustotě a dlouhé životnosti.
- **Sodík-sírové baterie:** Vhodné pro velká stacionární úložiště s dlouhou životností a dobrými vlastnostmi pro velkoobjemové ukládání.
- **Redoxní vanadové průtočné baterie:** Nabízejí neomezenou kapacitu ukládání, jelikož kapacita je omezena pouze velikostí zásobníků elektrolytu.

Systémy řízení pro bateriová úložiště

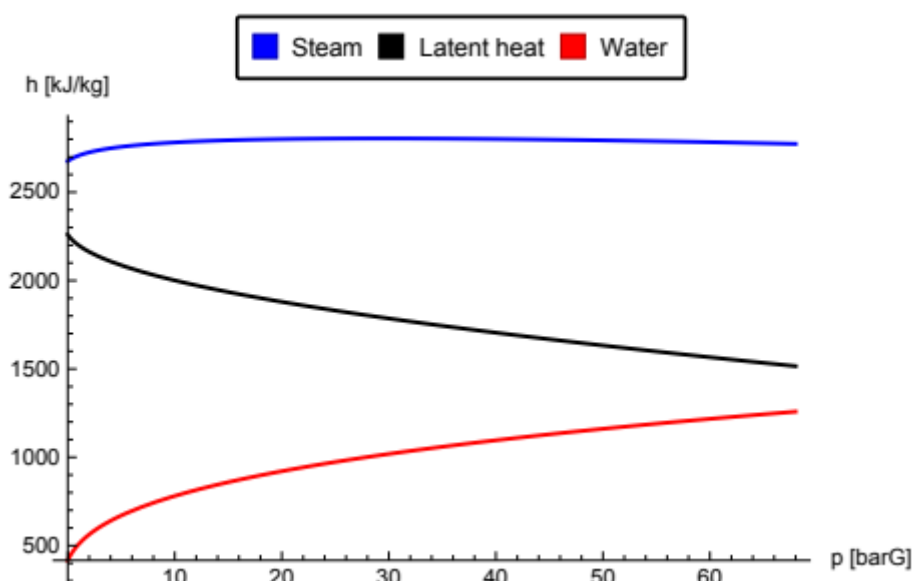
Řízení bateriových úložišť zahrnuje:

- **Řídicí systémy baterií (Battery Management Systems, BMS):** Zajišťují optimální provoz baterií, monitorují jejich stav a zabezpečují proti přetížení a přehřátí, dále výpočet SOC (stavu nabití).
- **Systémy pro energetické řízení (Energy Management Systems, EMS):** Optimalizují využití baterie vzhledem k aktuálním cenám energie, stavu sítě a predikcím výroby a spotřeby.

Bateriová úložiště představují důležitý prvek pro stabilizaci elektrických sítí a zajištění kontinuity dodávek energie. Díky své schopnosti rychle reagovat na změny v síti a poskytovat potřebné služby výkonové rovnováhy, jsou klíčové pro integraci obnovitelných zdrojů [19] a zlepšení celkové efektivity a spolehlivosti energetických systémů.

Parní akumulátor

Lokální distribuční sítě jsou běžnou záležitostí v průmyslových podnicích, pro velkou část průmyslu je k výrobě potřeba teplo v podobě páry, která je často produktem kombinované výroby elektřiny. Dále se v poslední době objevuje výroba páry pomocí elektrických parních vyvíječů, tento trend vznikl v Německu pro využití přebytků elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Vhodným prvkem se pak stává parní akumulace, které byla částečně opuštěna v dobách konvenčních zdrojů elektrické energie s parními turbogenerátory, to proto, že je schopnost akumulace páry je na vysokých parametrech omezená [20]. Tato skutečnost vyplývá z následujícího grafu.



Obrázek 5 Závislost entalpie vody a výparného tepla na tlaku. [20]

Tento graf (Obrázek 5) znázorňuje, jak měrná entalpie syté vody, páry a latentní teplo vody závisí na tlaku. Pro velikost akumulátoru je zásadní entalpie vody, protože voda akumuluje energii. Ze vzorce (9) je patrné, že v čitateli je rozdíl entalpie vody, a čím je tento rozdíl větší, tím je akumulační schopnost akumulátoru větší. Graf závislosti entalpie (Obrázek 5) ukazuje, že největší derivace je v rozsahu tlaku 0 barG a s rostoucím tlakem se snižuje. Velikost parního akumulátoru je tedy nepřímo úměrná rozdílu pracovních tlaků a přímo úměrná úrovni tlaku. Akumulace páry se proto nejlépe dosahuje při tlaku do 20 barG, při vyšších tlacích by byl akumulátor příliš velký.

$$m_{pára} = \frac{(h_{2v} - h_{1v}) \cdot m_{voda}}{h_{1s}} \quad (9)$$

Kde:

$m_{pára}$ je akumulační schopnost výstupní (vyvíjené) páry v kg

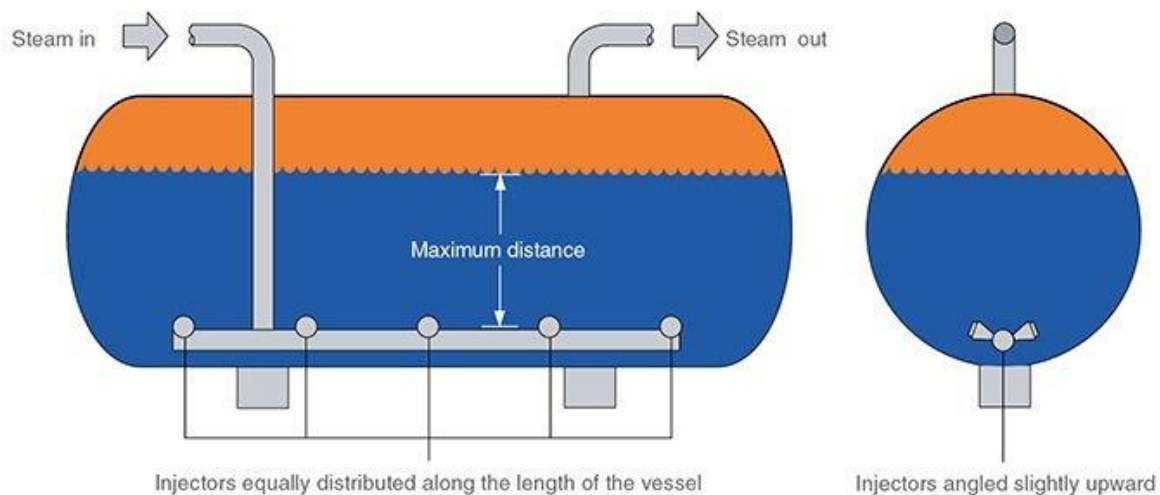
h_{2v} je entalpie vody při tlaku vstupní páry v kJ/kg

h_{1v} je entalpie vody při tlaku výstupní páry v kJ/kg

h_{1s} je entalpie výstupní páry v kJ/kg

m_{voda} je hmotnost vody pro akumulaci v kg

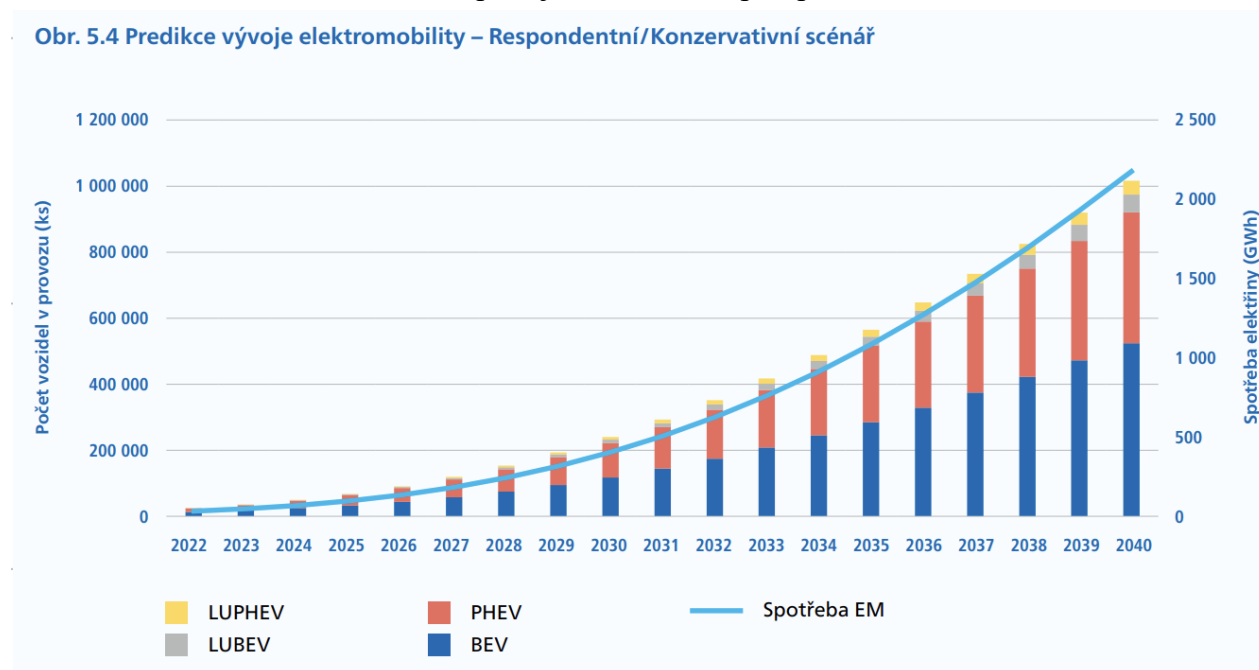
Parní akumulátor je typicky navržen jako válcová nádoba, která co nejrychleji reaguje na sběr páry. Je nutné mít co největší plochu povrchu, protože odpařování probíhá na povrchu. z tohoto důvodu jsou tyto válcové nádrže umístěny vodorovně. Princip spočívá v tom, že pracují s 50 % až 90 % kapacitou, aby byla zajištěna dostatečná plocha povrchu pro kvalitu páry a rychlost odpařování, kvalita a rychlost se zvyšují se snižováním obsahu nádrže na 50 %. Velikost parního akumulátoru je také ovlivněna parními injektory (Obrázek 6) a jejich konfigurací, pro rychlé přechodné jevy je počet injektorů vyšší. Dále je nutné zajistit možnost vypouštění kondenzátu, protože během provozu se sytou párou se kondenzát hromadí v důsledku tepelných ztrát.



Obrázek 6 Řez parním akumulátorem

Elektromobilita

Elektromobilita hraje klíčovou roli v přechodu k nízkouhlíkovým a udržitelným způsobům dopravy. EV²² nahrazují tradiční spalovací motory bateriemi a elektromotory, což snižuje emise skleníkových plynů a znečišťující látky. Tato transformace vede k potřebě efektivního řízení elektroenergetického systému, aby bylo možné účinně zvládat výzvy spojené s proměnlivou poptávkou a nabídkou elektřiny způsobenou nabíjením elektrických vozidel. Vliv EV na síť do budoucna nelze opomíjet vzhledem k předpokládanému scénáři Obrázek 6.



Obrázek 7 Predikce vývoje spotřeby elektrické energie a počtu EV. [3]

²² Electric vehicle (Elektromobil)

Do budoucna se počítá, že se Elektromobilita bude moci stát jedním z nástrojů k agregaci flexibility, předpokládá se vytvoření synergie a přinesení významných výhod pro udržitelnost a efektivitu energetického systému. Elektromobilita poskytuje zajímavou možnost pro agregaci flexibility, protože nabíjení elektrických vozidel může být plánováno a optimalizováno tak, aby odpovídalo energetickým potřebám a nabídce v daný čas. Inteligentní řízení nabíjení elektromobilů může být integrováno do systému agregace flexibility, což umožňuje optimalizovat průběh nabíjení tak, aby korelovalo s obdobím nižší poptávky po elektřině. To může pomoci vyrovnat zátěž na elektroenergetické síti a snížit potřebu investovat do dalších kapacitních zdrojů. Dále se nabízí možnost využít EV jako BESS [21], tento princip je označován jako V2G²³.

Elektrické parametry současných EV

Z hlediska řízení decentralizovaných distribučních sítí a poskytování flexibility jsou u elektromobilů podstatné kapacity baterií, které určují možný akumulací prostor pro funkci sítě (uživatel nepotřebuje každý den plnou kapacitu a je tedy k dispozici). Dalším parametrem jsou pak výkony palubních AC nabíječek (pro využití V2G se nepředpokládá nabíjení/vybíjení v DC stanicích). Dále je nutné počítat s možnými náhlými potřebami vysokého elektrického výkonu v případě DC nabíjení.

- Kapacity baterií

Průměrné kapacity baterií současných elektromobilů se výrazně liší v závislosti na modelu a výrobci. Nicméně, většina moderních elektromobilů má baterie s kapacitou mezi 40 kWh až 100 kWh. Například vozy jako Tesla Model 3 nabízejí kapacity okolo 50 kWh až 75 kWh, zatímco luxusnější modely, například Tesla Model S nebo Porsche Taycan, mohou dosahovat kapacit až kolem 100 kWh a více. Další kategorií se kterou se během následujících let počítá jsou nákladní automobily s kapacitami baterií 450 – 900 kWh.

- Integrované nabíječky pro nabíjení z AC nabíjecích bodů (z distribuční sítě)

Průměrné kapacity vestavěných AC (střídavých) nabíječek v elektromobilech se také mohou lišit v závislosti na konkrétním modelu a výrobci. Většina moderních elektromobilů je vybavena vestavěným nabíječem s výkonem zhruba 7 kW až 11 kW. Některé luxusnější modely a elektromobily vyšší třídy mohou mít nabíječky s vyšším výkonem, například kolem 22 kW. u nákladních vozidel se zatím s AC nabíjením nepočítá a lze tedy očekávat, že jejich funkce coby akumulace pro energetickou soustavu bude zatím nedostupná.

Je důležité poznamenat, že výkon vestavěné nabíječky určuje, jak rychle může elektromobil přijímat elektrickou energii ze střídavého zdroje z externí zásuvky nebo nabíjecí stanice. Většina elektromobilů je schopna přijímat nabíjecí výkon do 11 kW, některé až 22 kW, což odpovídá běžné domácí elektroinstalaci, a umožňuje efektivní nabíjení doma i na veřejných

²³ Vehicle to Grid, elektromobil je aktivní součástí elektrizační soustavy.

stanicích. Palubní nabíječky komunikují přes standardizované protokoly s AC nabíjecími body a umí přijímat povely o tom, jaký mají odebrat výkon.

- DC nabíjení

Moderní EV disponují možností DC nabíjení, které běžně dosahuje 150 kW, takové výkony budou v budoucnu velkou zátěží pro distribuční síť. Samotné DC nabíjecí stanice jsou rozděleny do těchto kategorií.

1. Nízký výkon (Low Power Charging):

- **Výkon:** do 50 kW
- **Použití:** vhodné pro starší nebo levnější nabíječky. Poskytuje relativně pomalejší nabíjení, které je však stále rychlejší než AC nabíjení. Typické pro městské prostředí a některé veřejné nabíječky.

2. Střední výkon (Fast Charging, FC):

- **Výkon:** 50 kW - 150 kW
- **Použití:** Tento výkon je typický pro většinu veřejných rychlonabíječek. Umožňuje rychlé nabíjení, které může trvat přibližně 30-60 minut na dosažení 80% kapacity baterie. Ideální pro nabíjení během nákupů nebo krátkých zastávek.

3. Vysoký výkon (Ultra-Fast Charging, UFC):

- **Výkon:** 150 kW a více
- **Použití:** dostupný na nejmodernějších rychlonabíječkách. Umožňuje velmi rychlé nabíjení, často v řádu 20-30 minut pro dosažení 80% kapacity baterie. Vhodné pro dálniční odpočívadla a místa, kde je potřeba rychle dobít baterii na dlouhých cestách.

Smart grids

Inteligentní distribuční síť, neboli smart grids, představují revoluci v oblasti správy a optimalizace distribuce elektrické energie. Díky integraci pokročilých informačních a komunikačních technologií s tradičními energetickými sítěmi umožňují tyto systémy efektivní monitorování, analýzu, řízení a komunikaci mezi různými součástmi sítě. Cílem je zvýšit efektivitu, zabezpečení, spolehlivost a udržitelnost dodávek elektrické energie [22][23].

Smart grids zahrnují

1. **Pokročilé měřicí systémy (Advanced Metering Infrastructure, AMI):** Tato technologie zahrnuje inteligentní měřiče (smart meters), které poskytují real-time data

o spotřebě a umožňují dálkové čtení a ovládání spotřeby. Tyto systémy jsou součástí moderního čtyřkvadrantového měření.

2. **Komunikační infrastruktura:** Zahrnuje širokopásmové a bezdrátové komunikační technologie, které propojují různé části sítě, umožňují rychlý přenos dat a zajišťují interakci mezi spotřebiteli a distributory.
3. **Automatizace distribuční sítě:** Využívá senzory a řídicí systémy pro automatické monitorování a řízení sítě, včetně technologií jako je reclosing a self-healing, které přispívají k rychlé obnově sítě po poruchách.

Čtyřkvadrantní měření

Průběžné čtyřkvadrantní měření v kontextu elektroměrů se týká schopnosti měřit a zaznamenávat elektrickou energii ve čtyřech kvadrantech [24], což zahrnuje dodávání a odběr energie ve směrech pozitivním i negativním. Toto měření je klíčové pro sledování složitých elektrických systémů, zejména v oblastech, kde dochází k vzájemnému přenášení energie mezi zdroji a spotřebiteli, jako je například v případě obnovitelných zdrojů energie, baterií nebo elektromobilů.

Proces měření začíná v elektroměru, který je zařízením určeným k monitorování elektrického výkonu. Elektroměr sleduje tok energie, měří napětí, proud a další parametry v reálném čase. Díky čtyřkvadrantnímu měření je schopen zachytit a rozlišovat, zda je činná a jalová energie odebírána, nebo dodávána do sítě.

Data z elektroměrů jsou následně odesílána prostřednictvím komunikační sítě k centrálnímu serveru nebo do cloudové platformy. Tato data jsou důležitá pro monitorování a správu energetického systému, umožňují fakturaci spotřeby, optimalizaci distribuce elektrické energie a poskytují užitečné informace pro řízení a plánování sítě. Odesílání dat umožňuje v reálném čase sledovat a reagovat na změny v energetickém toku a zvyšuje efektivitu celého elektrického systému.

Vliv nových trendů na provoz sítě

Adaptace na nové trendy v energetice je pro smart grids nezbytná, jelikož se energetický sektor rychle vyvíjí. Některé z klíčových trendů, které mají významný dopad na provoz sítě, zahrnují:

1. **Integrace obnovitelných zdrojů:** Rozšíření solárních a větrných elektráren zvyšuje variabilitu a nepředvídatelnost v produkci energie. Smart grids musí být schopné efektivně integrovat tyto zdroje, optimalizovat jejich využití a zároveň zaručit stabilitu sítě.
2. **Rozvoj elektromobility:** Masové přijetí elektrických vozidel znamená zvýšení celkové poptávky po elektrické energii a nové vzory spotřeby. Smart grids potřebují inteligentní

řídící systémy pro nabíjecí stanice, aby bylo možné zvládnout špičkové zatížení bez přetížení sítě [24].

3. **Decentralizace výroby energie:** s rostoucím počtem malých, lokálních zdrojů energie, jako jsou domácí solární a větrné elektrárny, se síť stává více decentralizovanou. Tento trend vyžaduje pokročilé managementové strategie pro distribuci a vyrovnavání nabídky a poptávky po energii v reálném čase.
4. **Digitalizace a data analytics:** Sběr a analýza dat se stávají stále důležitějšími pro optimalizaci operací smart grids. Využití big data a strojového učení umožňuje předpovídat chování sítě a optimalizovat rozhodování na základě reálných dat [26].

Chránění v inteligentních distribučních sítích (Smart Grids)

Chránění v inteligentních distribučních sítích je klíčové pro zajištění bezpečnosti, spolehlivosti a resilience systému. Moderní technologie ochrany a kontrolní systémy, které se využívají v smart grids, zahrnují následující hlavní komponenty a strategie:

1. **Pokročilé řídicí systémy:** Využívání automatizovaných systémů pro detekci poruch a okamžitou reakci, což zahrnuje izolaci a obnovení dodávky energie v postižených segmentech sítě bez zásahu člověka.
2. **Digitální ochranné relé:** Tato zařízení neustále monitorují elektrické parametry v síti, jako jsou napětí, proud, frekvence a fáze, a na základě přednastavených kritérií aktivují ochranné mechanismy.
3. **Automatizovaný reclosing:** Jedná se o technologii, která umožňuje automatické znovuzapojení vypnutého obvodu po krátkodobém výpadku, což často dokáže rychle obnovit dodávku energie bez trvalého poškození infrastruktury.
4. **Self-healing systémy:** Tyto systémy využívají algoritmy pro rychlou diagnostiku a lokalizaci poruchy v síti. Po identifikaci problému systém automaticky přepne cesty toku energie tak, aby minimalizoval dopad poruchy na zákazníky a obnovil dodávku energie v nejkratším možném čase [27][28].

Matematický model

Matematický model smart grids se typicky opírá o následující aspekty:

- **Modely zatížení a generace:** Modelují poptávku a nabídku energie v síti.
- **Optimalizační modely:** Slouží k optimalizaci provozu sítě, například minimalizaci ztrát, optimalizaci toku energie, nebo managementu peak demandů.
- **Modely spolehlivosti:** Hodnotí pravděpodobnost a dopady výpadků v síti a modelují funkce self-healing.

Matematicky lze jednoduchý optimalizační model pro smart grid formulovat takto:

$$\min \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i \in G} c_i (g_i(t)) + \sum_{j \in D} p_j (d_j(t)) \right) \quad (10)$$

Kde:

$g_i(t)$ je výroba generátoru i v čase t ,

$d_j(t)$ je spotřeba spotřebiče j v čase t ,

c_i a p_j jsou funkce nákladů na výrobu a penalizace za spotřebu.

Smart grids představují klíčový prvek modernizace energetických systémů. Díky využití pokročilých technologií a matematických modelů přináší významné výhody v podobě zvýšené efektivity, spolehlivosti a flexibility energetického systému, což umožňuje lepší integraci obnovitelných zdrojů a vyšší stupeň udržitelnosti.

2.2 Nové struktury a služby

Flexibilita

Flexibilita v elektrizačních soustavách je klíčová pro zajištění spolehlivosti a stability sítě v kontextu rostoucí integrace obnovitelných zdrojů energie, jako jsou větrné a solární elektrárny, které jsou povahou své produkce proměnlivé a nepředvídatelné. Flexibilita elektrizační soustavy se vztahuje k schopnosti energetického systému reagovat na fluktuace v nabídce a poptávce po energii [26][29]. To zahrnuje rychlé přizpůsobení výroby energie, spotřeby, nebo obojího, aby se udržela rovnováha mezi nabídkou a poptávkou a zároveň zajištěna kvalita a spolehlivost dodávek.

Flexibilita může být dosažena prostřednictvím různých prostředků:

1. **Flexibilní výroba energie:** Tradiční zdroje jako jsou plynové turbíny nebo hydroelektrárny, které mohou rychle zvyšovat nebo snižovat svou výrobu.
2. **Skladování energie:** Technologie jako jsou bateriové systémy nebo přečerpávací hydroelektrárny, které umožňují ukládat přebytečnou energii a uvolňovat ji, když je potřeba.
3. **Poptávková strana (demand side management):** Řízení poptávky a programy pro odpověď na poptávku, které stimulují spotřebitele k redukci nebo odkladu spotřeby energie během špiček.
4. **Mezinárodní spolupráce:** Propojení s jinými elektrizačními soustavami, které umožňuje dovoz nebo vývoz energie v závislosti na potřebách.

Matematický model flexibility

Matematický model pro kvantifikaci flexibility může být založen na dynamickém modelování poptávky a nabídky. Jedním z přístupů je použití optimalizačního modelu, který minimalizuje celkové náklady na dodávku energie za zahrnutí různých zdrojů flexibility. Model může být formulován jako lineární programovací problém:

$$\min \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i \in G} c_i (g_i(t)) + \sum_{j \in D} p_j (d_j(t)) \right) \quad (11)$$

Kde:

T je časový horizont,

G je sada generátorů,

D je sada spotřebičů,

c_i jsou náklady na generaci energie generátorem i ,

p_j jsou náklady spojené s redukcí poptávky zařízením j ,

$g_i(t)$ je výroba energie generátorem i v čase t ,

$d_j(t)$ je spotřeba energie zařízením j v čase t .

Tento model umožňuje simulaci různých scénářů a hodnocení, jak různé strategie flexibility mohou pomoci vyrovnat nabídku s poptávkou a minimalizovat náklady.

Integrace flexibility do elektrizačních soustav přináší technologické, regulační a tržní výzvy. Technologické inovace, vývoj nových business modelů a aktualizace regulace jsou klíčové pro úspěšnou implementaci flexibilních řešení. Flexibilita rovněž otevírá nové příležitosti pro tržní účastníky, včetně prodejců energie, spotřebitelů, provozovatelů přenosových systémů a agregátorů, aby optimalizovali své operace a zlepšili ekonomiku svých aktivit.

Flexibilita je základním stavebním kamenem moderních elektrizačních soustav, který umožňuje efektivní začlenění obnovitelných zdrojů energie a zajišťuje stabilitu sítě i při výkyvech v nabídce a poptávce. Rozvoj a implementace flexibilních řešení vyžaduje komplexní přístup zahrnující technologie, regulaci a tržní mechanismy.

Sdílená energetika, energetická společenství, komunitní energetika

Mezi pojmy sdílená energetika, energetická společenství a komunitní energetika existují jisté rozdíly, i když se často překrývají a jsou vzájemně propojené. Zde je základní vysvětlení každého z těchto termínů:

1. **Sdílená energetika:** Tento termín obecně odkazuje na systémy nebo modely, kde více účastníků společně využívá energetické zdroje nebo infrastrukturu. Sdílená energetika může zahrnovat sdílení obnovitelných zdrojů, jako jsou solární panely nebo větrné

turbíny, mezi domácnostmi nebo podniky ve stejné oblasti. Cílem je optimalizovat využití dostupných zdrojů a snížit náklady.

2. **Energetická společenství:** Energetická společenství jsou specifickým typem sdružení, která si klade za cíl podporovat lokální a udržitelnou výrobu energie. Tato společenství jsou často formálně organizována a mohou být založena občany, místními vládami nebo malými podniky. Energetická společenství se snaží o demokratickou správu a spravedlivé rozdělení výhod z výroby a spotřeby energie mezi své členy.
3. **Komunitní energetika:** Komunitní energetika se zaměřuje na projekty obnovitelné energie, které jsou vlastněné a spravované komunitami. Tyto projekty často usilují o to, aby místní obyvatelé nejen spoluvlastnili energetické zdroje, ale také aby z nich těžili ekonomicky. Komunitní energetika může zahrnovat různé formy spoluvlastnictví, spolupráce a benefitů pro komunitu. Účelem komunitní energetiky je podpora decentralizace a demokratizace (zvýšeného zapojení menších hráčů) energetiky, zvyšování zapojení obnovitelných zdrojů energie, zvyšování energetické účinnosti a opatření proti energetické chudobě a to zejména na úrovni domácností a malých a středních podniků. Legislativně podpora energetických komunit a komunit obnovitelných zdrojů energie vychází z požadavků Směrnic (EU) 2018/2001 o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů a (EU) 2019/944 o společných pravidlech pro vnitřní trh s elektřinou.

Současný stav poznání však neobsahuje technické a ekonomické modely fungování těchto komunit v ČR. Rovněž legislativní ukotvení problematiky komunit ve výše uvedených předpisech je do značné míry obecné a vyžaduje upřesnění pro podmínky ČR.

Tyto pojmy se mohou v různých kontextech mírně lišit a mohou být specifické pro právní a regulační rámce jednotlivých zemí nebo regionů. Přesto všechny sdílejí společný zájem o decentralizaci, lokalizaci a demokratizaci energetického sektoru.

Komunitní energetika je přístup k plánování, výrobě a správě energetických zdrojů na lokální úrovni, který umožňuje komunitám mít větší kontrolu nad svými energetickými zdroji a zvyšovat účinnost a udržitelnost své energetické spotřeby. Tento dokument poskytuje přehled o principech komunitní energetiky a zahrnuje matematický model pro analýzu a optimalizaci energetického systému na komunitní úrovni.

Koncepty a aplikace komunitní energetiky

Komunitní energetika zahrnuje širokou škálu technologií a strategií, které umožňují komunitám využívat místní energetické zdroje, jako jsou obnovitelné zdroje energie, kombinovaná výroba tepla a elektřiny a energetické úspory. Klíčovými koncepty jsou:

1. **Decentralizace:** Přemístění produkce energie blíže k místu spotřeby, což minimalizuje ztráty v distribuční síti a zvyšuje energetickou efektivitu.
2. **Demokratizace:** Zapojení občanů a místních podniků do rozhodovacích procesů týkajících se využívání energetických zdrojů.
3. **Digitalizace:** Využití pokročilých technologií pro monitorování, řízení a optimalizaci produkce a spotřeby energie.
4. **Udržitelnost:** Zaměření na obnovitelné zdroje a energetickou účinnost k podpoře ekologické udržitelnosti.

Matematický model komunitní energetiky

Pro návrh a optimalizaci energetických systémů na komunitní úrovni lze využít matematický model, který zohledňuje různé zdroje energie, poptávku po energii a možnosti jejího ukládání. Model může být formulován jako optimalizační úloha, kde cílem je minimalizace celkových nákladů na energii při splnění všech požadavků na spolehlivost a udržitelnost.

Výzvy a příležitosti

Implementace komunitní energetiky čelí technologickým, finančním a regulačním výzvám, ale také nabízí řadu příležitostí:

- **Technologické výzvy:** Integrace heterogenních zdrojů a J pro některé komunity, ale státní podpora může tyto překážky zmírnit.
- **Regulační výzvy:** Právní a regulační rámce často nesledují rychlý vývoj technologií a modelů obchodování v energetice, což vyžaduje jejich postupné přizpůsobování.

Virtuální elektrárna

Virtuální elektrárny (VE) představují inovativní koncept v oblasti správy a distribuce elektrické energie, který umožňuje integraci a optimalizaci různých zdrojů energie prostřednictvím moderních informačních a komunikačních technologií. Cílem je efektivní využití distribuovaných zdrojů energie, jako jsou malé větrné elektrárny, fotovoltaické systémy, bateriové úložiště a kogenerační jednotky, které jsou propojeny a řízeny tak, aby fungovaly jako jedna velká elektrárna [30].

Základní principy virtuálních elektráren

Virtuální elektrárna koordinuje výrobu a spotřebu energie z různých geograficky rozptýlených zdrojů pomocí pokročilých softwarových platforem a algoritmů pro správu dat. VE nejen že zvyšuje efektivitu využívání lokálních zdrojů energie, ale také přispívá k stabilizaci elektrické

sítě integrací obnovitelných zdrojů energie a poskytováním regulačních služeb, jako je frekvenční a napěťová regulace.

Matematický model

Modelování virtuálních elektráren je založeno na optimalizačních algoritmech a prediktivním řízení. Základem je matematický model, který zahrnuje:

- **Model predikce:** Využívá historická a reálná data pro predikci výroby energie z obnovitelných zdrojů a spotřeby energie. Modely často využívají metody strojového učení pro zvýšení přesnosti predikce.
- **Optimalizační model:** Zahrnuje algoritmy pro optimalizaci výroby a spotřeby v rámci sítě s cílem minimalizovat náklady a zvýšit efektivitu energie. Model může zahrnovat lineární programování, kvadratické programování, nebo vícekriteriální optimalizaci.

Matematicky lze optimalizační problém virtuální elektrárny formulovat následovně:

$$\min_x f(x) \sum_{t=1}^T (c_t \cdot g_t(x_t) + d_t(x_t)) \quad (12)$$

Kde:

x_t jsou rozhodovací proměnné, které zahrnují výkon zdrojů energie,

$f(x)$ je celková funkce nákladů, kterou VE se snaží minimalizovat,

$g_t(x_t)$ a $d_t(x_t)$ představují generaci energie a poptávku v čase t ,

c_t jsou variabilní náklady na výrobu energie v čase t .

Technologické a ekonomické aspekty

Virtuální elektrárny vyžadují sofistikované technologické infrastruktury pro sběr a analýzu dat, komunikaci mezi nejen výrobními komponenty a i a realizaci rozhodnutí v reálném čase. Ekonomické přínosy zahrnují snížení nákladů na energii, lepší integraci obnovitelných zdrojů a zvýšenou spolehlivost dodávek energie.

Virtuální elektrárny představují klíčový krok k decentralizované a udržitelné energetické síti, která efektivně využívá místní zdroje a zvyšuje bezpečnost dodávek energie, dále umožňují snížit cenu a zvýšit dostupnost služeb výkonové rovnováhy. Díky využití pokročilých matematických modelů a moderních ICT technologií VE přináší nové možnosti pro optimalizaci a management energetických systémů.

2.4 Podpůrné služby v ČR

Podpůrnými službami (dále jen „PpS“) se rozumí prostředky pro zajišťování systémových služeb²⁴ (dále jen „SyS“). Jsou definovány jako činnosti fyzických nebo právnických osob pro zajištění provozování elektrizační soustavy, kvality a spolehlivosti dodávky elektřiny. Poskytují je jednotliví uživatelé přenosové soustavy. Poskytování PpS je v ČR založeno na tržních principech, společnost ČEPS pořádá výběrová řízení na PpS. Společnost ČEPS je povinna zajistit tyto služby, pokud možno s nejnižší cenou. Dále musí upřednostňovat PpS z ČR, možnost nákupu PpS ze zahraničí má, pokud nelze uspokojit poptávku v ČR.

Každý výrobce elektřiny má právo nabízet a poskytovat podpůrné služby, pokud dodrží podmínky stanovené Pravidly provozování přenosové soustavy nebo Pravidly provozování distribuční soustavy. Zároveň je povinen při stavbě nového zdroje o výkonu nad 30 MW podpůrné služby poskytovat [10].

2.4.1 Služby výkonové rovnováhy (SVR)

Jedná se o podskupinu PpS [1], tato skupina byla nově definována v rámci revize kodexu PS v roce 2020 a týkala se podpůrných služeb zajišťujících vyrovnávání výkonu v elektrizační soustavě. Při této revizi došlo ke změně názvosloví PpS a dále byly změněny technické požadavky na tyto služby. Stále však platí, že se jedná o služby, které zajišťují stabilitu a bezpečnost provozu elektrizační soustavy. Dodavatelé SVR se smluvně zavazují k dodávce regulačního výkonu v závislosti na aktuálních potřebách ES.

Zálohy pro automatickou regulaci frekvence FCR

Zálohy pro automatickou regulaci frekvence FCR [34] jsou lokální automatickou funkcí, spočívající v přesně definované změně výkonu jednotky v závislosti na odchylce frekvence od zadané hodnoty. Změnu výkonu jednotky, která je realizovaná pomocí proporcionálního regulátoru (korektoru frekvence) v závislosti na odchylce frekvence udává regulační rovnice:

$$\Delta P_{KORf} = -\frac{100}{\delta} \cdot \frac{P_n}{f_n} \cdot \Delta f \quad (13)$$

$$\text{respektive } \Delta P_{KORf} = -K \cdot \Delta f \quad (14)$$

²⁴ Činnosti provozovatele přenosové soustavy (ČEPS, a.s.) pro zajištění spolehlivého provozu elektrizační soustavy s ohledem na provoz v rámci propojených elektrizačních soustav.

Kde:

ΔP_{KORf}	je požadovaná změna výkonu jednotky (příspěvek FCR) (MW)
P_n	je nominální výkon jednotky (MW)
Δf	je odchylka frekvence od zadané hodnoty (Hz) $\Delta f = f_{SKUT} - (f_{ZAD} + \Delta f_{ZADKOR})$
S	je statika korektoru frekvence (%)
K	je zesílení korektoru frekvence (dříve výkonové číslo) (MW/Hz)
f_n	je jmenovitá hodnota frekvence (50 Hz)
f_{SKUT}	je skutečná hodnota frekvence (Hz)
f_{ZAD}	je žádaná hodnota frekvence – obvykle jmenovitá hodnota frekvence (Hz)
Δf_{ZADKOR}	je korekce žádané hodnoty frekvence (Hz)

Tato služba nahrazuje službu “Primární regulace frekvence bloku – (PR)“, hlavní změna je, že je možné poskytovat službu FCR na jednotkách BESS. Další změnou je minimální poskytovaný výkon služby, který klesl z 3 MW na 1 MW. Toto snížení bylo provedeno pro snazší dostupnost jednotek pro poskytovatele, to poté vede na zvýšení nabídky poskytovatelů a snazší dostupnost pro PPS. Tato změna je pozitivní pro decentralizovanou energetiku, protože umožňuje poskytovat službu bez potřeby velkého konvenčního zdroje a nyní je možné stát se poskytovatelem například s fotovoltaickou elektrárnou, kogenerační jednotkou, dieselagregátem v kombinaci s BESS.

Zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s automatickou aktivací aFRR

aFRR jsou zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy [34] s automatickou aktivací realizované prostřednictvím změny hodnoty výkonu regulované jednotky, jak je požadováno regulátorem frekvence a salda předávaných výkonů. Míra využití aFRR je dána algoritmem regulátoru dispečinku ČEPS.

Tato služba nahrazuje službu “Sekundární regulace P bloku (SR)“ i zde došlo ke snížení minimálního výkonu na jednotce na 1 MW a to z původního výkonu 20 MW (kde platilo, že rozsah byl -10 MW až 10 MW). Další novinkou je tedy, že služba již není symetrická a není nutné poskytovat stejný regulační výkon kladný a záporný.

Zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s manuální aktivací mFRRt

mFRRt jsou manuálně ovládané zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy [34] realizované poskytnutím mFRRt+ nebo mFRRt- jednotkou do t minut od příkazu dispečinku ČEPS. Službu výkonové rovnováhy mFRRt je možno poskytovat ve dvou variantách pro čas t nabývající

hodnoty $t = 5$ minut a $t = 15$ minut. Tyto hodnoty odpovídají době do plného náběhu těchto služeb.

Tato služba nahrazuje službu “Minutová záloha (MZt)” došlo ke snížení minimálního výkonu na jednotce na 1 MW v obou případech, z původního výkonu 30 MW $t = 5$ minut a z 10 MW pro $t = 15$ minut. Doba aktivace zůstala stejná, 4 hodiny pro $t = 5$ minut a neomezeně pro $t = 15$ minut.

Proces náhrady záloh RR

RR jsou náhrady pro zálohu [34], realizované poskytnutím sjednané regulační energie **RR+** nebo **RR-** jednotkou do 30 minut od příkazu dispečinku ČEPS.

Tato služba vznikla místo služby “Snížení výkonu (SV30)”, minimální velikost zálohy klesla na 1 MW místo původních 30 MW, nově se jedná o službu certifikovanou a může se jednat o dodávku kladné i záporné regulační energie.

2.4.2 Ostatní podpůrné služby

Pro ostatní podpůrné služby se podmínky již delší dobu neměnily, jedná se služby, pro které platí, že jsou sjednávány v rámci individuální smlouvy s ČEPS a.s. Tyto služby nemají vliv na probíhající změny v energetice [34].

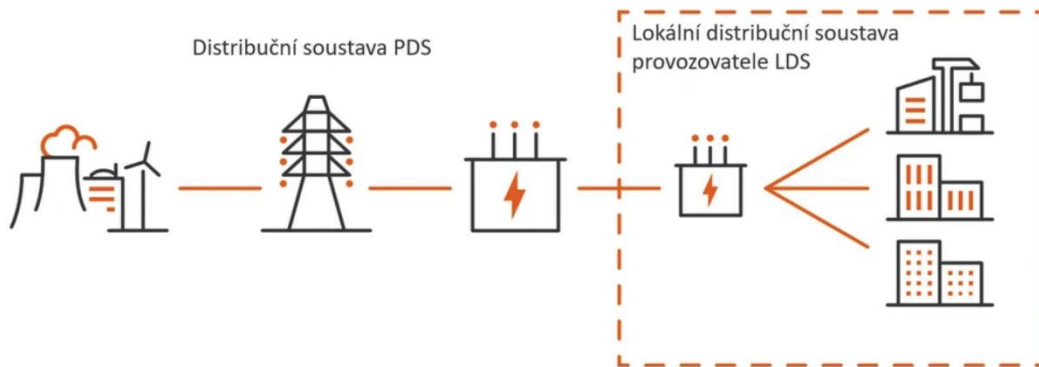
- Sekundární regulace U/Q (SRUQ)
- Schopnost ostrovního provozu (OP)
- Schopnost startu ze tmy (BS)

2.4.3 Význam podpůrných služeb v decentralizovaných soustavách

Vzhledem ke změnám v požadavcích na podpůrné služby se možnosti jejich poskytování zpřístupnily malým výrobním tedy prvkům decentralizovaných soustav, LDS a například velkým průmyslovým podnikům. Soustavám s více vstupními energonositeli se nabízí možnost snížit, nebo zvýšit svůj výkon pouze přepnutím na jiný zdroj a tím poskytnout SVR. Dále se nabízí akumulace elektrické energie do tepla, případně využívání kogeneračních jednotek pro výrobu tepla. v neposlední řadě je možné poskytovat SVR pomocí bateriových úložišť, které dnes již některé soustavy využívají pro zkvalitnění dodávky elektrické energie v případě citlivých technologií, kde i krátký výpadek může způsobit zdlouhavé najíždění.

2.5 Lokální distribuční soustava (LDS)

Lokální distribuční soustavy jsou alternativou k dodávce elektrické energie od velkých distribučních společností. Podstatou LDS je, že její provozovatel je zpravidla připojen k regionálnímu distributorovi, je tedy sám zákazníkem distribuční společnosti, ale dále přebírá jeho funkci pro menší odběratele.



Obrázek 8 Schéma lokální distribuční sítě. [35]

Provozovatel LDS nakupuje elektřinu za velkoobchodní ceny a zároveň s menším distribučním poplatkem než koncový zákazník, to proto, že musí zajišťovat měření, fakturaci a hlavně samotnou distribuci energie. Díky této pozici má možnost například nastavovat svým zákazníkům vysoký a nízký tarif za dodanou energii, a protože se jedná z hlediska distribuce pouze o malé území s malým počtem účastníků, může toto nastavování provádět s mnohem větší flexibilitou než velká distribuční společnost. v rámci LDS může navíc připojovat zdroje a pracovat s nimi efektivněji, případně využívat akumulace energií. Typické je, že provozovatel dodává v rámci LDS teplo, jehož přípravu může optimalizovat. Tato pozice v současné době otevírá dveře k poskytování podpůrných služeb, poskytování regulační energie a hlavně přizpůsobení se nově volatilnímu trhu s energiemi. Lokální distribuční sítě také efektivně využívají veškeré prvky decentralizovaných soustav.

3. Inovativní přístup k provozu decentralizované distribuční soustavy v rámci LDS a velkých spotřebitelů energií

V současné době jsou ve většině případů LDS provozovány jako běžné distribuční sítě v klasické energetice, jedná se však o část sítě, kde lze principy decentralizované energetiky aplikovat nejnázem. Důvody jsou prosté, provozovatel LDS je v dané síti většinou zároveň jediným obchodníkem, musí být držitelem licence pro distribuci a obchod s elektřinou, většina energetických komponent je v jeho vlastnictví, případně má možnost ovlivňovat jejich chod

a má naprostý přehled o energetických tocích a potřebách v těchto sítích. v této části bude popsán matematický model pro optimalizaci spotřeby LDS, případně areálu s velkou spotřebou energie s více druhy energonositelů.

3.1 Současný stav poznání

V oblasti energetiky LDS a energetiky velkooběratelů existuje na trhu mnoho řešení pro efektivní hospodaření s energiemi [42][43]. Tato řešení byla však vyvíjena pro “klasickou energetiku“, tedy pro stav do roku 2021 kdy se trh s energiemi změnil v důsledku skokového růstu cen regulačních energií a podpůrných služeb. Tato řešení jsou primárně určena k analýze mimořádných provozních stavů za účelem vyrovnaní spotřeby pro dodržení sjednaných výrobních diagramů. Řešení s opačným přístupem, tedy případy kdy v dané LDS chceme nerovnoměrnou spotřebu za účelem vyrovnaní výkonové bilance v přenosových a distribučních sítích se od roku 2018 objevují s rychlým nástupem OZE a z toho plynoucího nevyrovnaného výrobního diagramu. v současné době však není v ČR dokončený projekt, ani produkt využívající komplexní optimalizace spotřeb energií v LDS, průmyslových zónách, komerčních objektech nebo souborech budov.

3.2 Cíle vytvořeného modelu

Prezentovaný model má za cíl zásadně změnit přístup k provozování LDS. Jde o kombinaci využití vytvořených regresních vzorců charakterizujících spotřebu energií v LDS, které zahrnují vstupní data ovlivňující spotřebu energie, jako jsou změny počtu uživatelů budov, koeficienty typů odběrných míst, data o počasí, technické vlastnosti budov a provozovaných zařízení. Cílem je do optimalizace začlenit všechna dostupná data o soustavě, tedy i data, která se standardně pro energetické hodnocení nevyužívají, případně se nahrazují statistickými daty, která snižují informační hodnotu. Pro optimalizaci bude využita kombinace deterministického rozhodování (které má v energetice velmi spolehlivé výsledky) a strojového učení (metoda neuronových sítí) o nasazování spotřeb, což je vhodné pro případy s velkým množstvím typů vstupních dat.

Vedlejším efektem tohoto modelu bude kladný vliv na rovnováhu v distribučních a přenosových sítích, snížení nákladů na systémové služby [44], lepší využití OZE [45][45] a tím pádem snížení emisí CO₂.

Celkově může řízení dle navrženého modelu navíc přispívat ke stabilizaci cen na v současné době volatilním energetickém trhu.

Podstatou modelu bude řízení energetických zdrojů na straně spotřeby i výroby s predikcí. Uvažovány jsou LDS s přítomností kogeneračních jednotek, bioplynových stanic, plynových kotlů, elektrických kotlů, akumulčních nádrží, ledobank a také nabíjecích stanic pro elektromobilitu.

Výstupem modelu je případná řídicí strategie pro akční členy v modelované LDS.

3.3 Metodický postup tvorby modelu

Při tvorbě modelu je potřeba si nejdříve ujasnit jaká budou vstupní data, která budou použita pro modelování soustavy, predikci a optimalizaci. z tohoto pohledu je potřeba data rozdělit do skupin, přiřadit jim důležitost a spojitosti s danými druhy vyskytujících se energií, např. potřeba tepla na vytápění je ovlivňována venkovní teplotou, teplotou pláště budovy, počtem uživatelů budovy, nároky na výměnu vzduchu podle typu užití, kapacitou zásobníků tepla atd.

Jednou skupinou dat budou technické parametry prvků decentralizované soustavy, jako jsou například výkony, účinnosti, časové konstanty a další. Tato data jsou v podstatě okrajové podmínky pro optimalizace. k této skupině dat je nutné vytvořit odhad využití těchto prvků na základě další skupiny dat, kterou jsou historická data. Pro vytvoření odhadu provozního využití lze použít historická data ze soustavy, případně lze použít provozní strategie daných komponentů, které jsou obvykle určeny technologickými potřebami v dané soustavě. Pomocí regresivních metod strojového učení a hledáním extrémů lze najít vztahy mezi spotřebou energií na jednotlivých prvcích soustavy a ukazateli, kterými jsou například venkovní a vnitřní teploty, spotřeba elektrické energie, spotřeba tepelné energie, počet uživatelů atd. [46][47].

Třetí skupinou dat jsou data, která patří mezi data historická v případě trénování modelu nebo pro dimenzování nových prvků soustavy (akumulační prvky, zdroje energií), ale jejich povaha je z hlediska využití v modelu krátkodobá. Mezi tato data patří například ceny energií na spotovém trhu, poptávka pro regulační energii a počasí. Pro trénování modelu se využijí data historická za delší časový úsek (alespoň jeden rok), nicméně tato data se používají při postupné optimalizaci spotřeby tak jak jsou dostupná v přítomnosti, například spotová cena elektrické energie je známa na 34 h dopředu. Podle tohoto pravidla dostupnosti dat se provádí optimalizace na modelových datech, přičemž její výsledky slouží jako data pro trénování neuronových sítí. Po natrénování neuronových sítí (a kontrole správnosti nastavení parametrů modelu) slouží tato data pro optimalizaci v reálném čase.

Po rozdělení dat na skupiny jsou vytvořeny rovnice charakterizující jednotlivé prvky a dále jsou vytvořeny vztahy pro trendy spotřeb energií. Popsané úkony jsou nutné pro optimalizaci a řízení při deterministickém přístupu a společně vygenerovanými daty a údaji o okrajových podmínkách (jako jsou výkony spotřebičů a zdrojů) tvoří vstupy pro samotnou optimalizaci a tvorbu řídicí strategie.

Pro tvorbu modelu a testování modelu byla nasimulována data, která reprezentují LDS s rozsáhlou skupinou spotřebičů a zdrojů, dále byla uvažována akumulace tepla, chladu a elektrické energie (v bateriových úložištích).

3.4 Obecný model energetického systému

Energetickým systémem zde rozumíme lokální distribuční soustavu s více druhy energonositelů (elektrina, plyn, pára, horká voda, chlad, stlačený vzduch) a zároveň využívající akumulaci uvedených energonositelů. Celkově se tedy jedná o rozšíření stávající koncepce chytrých sítí (Smart Grids) o holistické chápání systému s možností globální optimalizace. v současné době ve velkých průmyslových podnicích je částečně energetický systém takto chápán a pracovníci se o optimální strategie pokoušejí, ovšem intuitivně na základě zkušeností bez komplexního přístupu chytrých sítí.

Uvažovaný systém obsahuje:

- Elektroenergetický systém (distribuční zařízení, měření, výrobní zdroje, akumulace)
- Systém vytápění a přípravu TV (kotle, tepelná čerpadla, rozvody tepla nízkopotenciálního (voda), rozvody tepla vysoko potenciálního (pára), akumulace páry a akumulace teplé vody)
- Systém chlazení (výrobní zařízení chladu, akumulace chladu (ledobanky))

3.4.1 Modely jednotlivých prvků

Modelování akumulace teplé/studené vody

Akumulace tepla je technicky jednoduchá, realizačně levná a umožňuje tak energeticky výhodný provozní režim. Ukládání energie do zásobníků tepla vyrovnává jak náhlé špičky krátkodobých odběrů/výroby, tak zároveň umožňuje při dostatečné velikosti dlouhodobější odložení odběru/výroby. Optimalizace spotřeby energie s tepelnou akumulací při proměnlivém tepelném zatížení je klíčová pro maximalizaci zisku.

Z hlediska modelování akumulace tepla je důležité vzít v potaz tepelné ztráty. Ty se skládají z těchto ztrát [48]:

- Ztráty vedením

$$P_{\lambda} = \frac{T_{vody} - T_{pláště}}{R_{th}} \quad (15)$$

Kde

- pro válcový segment lze z upravené Fourier Kirchhoffovy rovnice

$$k \cdot \frac{d}{dr} \left(A(r) \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (16)$$

získat vztah pro tepelný odpor

$$R_{th} = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot l} \text{ (K/W)} \quad (17)$$

(λ je součinitel tepelné vodivosti, r_1 je vnitřní poloměr, r_2 je vnější poloměr)

- Pro rovinou plochu

$$R_{th} = \frac{l}{A \cdot \lambda} \text{ (K/W)} \quad (18)$$

(A je plocha)

- Ztráty konvekcí

$$P_c = \alpha \cdot S \cdot (T_{pláště} - T_{okolí}) \quad (19)$$

- Ztráty sáláním

$$P_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot \left((T_{povrchu} + 273)^4 - (T_{okolí} + 273)^4 \right) \quad (20)$$

- Pro tyto ztráty platí vztah

$$P_c + P_r = P_\lambda. \quad (21)$$

Pro zjednodušení můžeme uvažovat $T_{pláště} \approx T_{okolí}$

Pak platí

$$P_{ztráty} = \frac{T_{vody} - T_{okolí}}{R_{th}} \quad (22)$$

Vztah pro teplotu akumulované vody

$$m \cdot c \cdot \frac{dT_{vody}}{dt} = P_{in} - P_{out} - P_{ztráty}. \quad (23)$$

Modelování parního akumulátoru

Parní akumulátor bude modelován bilančně a z tohoto hlediska je pro jeho modelování podstatné pouze nepřekročení jeho akumulční schopnosti [20], kterou určíme ze vztahu:

$$m_{pára} = \frac{h_{2v} - h_{1v} \cdot m_{voda}}{h_{1s}} \quad (24)$$

Kde:

$m_{pára}$ je akumulční schopnost výstupní (vyvíjené) páry v kg,

h_{2v} je měrná entalpie vody při tlaku vstupní páry v kJ/kg,

h_{1v} je měrná entalpie vody při tlaku výstupní páry v kJ/kg,

h_{1s} je měrná entalpie výstupní páry v kJ/kg,

m_{voda} je hmotnost vody pro akumulaci v kg.

Akumulace elektrické energie do bateriového úložiště

Modelování bateriových úložišť zahrnuje simulaci jejich nabíjení a vybíjení [17], životnosti a vlivu na síť. Základní matematický model může vypadat takto:

$$SOC_{t+1} = SOC_t + \frac{\eta_{\text{charge}} P_{\text{charge},t} - \frac{1}{\eta_{\text{discharge}}} P_{\text{discharge},t}}{E_{\text{capacity}}} \quad (25)$$

Kde:

SOC (State of Charge) je stav nabití baterie (%),

η_{charge} a $\eta_{\text{discharge}}$ jsou účinnosti nabíjení a vybíjení (%),

$P_{\text{charge},t}$ a $P_{\text{discharge},t}$ jsou výkony nabíjení a vybíjení v čase t (kW),

E_{capacity} je kapacita baterie (kWh).

Akumulace bioplynu

Akumulace bioplynu lze pro potřeby optimalizačního modelu modelovat pouze bilančně, standardně se totiž bioplyn pouze nízkotlakově stlačuje (skladování ve vacích) což nečiní přidané energetické nároky na skladování [49].

Modelování otopné soustavy

Standardně jsou budovy charakterizovány takzvaným celkovým součinitelem prostupu tepla, to je však parametr, který definuje pouze stavební provedení bez ohledu na užívání budovy a na její umístění. Pro účely navrženého modelu je vhodnější využít historii otopné soustavy [50][51]. Tím jsou myšleny dodávané tepelné výkony v čase a k nim přiřazená data o počasí. Z těchto dat lze vytvořit funkční závislost potřebného tepelného výkonu na počasí (většinou na venkovní teplotě) a na vnitřní teplotě. Aby byl výsledek co nejpřesnější, lze do hledání funkční závislosti přidat například data týkající se oblačnosti, síly a směru větru. Tento model nezahrnuje vliv akumulace obvodových konstrukcí budov, pro jak současné budovy kde je ztráta obálkou malá, tak pro staré budovy s tenkými zdmi toto zjednodušení nezpůsobí znatelnou chybu. Navíc pokud by toto zjednodušení nebylo relevantní, projevilo by se to na velikosti minima účelové funkce.

- výpočet tepelně technických vlastností budovy z historických dat (počasí, spotřeba energie)

Vytvoříme účelovou funkci (26)

$$err(k) = |k \cdot (T_{in} - T_{out}) - q| \quad (26)$$

Kde:

k je konstanta charakterizující otopnou soustavu (kW/K)

T_{in} vnitřní teplota budovy (°C)

T_{out} venkovní teplota (°C)

q výkon akumulace tepla (kW)

Koeficient charakterizující otopnou soustavu pak získáme nalezením minima účelové funkce (27)

$$k = \min_{k \in \mathbb{R}^+} err(k) \quad (27)$$

Celková spotřeba tepla otopné soustavy za dané období je poté dána vztahem (28)

$$E = \int_{t_0}^t k \cdot \Delta T(t) dt \quad (28)$$

Kde:

$$\Delta T = T_{in}(t) - T_{out}(t).$$

Tento postup identifikace je vhodný pro administrativní a bytové budovy, je také vhodný pro obchodní centra a výrobu bez potřeby technologického tepla. Pro výrobu, kde je potřeba technologického tepla násobně vyšší, než potřeba tepla pro vytápění, je však tato metoda neaplikovatelná. Pro takové provozy je ideální využít metody strojového učení. Můžeme použít strojové učení k tomu, abychom program naučili charakteristiku spotřeby tepla v závislosti na spotřebě elektrické energie pro technologii v letních měsících (kdy se netopí) a následně porovnávali s ostatními měsíci, abychom určili, kolik energie je potřeba na vytápění.

Po získání průběhu potřeby tepla na vytápění bez tepelných zisků z technologie je možné upravit účelovou funkci do tvaru.

$$err(k, k_{zisk}) = |k \cdot (T_{in} - T_{out}) - (k_{zisk} \cdot q_{technologie})| \text{ pro } \left(k \cdot (T_{in} - T_{out}) - (k_{zisk} \cdot q_{technologie}) \right) \geq 0 \quad (29)$$

$$err(k, k_{zisk}) = |0| \text{ pro } \left(k \cdot (T_{in} - T_{out}) - (k_{zisk} \cdot q_{technologie}) \right) < 0 \quad (30)$$

Kde:

k je konstanta charakterizující otopnou soustavu (kW/K),

k_{zisk} je součinitel využití tepelných zisků (-),

T_{in} Vnitřní teplota budovy (°C),
 T_{out} venkovní teplota (°C),
 q výkon akumulace tepla (kW).

Modelování kogenerační jednotky

Pro kogenerační jednotky platí, že celková účinnost (η_t) zůstává téměř konstantní [52], tedy i součet elektrické a tepelné účinnosti zůstává v širším rozsahu zatížení téměř konstantní. To je hlavní výhoda kogenerace, protože umožňuje efektivní využití energie paliva bez ohledu na aktuální poměr mezi výrobou elektřiny a tepla. Pokud pro zjednodušení budeme uvažovat, že se celková účinnost nemění, pak lze tepelnou a elektrickou účinnost vyjádřit následujícím vztahem.

$$\eta_{th} \left(\frac{P_{el}}{P_{elMAX}} \right) \approx \eta_{total} - \eta_{el} \left(\frac{P_{el}}{P_{elMAX}} \right) \quad (31)$$

Kde:

η_{total} je celková účinnost kogenerační jednotky (-),

η_{el} je elektrická účinnost kogenerační jednotky (-),

η_{th} je tepelná účinnost kogenerační jednotky (-),

P_{el} je aktuální elektrický výkon kogenerační jednotky (kW),

P_{elMAX} je elektrický výkon kogenerační jednotky, při kterém je dosahována maximální účinnost (kW).

Vzhledem k tomu, že pracovním rozsahu výkonů dochází k malé změně elektrické účinnosti, nedopustíme se výrazné chyby při uvažování konstantní účinnosti plynové kogenerační jednotky.

Na základě tohoto vztahu lze určit omezení doby provozu (případně výkonu) kogenerační jednotky tak, aby při optimalizaci nedošlo k nadvýrobě tepla, pro které by následně nebyl odbyt.

$$P_{top} - P_{aku} > \frac{\eta_{th} P_{el}}{\eta_{el}} \quad (32)$$

Kde:

P_{aku} je maximální výkon akumulace za časový úsek optimalizace, tedy podíl dostupné akumulační kapacity nádrže a času (kW),

P_{top} je výkon systému vytápění (kW).

Pokud není splněna podmínka, pak platí pro provoz zdroje omezení

$$P_{el MAXt} = \frac{\eta_{el} (P_{top} + P_{aku})}{\eta_{th}} \quad (33)$$

Případně můžeme omezit dobu maxima výroby elektrické energie

$$t_{el MAX} = \frac{Q_{aku}}{\frac{P_{el} \eta_{th}}{\eta_{el}} - P_{top}} \quad (34)$$

3.5 Obecný optimalizační přístup

Metodika hledání optima je rozdělena na základní kroky, které musí být v procesu inženýrské optimalizace provedeny (viz obr. 8).

Pro každou optimalizovanou soustavu je potřeba její znalost pro přípravu matematického vyjádření účelové funkce, a matematického modelu systému.

Metoda je, zjednodušeně řečeno, založena na následujících krocích. Je nadefinována účelová funkce, jejíž minimum odpovídá optimálnímu řešení. Účelová funkce závisí na množině parametrů modelu řešení, které odpovídají skutečným proměnným. Speciální numerický algoritmus provede hledání extrému této funkce s co nejmenším počtem iterací a vyhodnocení účelové funkce. Získané řešení je většinou optimální nebo blízké optimálnímu.

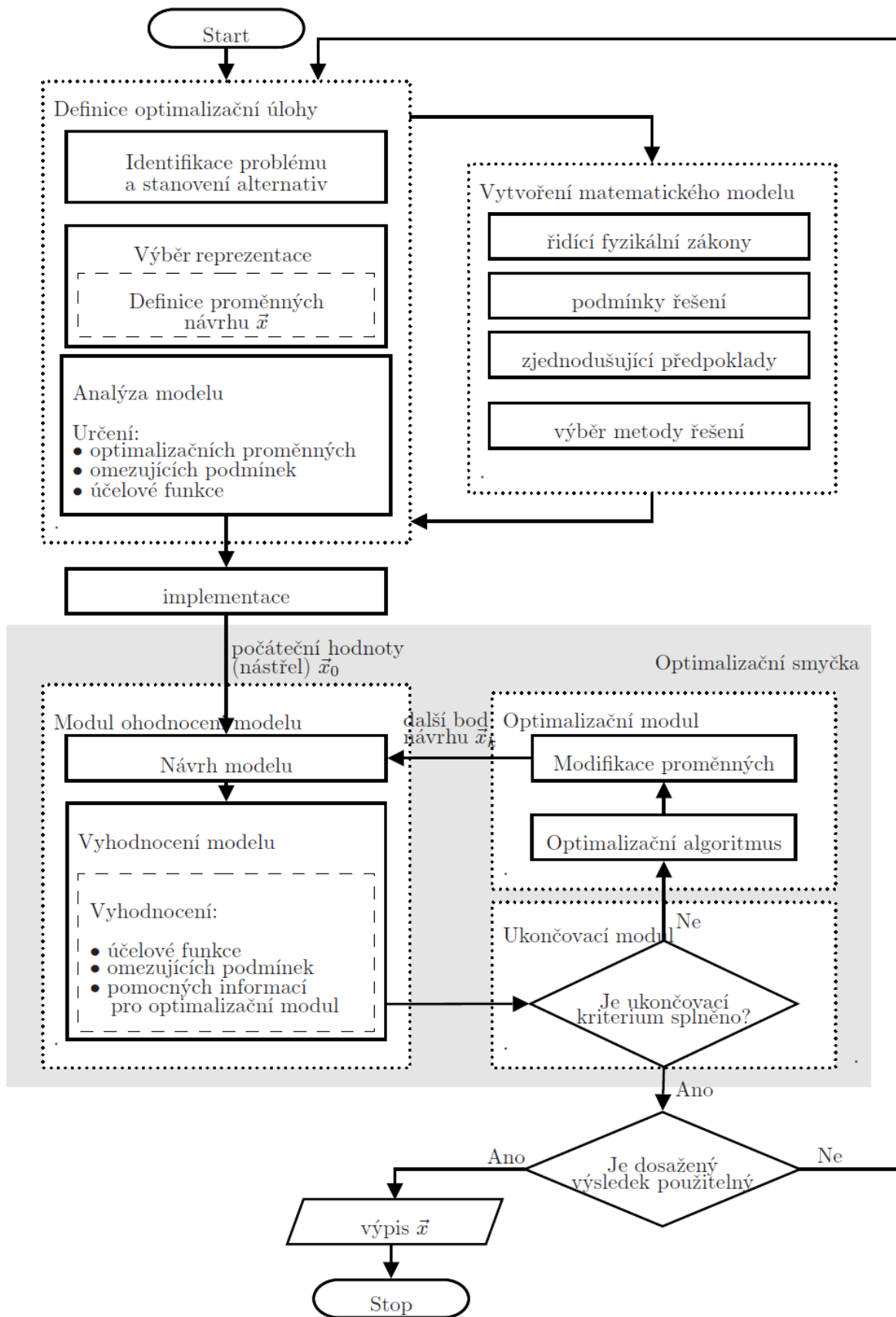
Na začátku optimalizační úlohy je snaha zkombinovat všechny různorodé parametry návrhu, jako například výkonová omezení, kapacity akumulace. Toto ohodnocení by mělo veškeré sledované vlastnosti vyčíslit jedním číslem.

Je důležité říci, že u úloh, u nichž nemůžeme přesněji odhadnout, jak by měl optimální výsledek vypadat, provádíme vícezkrokové (iterační) sestavování modelu a účelové funkce.

V prvním kroku je vytvořen jednodušší model s menším počtem parametrů (např. může být použit úsečkový model místo křivkového, snížení počtu dimenzí atd). Nad tímto modelem necháme pracovat optimalizační algoritmus (např. genetické algoritmy, simulované ochlazování atd.) a získaný výsledek nám pomůže udělat si obrázek o tom, jak pozměnit kritéria a rozsahy povolených hodnot optimalizačních proměnných v dalším zpřesněném modelu v dalším kroku. v průběhu optimalizační smyčky je možné na základě konvergence výsledků sledovat a vyhodnocovat chování modelovaného systému a hledat kritická místa.

Rovněž jsme v tomto prvním přiblížení rychleji upozornění na potenciální chybnou definici problému, když řešení GA konverguje k „divokým“ výsledkům, u kterých na první pohled vidíme, že nejsou použitelné.

V dalších krocích, na základě chování systému, návrhář aplikuje následně ruční úpravy na váhy kritérií a penalizačních funkcí v účelové funkci. Poté znovu zavolá optimalizační modul. Proces změn a volání optimalizačního modulu se opakuje, dokud optimalizační modul nezačne konvergovat k „rozumným“ modelům.



Obrázek 9 Schéma metodiky hledání optimální strategie

3.5.1 Definice optimalizační úlohy

Identifikace problému

V prvním kroku návrhu optimálního řešení pokrývání spotřeby je nutná přesná identifikace problému. Ta zahrnuje dokonalé vymezení problému, exaktní formulace jasných a přesných cílů a analýzu omezujících a podpůrných prostředků.

Dále je nutné stanovit globální kritéria (detailně budou rozvedena až při tvorbě matematického modelu). Těmi jsou parametry a ukazatele, podle kterých budeme řešení posuzovat. Na úplnosti těchto kritérií závisí úspěšnost rozhodovací analýzy. Mezi tyto kritéria vysoké úrovně můžeme například zahrnout:

- Zvýšení využití elektrické energie
- Snížení nákladů na energie

Jednotlivá kritéria jsou mezi sebou vzájemně provázána, neboť lze říci, že například zvýšení využití elektrické energie znamená snížení nákladů na energie.

Jen málo problémů je možno řešit jen jedním způsobem, proto v dalším kroku analyzujeme možné alternativy postupů a výsledků, stanovíme a dále rozvíjíme takový počet alternativ, který by vystihoval řešení problému při současném splnění globálních kritérií.

Při nepřesném provedení může být problém chybně a nesprávně vymezen, formulován a podmíněn a v dalších fázích se potom řeší jiný problém.

Reprezentace modelu

Úlohy optimálního návrhu spotřeb energií je možné klasifikovat do různých tříd. v pořadí podle výpočetní složitosti jsou to následující typy úloh:

- Optimalizace velikosti akumulací
- Optimalizace volby zdroje pro pokrytí energetické potřeby
- Optimalizace vazeb mezi různými typy energo nositelů
- Výpočet chodu systému v časové oblasti

Podle typu popisu soustavy pracujeme s určitým počtem parametrů (konstant) modelu, které určují jeho složitost a velikost. Počet nezávislých parametrů je ukazatelem komplexnosti systému.

Analýza modelu

Ucelené a detailní matematické podklady jednotlivých prvků jsou zpracované v předchozích kapitolách. Pro optimalizační modul je nutné definovat jeho tři základními součásti.

Optimalizační proměnné

Optimalizační proměnné reprezentují zvolené neznámé vstupní parametry matematického popisu optimalizační úlohy (jako např. parametry výše zmíněné hraniční reprezentace, výkony, teploty atd.) Jejich změnou ovlivníme hodnotu účelové funkce. v mnoha případech očekáváme odezvu optimalizovaného modelu na veličinu reprezentovanou funkcí. Průběh této funkce je právě ona hledaná informace, která je výstupem optimalizačního algoritmu. v tomto hledání používáme aproximace funkcí. Metod, jak množinou parametrů aproximovat vstupní funkci s definovanou přesností, se podobně jako typů geometrických reprezentací v praxi používá více. Nejznámější jsou mocninné (především Taylorova), Fourierovy a waveletové aproximační řady. Aproximační řadu lze obecně zapsat ve tvaru součtu (35), kde a_n jsou konstanty a g_n báze funkce, různé pro různé typy řad.

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n g_n(x) \quad (35)$$

Obecný tvar mocninné řady se středem v bodě x_0 je součet

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n (x - x_0)^n \quad (36)$$

Fourierova řada je součet

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{2\pi n}{\tau} x + b_n \sin \frac{2\pi n}{\tau} x \right) \quad (37)$$

Taylorova řada je součet

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!} (x - x_0)^n \quad (38)$$

V optimalizačních úlohách je samozřejmě použit omezený počet členů aproximační řady. Počet potřebných optimalizačních proměnných nám dává představu o složitosti modelovaného systému. u rozsáhlých energetických celků pracovat v jednom modelu s až desítkami optimalizačních proměnných

Omezující podmínky

Omezující podmínky dovolují optimalizačním proměnných dosahovat jen jistých hodnot. Omezující podmínky stanovujeme pro:

- rozsahy všech veličin (např. maximální výkon energetických zdrojů, akumulační kapacity)

- technologická omezení (např. strmost najíždění zdrojů, maximální změna průtoku páry ve výměnících nebo v parním akumulátoru)

Extrém tedy hledáme na nějaké množině, z níž hodnoty optimalizačních proměnných vybíráme. Implementaci omezujících podmínek je možno provést pomocí bariérových a nebo penalizačních funkcí.

$$F(\vec{x}) = f(\vec{x}) + P(\vec{x}) + B(\vec{x}) \quad (39)$$

Pro

$$h_k(\vec{x}) = 0, k = 1, \dots, m, \quad (40)$$

$$g_j(\vec{x}) = 0, j = 1, \dots, p, \quad (41)$$

zápis $f(\vec{x})$ označuje $f(x_1, x_2, \dots, x_k)$ Penalizační funkce bude mít následující tvar:

$$P(\vec{x}) = \sum_{k=1}^m (h_k(\vec{x}))^2 + \sum_{j=1}^p (\max[0, g_j(\vec{x})])^2 \quad (42)$$

Logaritmická bariérová funkce je definována jako:

$$B(\vec{x}) = -\psi \sum_{j=1}^p \log(g_j(\vec{x})) \quad (43)$$

Inverzní bariérová funkce má tvar:

$$B(\vec{x}) = -\psi \sum_{j=1}^p \frac{1}{g_j(\vec{x})} \quad (44)$$

Pokud jsou všechny omezující podmínky splněny, pak $P(\vec{x}) = 0$, pro \vec{x} blížící se zakázané oblasti $B(\vec{x}) \rightarrow \infty$.

Účelová funkce

Tvar účelové funkce musíme určit tak, abychom po provedení optimalizace získali konkrétní hodnoty optimalizačních proměnných požadovaného cíle. Například při určování konstanty k charakterizující otopnou soustavu a konstanty využití tepelných zisků bychom mohli chtít najít hodnoty charakterizující otopnou soustavu za celý rok. Účelová funkce tedy v sobě musí obsahovat minimálně veličiny jako jsou příkony technologií a teploty. Jednoduše řečeno musí svou hodnotu (anglicky fitness) zmenšovat [53].

Při hledání vhodných parametrů návrhu potřebujeme, aby jejich odezva v systému měla požadovaný tvar. Účelovou funkci vytvoříme proto tak, aby kvantitativně vyjadřovala míru shody obou průběhů průběhu požadovaného a průběhu příslušejícímu daným parametřům. k tomuto účelu je nejvíce používaná metoda nejmenších čtverců, která má pro případ porovnávání obou průběhů v n bodech tvar součtů kvadrátů odchylek

$$F(\vec{x}) = \sum_{i=1}^n \psi_i \left(y_i - f(\vec{x}; \vec{\beta}) \right)^2 \quad (45)$$

Kde $\vec{\beta} = \beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots$ jsou koeficienty, a $\vec{x} = x_0, x_1, x_2, \dots$ jsou optimalizační proměnné. Tento zápis je vhodné používat, pokud je funkce zadána v diskrétních bodech \vec{x}_i , ψ_i jsou váhy, pomocí kterých můžeme podle potřeby upravit vliv výsledku porovnání jednotlivých průběhů na hodnotu účelové funkce (často $\psi_i = 1, \forall i$).

Většina inženýrských optimalizačních úloh vyžaduje současné řešení více než jedné účelové funkce. v tomto případě mluvíme o vícekritériální optimalizaci. Pokud jsou všechny účelové funkce řízené svými nezávislými optimalizačními proměnnými, potom optimální řešení celého problému získáme postupnou optimalizací všech nezávislých účelových funkcí. v opačném případě (závislost na jedné množině optimalizačních proměnných) musíme zvolit některý z následujících postupů.

- B složením do jedné účelové funkce s vhodnou volbou váhového vektoru $\vec{\psi}$

$$F(\vec{x}) = \psi_1 F_1(\vec{x}) + \psi_2 F_2(\vec{x}) + \dots + \psi_N F_N(\vec{x}) \quad (46)$$

- optimalizací nejdůležitějšího kritéria a nastavením limitů z ostatních

$$\text{optimalizuj } F(\vec{x}) = F_2(\vec{x}) \text{ tak, že } F_1(\vec{x}) \leq A_1 \quad F_3(\vec{x}) \leq A_3 \dots F_N(\vec{x}) \leq A_N \quad (47)$$

Vytvoření matematického modelu

Pro vytvoření matematického modelu je potřeba analyzovat a matematicky popsat všechny důležité fyzikální aspekty celého systému. v jednotlivých krocích je postup následující:

- určení fyzikálních veličin, které systém popisují
- matematický popis fyzikálních zákonů dějů, které v systému probíhají (řídící modelové rovnice)
- určení podmínek řešení (obvykle počáteční a okrajové podmínky pro řešení diferenciálních rovnic)
- na základě analýzy sestaveného modelu přijmeme zjednodušující předpoklady a potřebné matematické úpravy (prioritizace předpokladů)

- rozdělujeme složitý systém na jednodušší subsystemy a zpracováváme je odděleně, ovšem se zřetelem na jejich vzájemné souvislosti,
 - zavádíme neexistující formy, např. ideální plyn, ideální kapalina,
 - předpokládáme nezávislost látkových vlastností na teplotě,
 - předpokládáme, že materiál je homogenní a izotropní,
 - u systémů, kde probíhají současně pomalé a rychlé děje, předpokládáme, že rychlý děj již dosáhl rovnovážného stavu,
 - zanedbáváme ztráty a některé závislosti na výkonech
 - nelineární závislosti linearizujeme,
 - zjednodušujeme geometrické proporce a volíme vhodné souřadnicové soustavy, abychom mohli co nejjednodušeji popsat geometrii systému,
- výběr metod řešení modelových rovnic s počátečními a okrajovými podmínkami

Výsledkem postupu jsme získali matematický model. Tento řešitelný matematický model nepopisuje zcela přesně skutečnost, ale při správných zjednodušujících předpokladech je přesnost dostačující.

Počáteční podmínka

Počáteční podmínka charakterizuje například stavy akumulací, vnitřní teploty na počátku optimalizovaného období, tj. v čase $t_0 = 0$.

Okrajové podmínky

- **Okrajová podmínka I. druhu (Dirichletova) [56]**

Je zadána teplota povrchu tělesa T_s jako funkce času.

$$T(t, \forall x \in \Gamma) = T_s(t) \quad (\text{K}) \quad (48)$$

Příklad: - ohřev kondenzující parou

- teploty v určité místnosti nebo zóně

- **Okrajová podmínka II. druhu (Neumannova) [56]**

Je zadána hustota tepelného toku \vec{q} na povrchu tělesa jako funkce času.

$$\vec{q}(t, \forall x \in \Gamma) = \vec{q}_S(t) = -\lambda_c \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x \in \Gamma} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (49)$$

Příklad: - tepelný tok obálkou budovy, stěnou akumulární nádrže

• **Okrajová podmínka III. druhu (Fourierova) [56]**

Podmínka spojitosti hustot tepelného toku na mezifázovém rozhraní proudící kapalina-povrch tělesa. Teplo převedené tělesu/z tělesa vedením je rovno teple odvedenému/přivedenému prouděním prostředím.

$$\lambda_c \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha(T_a - T_s) \quad (50)$$

Kde:

T_a teplota v jádru proudícího prostředí (K),

T_s teplota povrchu tělesa (K),

α součinitel přestupu tepla ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$).

Vyhodnocení modelu

Úkolem modulu vyhodnocení modelu je numerické zpracování matematických modelů a určení hodnot:

- účelové funkce a omezujících podmínek
- pomocných informací

Je zodpovědný například za numerické řešení parciálních diferenciálních rovnic a jejich soustav. k tomu může používat některé z následujících metod, jako jsou metoda sítí, variační metody, metoda konečných prvků, metoda konečných diferencí, metoda konečných objemů atd.

Optimalizační modul

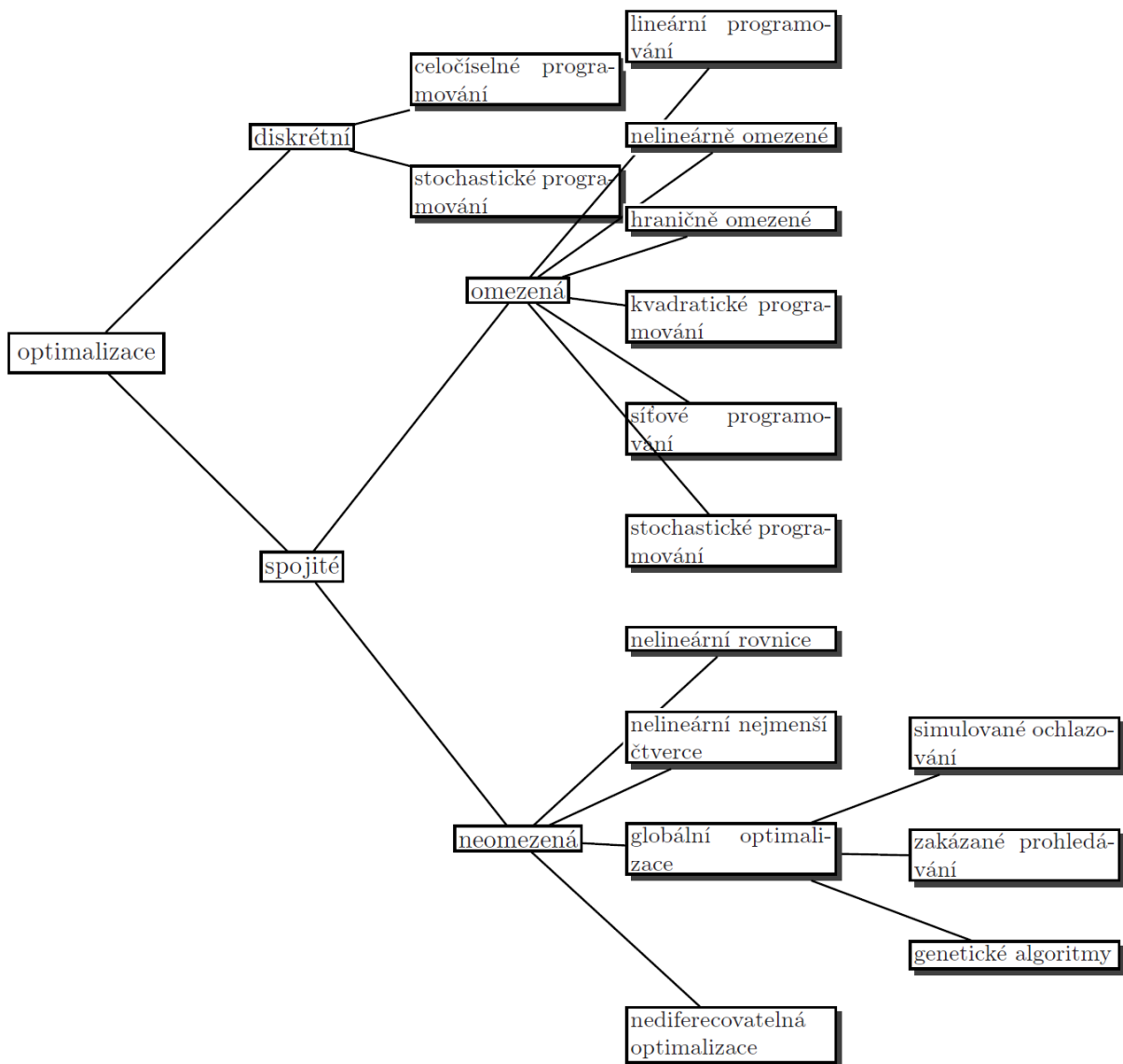
Účelem optimalizačního modulu je provádět vhodné změny optimalizačních proměnných, které vedou ke zlepšenému nebo optimálnímu návrhu. Proto obsahuje optimalizační algoritmus. Každý optimalizační algoritmus může být charakterizován podle:

- typu optimalizačních proměnných
 - reálné proměnné - mají dolní a horní hranici (zadáno intervalem)
 - celočíslné proměnné - mají dolní a horní hranici a dosahují jen celočíselných hodnot (obdoba Diofantovských rovnic [57])
 - logické proměnné - dosahují dvou hodnot (pravda/nepravda)

výběrové proměnné – mají množinu možných hodnot

množinové proměnné – jako hodnoty dosahují různé množiny

- typu omezujících podmínek
 - bez omezujících podmínek
 - lineární ($ax_1 + bx_2 + \dots + cx_n \geq z$)
 - nelineární
 - logické (jestliže A, potom B)
- typu účelové funkce – strom na obrázku 9 znázorňuje některé základní



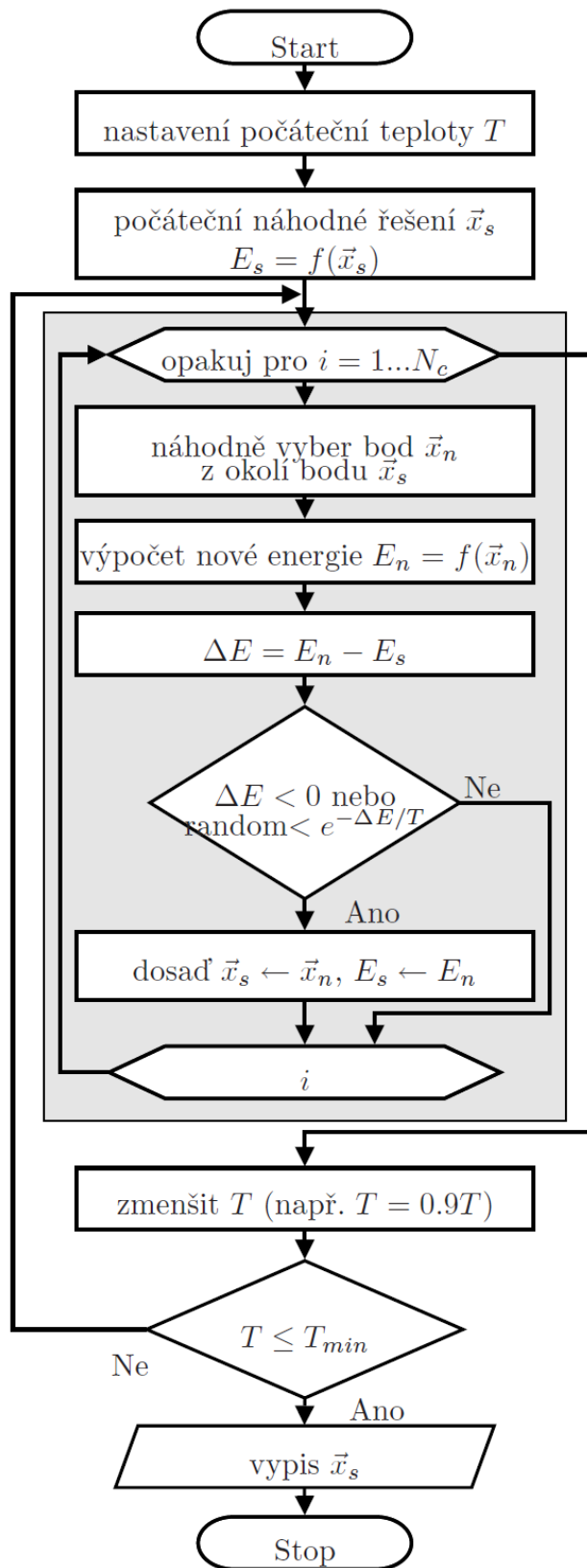
Obrázek 10 Strom výběru optimalizačních metod [58]

Optimalizační algoritmy můžeme dále rozdělit podle hlediska, zda nutně potřebují z modulu získávat informace (např. gradienty) nebo zda mohou pracovat pouze s předanou hodnotou účelové funkce.

Účelové funkce, které v naší aplikované metodice získáme po vytvoření matematického modelu soustavy, jeho vyhodnocení numerickými metodami a přičtení vlivu sady kritérií, nejsou v drtivé většině přímo derivovatelné a obsahují mnoho lokálních extrémů. v tomto případě nelze použít klasické optimalizační algoritmy jako např. Newton-Raphsonův, a je nutné sáhnout k metodám globální optimalizace, označovaným jako heuristické. Nejznámějšími a nejpoužívanějšími heuristickými metodami globální optimalizace jsou metody simulovaného ochlazování, zakázaného prohledávání a genetických algoritmů. Tyto techniky byly při svém vzniku inspirovány různými oblastmi. Metoda zakázaného prohledávání je založena na principech umělé inteligence, metoda simulovaného ochlazování na fyzice pomalého tuhnutí pevných látek a genetické algoritmy na biologických principech evoluce živých tvorů. Další výhodou těchto metod je, že jsou odolnější proti „uvíznutí“ v lokálním extrému, kterých většinou účelové funkce obsahují mnoho.

Simulované ochlazování

Metoda simulovaného ochlazování je stochastická optimalizační technika, publikovaná např. v [54], určená pro hledání globálního minima v rozsáhlých optimalizačních úlohách. Algoritmus využívá analogie mezi způsobem, jakým se dostávají pomalu chladnoucí kovy do krystalické struktury ve stavu s nejmenší energií a jeho simulace při hledání minima v obecnějších systémech. v diagramu na obrázku 10 vidíme, jak celý algoritmus probíhá. Algoritmus začíná z náhodně vybraného bodu \vec{x}_s . Přejít do dalšího bodu \vec{x}_n , opět náhodně vybraného z okolí \vec{x}_s , je akceptován jen pokud má lepší ohodnocení účelovou funkcí, nebo i pokud má horší ohodnocení účelovou funkcí - v tomto případě je přechod přijat jen s určitou pravděpodobností ($e^{-\Delta E/T}$) odvozenou od řídicího parametru označovaného jako teplota T . Náhodný výběr dalších bodů z okolí stávajícího bodu se v dalších iteracích opakuje. Po určitém počtu kroků je teplota T postupně snižována, tj. snižuje se pravděpodobnost zhoršení ohodnocení. Algoritmus končí, pokud se řídicí parametr T dostane pod stanovenou minimální hodnotu T_{min} , a bod, ve kterém se algoritmus právě nachází, můžeme vzít jako nejlepší řešení. Pokud však tento bod není blízký globálnímu extrému (např. uváznutí v lokálním minimu), je potřeba změnit minimální hodnotu T_{min} , a změnit rychlost změn parametru T v průběhu algoritmu.

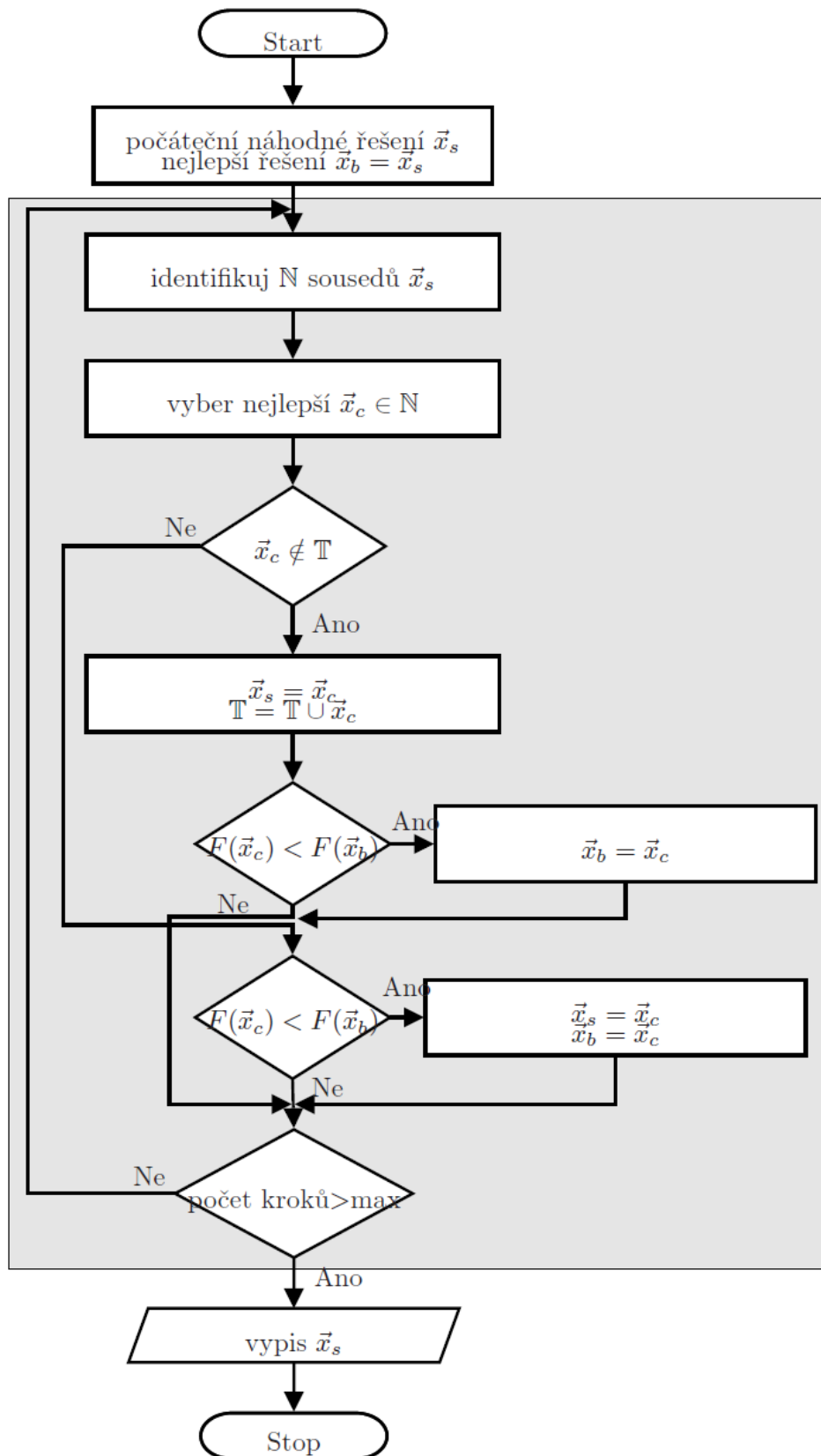


Obrázek 11 Algoritmus simulovaného ochlazování [54][55]

Zakázané prohledávání

Metoda zakázaného prohledávání je stochastická iterační metoda určená především pro řešení diskrétních kombinatorických optimalizačních úloh [59]. Po použití binární reprezentace proměnných je možné tuto metodu použít i pro spojité úlohy. Hlavním principem je prohledávání prostoru všech přípustných řešení sekvencí přesunů. Přesunem z jednoho řešení na jiné, nejlepší z dosažitelných. Algoritmus si pamatuje krátkou historii (např. 50 dříve vykonaných kroků odvozených od lokálních extrémů), aby se zabránilo cyklení v těchto přesunech.

Na obrázku 11 je algoritmus znázorněn. Algoritmus začíná z náhodně vybraného bodu \vec{x}_s (stávající řešení). z množiny okolních bodů \mathbb{N} je vybrán nejlepší prvek \vec{x}_c . Pokud tento prvek není v množině zakázaných prvků (tabu) \mathbb{T} , přechází se na tento prvek. v opačném případě se na něj přechází pouze pokud je lepší, než do této chvíle nejlepší nalezený. v obou případech se kontroluje, zda nově nalezený bod není lepší než dosud nalezený extrém. Algoritmus končí po předem definovaném maximálním počtu kroků, nebo pokud není možné najít lepší bod bez přítomnosti v zakázaném seznamu.



Obrázek 12 Algoritmus zakázaného prohledávání

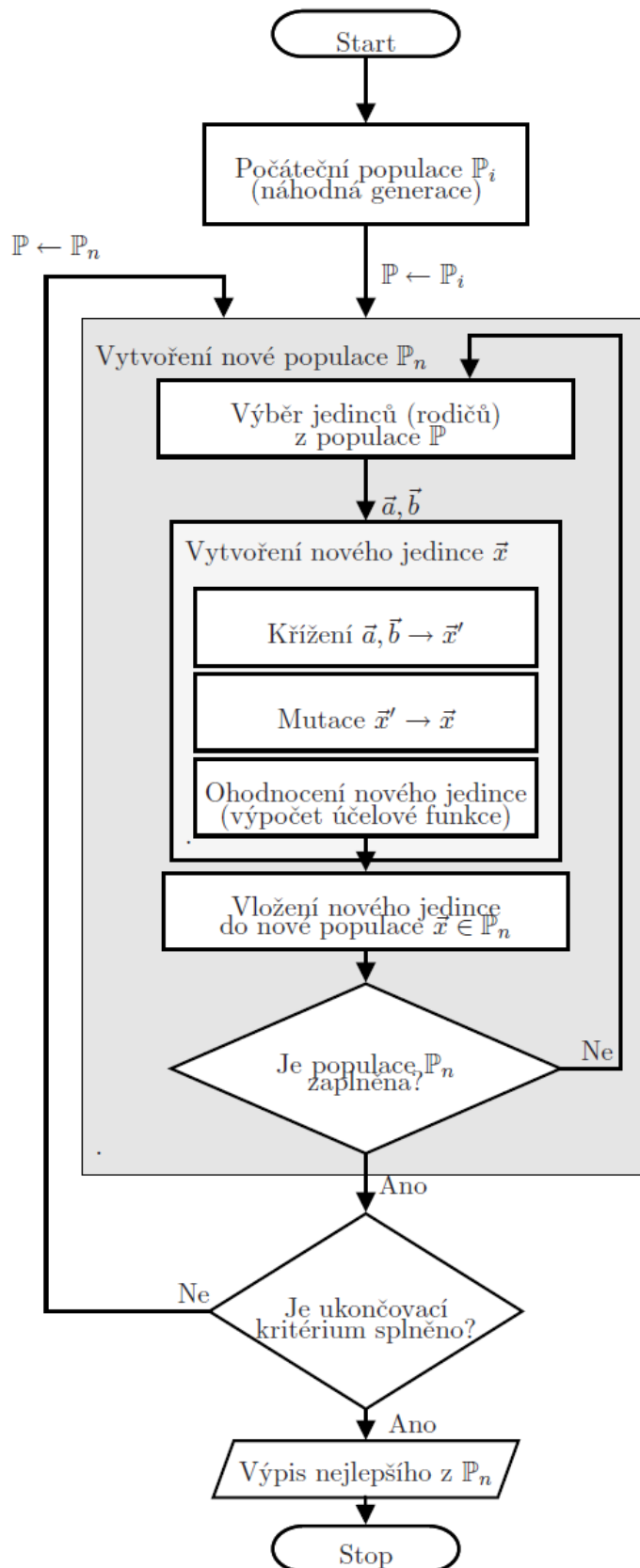
Genetické algoritmy

Genetické algoritmy (GA) jsou stochastické iterační vyhledávací metody [60], které napodobují přirozenou biologickou evoluci.

GA pracují na populaci (generaci) (množina \mathbb{P}) s konstantním počtem jedinců (potenciálních řešení) a aplikují na ni principy přežití nejlepších k produkci lepších a lepších aproximací řešení.

Jedinec (\vec{x}) je reprezentován řetězcem 0 a 1 (genotypem), který je ekvivalentem informací uložených v chromozómech jednotlivých organismů v biologii. Pomocí tohoto řetězce je zakódováno místo v daném prohledávaném prostoru. Vlastností každého jedince je jeho hodnota tzv. fitness funkce. Její velikost nám dává při porovnání s ostatními jedinci kritérium kvality řetězce. Její hodnotou může být např. při optimalizaci hodnota funkce v bodě, který kóduje daný jedinec.

Každá nová generace vznikne z předchozí za použití genetických operátorů, reprodukce (výběru), křížení a mutace.



Obrázek 13 Genetický algoritmus

Ukončovací modul

Ukončovací modul sleduje a vyhodnocuje kritéria pro stanovení, zda má být optimalizační proces ukončen. Ukončovací kritéria je možno klasifikovat do tří kategorií:

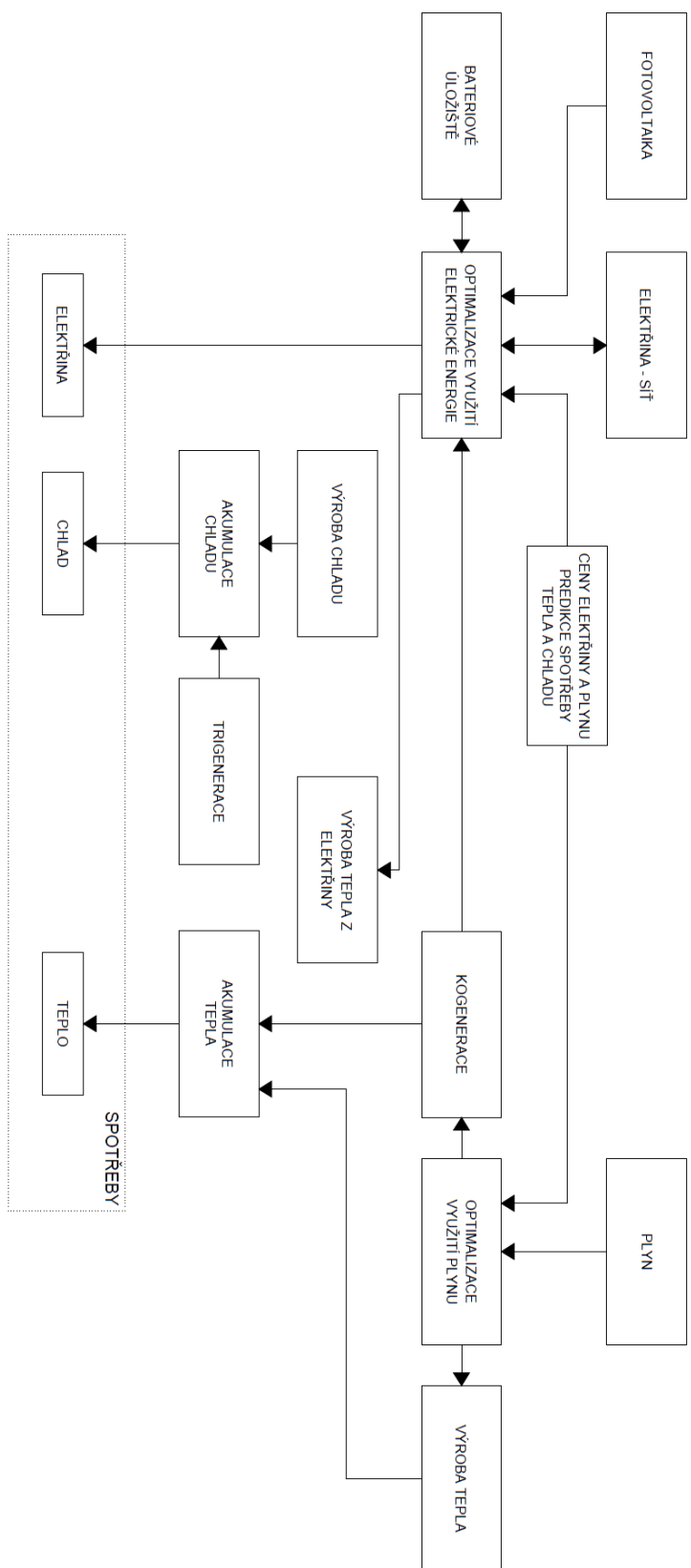
- dosažení optima (pokud je známé)
- žádné nebo malé pokroky mezi iteracemi procesu optimalizace. (zlepšení ohodnocení $\leq \epsilon_{imp}$ během posledních $n_{imp} \geq 1$ iterací)
- omezení zdrojů (počtu iterací, výpočetní, paměťové, atd.)

Pokud je kterékoliv z těchto tří kritérií splněno, optimalizační proces je ukončen a nejlepší dosažený výsledek je výstupem. Tento výsledek je nutno zkontrolovat projektantem. Pokud je z nějakého důvodu nepoužitelný, úloha byla špatně podmíněna nebo počet iterací optimalizační smyčky byl nedostatečný a je třeba opakovat znovu celý proces návrhu včetně omezujících podmínek.

3.6 Optimalizační strategie

Optimalizace spotřeby je vzhledem k počtu komponentů, jak výrobních, tak spotřebních, komplexní úloha. Při optimalizaci je potřeba dbát na dodržení okrajových podmínek, které jsou často funkcí více proměnných, například akumulace tepla má svá omezení ohledně výkonu a akumulační kapacity, přičemž je uvažováno nabíjení této kapacity více zdroji tepla, které mají být optimalizovány. Pokud by okrajové podmínky nebyly dostatečně definovány, dojde k požadavkům na neexistující stavy, což může vést k výpadku jednotlivých dodávek energií. Další překážkou je, že samotná ideální strategie využití energií může být kombinací více zdrojů najednou, což zvyšuje výpočetní nároky na samotnou optimalizaci. Optimalizace pro dimenzování akumulačních členů, která vyžaduje optimalizaci za celý rok, pak může trvat desítky hodin při použití osobních počítačů. z těchto důvodů byla pro potřeby této práce zvolena metoda využívající optimalizaci pomocí metod strojového učení. Optimální strategie jsou získány klasickými optimalizačními metodami pro typové dny, které zahrnují možné stavy z hlediska spotřeb, výroby energií a cen elektrické energie na denním trhu, případně na trhu s regulační energií. Optimální průběhy jsou použity pro učení neuronové sítě, což vede ke zrychlení nalezení optimálního průběhu za celé období a je tak umožněno dále upravovat velikosti zdrojů a akumulací pro zvýšení přínosu optimalizované spotřeby.

Prvním krokem samotné optimalizace je vytvoření diagramu strategie nasazování zdrojů a spotřeb, podle kterého se optimalizace bude řídit. Ten se samozřejmě mění podle typů zdrojů energií a podle typů spotřeb. Pro obecný případ je uvažován diagram z obrázku 12.



Obrázek 14 Obecný vývojový diagram pro optimalizaci spotřeby

Standardně jsou uvažovány jako vstupy energií plyn a elektrická energie ze sítě, to jsou energo nositele, které jsou součástí téměř každého většího energetického hospodářství a LDS. Tyto vstupy chceme optimalizovat za účelem minimalizace nákladů na energie, přičemž má být dosaženo tohoto cíle vhodnou kombinací těchto energonositelů v čase, za použití akumulace a vhodných transformačních technologií. Do optimalizace tak vstupují informace o průběhu cen a dále predikce spotřeb energií v čase.

Výrobu elektrické energie (přebytky) z obnovitelných zdrojů v EU lze predikovat dle cen na denním trhu, pokud se spotřeba přesune do časů s nižšími cenami, bude to znamenat nejen úsporu pro spotřebitele, ale zároveň vyšší využití obnovitelné energie. Dle nařízení komise (EU) č. 984/2013 probíhá nabídka standardní denní kapacity pro účely klouzavé aukce kapacity v režimu na následující den takto: předložení, stažení nebo změna od 15:30 UTC do 16:00 UTC (zimního času) nebo od 14:30 UTC do 15:00 UTC (letního času).

Pro optimalizaci ekonomiky provozu modelového případu jsou ceny na denním trhu zvoleny jakožto hlavní rozhodovací parametr. Na základě cen bude rozhodnuto o strategii výroby a spotřeby elektrické energie, s tím že cena má takovou prioritu, že může vést až k odstavení vlastní FVE.

V každé LDS se dále předpokládá spotřeba tepla (chlada), pokrytí potřeby tepla s co nejnižšími náklady je jednou z účelových funkcí matematického modelu. Jedná se o požadavek s vysokou prioritou, protože ve většině případů tvoří spotřeba tepla hlavní část nákladů na energie, zároveň však jde o nejsnáze akumulovatelnou energii. Proto je vždy po zveřejnění spotových cen upravena strategie jak pokrýt spotřebu tepla.

Postup pro vytvoření optimalizačního modelu lze rozdělit do jednotlivých kroků takto:

1. Sběr a příprava dat

Prvním krokem je sběr a příprava dat, která jsou klíčová pro vytvoření optimalizací, které dále posouží pro trénink metod strojového učení.

- Historická data o spotřebě elektrické energie a tomu časově odpovídající data o spotřebě plynu a tepla
- Historie/předpověď počasí (teplota, vlhkost, sluneční záření apod.)
- Tepelné ztráty budovy (navázané na venkovní teploty)
- Data o technologické spotřebě tepla
- Informace o nabíjení a vybíjení baterií

Data by měla být zaznamenána v pravidelných intervalech (např. hodinově) a měla by pokrývat co nejdelší časové období. Vhodné je použít například IoT senzory pro automatizovaný sběr dat.

2. Předzpracování dat

Předzpracování dat zahrnuje vyřazení zjevně chybných dat a jejich případné nahrazení například lineární interpolací. Data musí být také upravena tak, aby odpovídala časovým řadám a obsahovala všechny relevantní proměnné.

3. Nalezení závislostí a predikce

- Z dostupných dat o potřebě tepla na vytápění/chlazení se naleznou konstanty charakterizující otopnou soustavu
- Z dostupných dat o potřebě tepla pro technologii, počtu uživatelů budovy se určí konstanta využití tepelných zisků
- Pomocí regresního modelu se naleznou závislosti mezi potřebou tepla a zisky na spotřebě elektrické energie, případně na počtu uživatelů (nebo jiné, záleží na hlavním záměru použití soustavy)

4. Vytvoření základních vektorů pro rozhodování

Vhodná logika ovládání bude naučena tak, že se vytvoří základní vektory pro rozhodování. Tyto vektory budou vytvořeny pomocí tradiční optimalizace pro typové dny, což zahrnuje modelování a simulaci různých scénářů spotřeby energie za typických podmínek. Například typové dny mohou zahrnovat různé sezónní variace, pracovní dny versus víkendy a speciální události.

Tyto základní vektory budou obsahovat klíčové informace o spotřebě a výrobě energie, jako jsou:

- Časový údaj (časové razítko)
- Předpověď počasí (teplota)
- Spotřeba tepla/chladu a stav akumulace
- Spotřeba tepla pro technologii a stav akumulace
- Výkon kogeneračních jednotek
- Spotřeba elektrické energie
- Stav nabití baterie a výkon

Tyto vektory následně poskytnou podklady pro regresivní metody strojového učení, které se naučí predikovat optimální nastavení na základě těchto optimalizovaných dat.

5. Trénování regresního modelu

Pro trénování regresního modelu budou použity různé metody strojového učení. Mezi vhodné metody patří:

- **Lineární regrese:** Jednoduchý model, který může být užitečný pro základní predikce, pokud jsou vztahy mezi proměnnými lineární.
- **Regrese pomocí rozhodovacích stromů:** Metoda, která je schopna zachytit nelineární vztahy mezi proměnnými a je snadno interpretovatelná.
- **Random forest:** Ensemble metoda, která kombinuje více rozhodovacích stromů a zvyšuje přesnost predikcí tím, že snižuje přetížení modelu.
- **Gradient boosting:** Pokročilá ensemble metoda, která iterativně zlepšuje modelování chyb předchozích stromů a je velmi účinná pro složité úlohy predikce.
- **Neuronové sítě:** Výkonná metoda, která může zachytit velmi složité a nelineární vztahy mezi proměnnými, ale vyžaduje více dat a výpočetního výkonu.

6. Implementace fyzikálních omezení

Fyzikální omezení, jako je maximální kapacita akumulární nádrže nebo účinnost topného systému, je nutné zohlednit při optimalizaci. Existuje několik přístupů, jak toho dosáhnout:

- **Penalizace v účelové funkci:** Do účelové funkce modelu můžeme přidat penalizaci za překročení fyzikálních omezení.
- **Postprocessing:** Po získání predikcí z modelu můžete aplikovat fyzikální omezení, například oříznutí hodnot, které přesahují fyzikální limity. Následně je možné zpětně přepočítat optimum.

3.7 Případová studie

Případová studie zahrnuje aplikaci inteligentního řízení spotřeby s využitím akumulace energií v průmyslovém podniku. Pro optimalizaci spotřeby se počítá s navýšením akumulárních kapacit. Samotná optimalizace bude aplikována na zaslíbené ceny platné pro rok 2024 v případě plynu a na spotové ceny elektrické energie pro první pololetí roku 2024 a druhé pololetí roku 2023. Tyto ceny byly zvoleny protože volatilita cen postupně roste, přičemž v prvním pololetí roku 2024 byla zatím největší a lze tedy očekávat maximální přínos optimalizace spotřeby. Úpravy, které jsou uvažovány pro optimalizaci spotřeby, byly zvoleny tak, aby bylo možné poskytovat SVR. Poskytování SVR nebylo v optimalizačním modelu uvažováno, protože lze předpokládat, že se poskytování služeb bude překrývat s optimalizací

spotřeby, bližší predikce bohužel není vzhledem k charakteru SVR možná a z velké části závisí na nabídkové ceně regulační energie a skutečně odebraném objemu v daný okamžik.

3.7.1 Popis modelové situace

Pro případovou studii byl zvolen průmyslový podnik s následující energetickou charakteristikou.

Hlavní zdroje energií

1. Elektrická energie (sítě):

- Roční spotřeba 37 GWh.
- V areálu se nachází 19 transformátorů 22/0,4 kV o celkovém zdánlivém výkonu 19 MVA, které zajišťují dodávku elektřiny ze sítě a z fotovoltaické elektrárny o výkonu 1 MW, která je součástí objektu.
- Rezervovaný výkon přípojky je 14 MW
- Většina spotřeby je spotřebována pro napájení technologických zařízení, kompresorové stanice, osvětlení a vzduchotechniku.
- Spotřeba elektrické energie je dále pro chod administrativní budovy a ubytovny.
- Elektřina je odebírána za spotovou cenu + náklady na distribuci, které činí 50 euro/MWh.

2. Elektrická energie (fotovoltaika):

- V areálu se nachází fotovoltaická elektrárna o výkonu 1 MW_p, veškerá výroba je spotřebována v areálu, v době odstávek je elektrárna odstavena, z důvodů nepovolených přetoků do sítě.
- Roční výroba je 0,9 GWh.

3. Zemní plyn:

- Roční spotřeba plynu je 47,4 GWh.
- Zemní plyn je primárně využíván pro výrobu páry v centrální kotelně, kotlích o výkonu o celkovém výkonu 12 MW.
- Plynové kotle v kotelně zajišťují dostatečnou výrobu páry pro potřeby technologie, vytápění a ohřev teplé vody.
- Plyn je dále využíván ve výrobních technologiích přímým pálením na úpravu produktu.
- V současné době je plyn dodáván na základě kontraktu o ceně plynu 76 Euro/MWh včetně distribuce.
-

4. Dálkové teplo:

- Areál je napojen na dálkové zásobování teplem z městských tepláren.
- Dálkové teplo slouží pouze jako rezervní zdroj energie pro případ odstávky vlastní kotelny.
- Cena tepla je vzhledem k povaze využívání irelevantní.

Transformační technologie, rozvody energií a akumulace

Rozvody elektrické energie

- Elektrická energie je distribuována prostřednictvím hlavní rozvodny a 19 transformátorů 22/0,4 kV.
- Z hlavní rozvodny je elektřina vedena do jednotlivých částí areálu, zahrnující výrobní provozy, administrativní budovy a ubytovnu.
- Rozvody jsou navrženy tak, aby zajišťovaly stabilní a bezpečný přísun elektrické energie do všech částí areálu.

Rozvody zemního plynu

- Zemní plyn je přiveden do budovy kotelny prostřednictvím hlavního plynovodu.
- Kotelna je vybavena třemi plynovými kotli (jeden slouží pouze jako záložní) pro výrobu páry o výkonu 6 MW, která je dále distribuována do výměňkových stanic v areálu.

Rozvody tepla

- Teplo je generováno v centrální kotelně v podobě páry, která je redukována pro potřeby areálových rozvodů na 6 bar a následně distribuována do čtyř výměňkových stanic.
- Z výměňkových stanic je teplo dále rozvedeno do jednotlivých částí areálu pro technologické účely, vytápění a ohřev teplé vody.
- V případě potřeby je možné využít dálkové teplo z městských tepláren jako rezervní zdroj.

Akumulace tepla

- Akumulace tepla v areálu je realizována pomocí dvou parních akumulátorů o kapacitě 35 t a maximální tlaku páry 30 bar. Parní akumulátory slouží pro stabilizaci poměrů v parní síti při náhlých odběrech způsobených technologií.
- Pro potřeby akumulace je celková akumulační schopnost 8,2 t páry, tedy 6 MWh při parametrech 24 bar vstup a 7 bar výstup (pro zachování funkce akumulátorů páry je uvažován vyšší tlak než je potřebné minimum pro technologii).

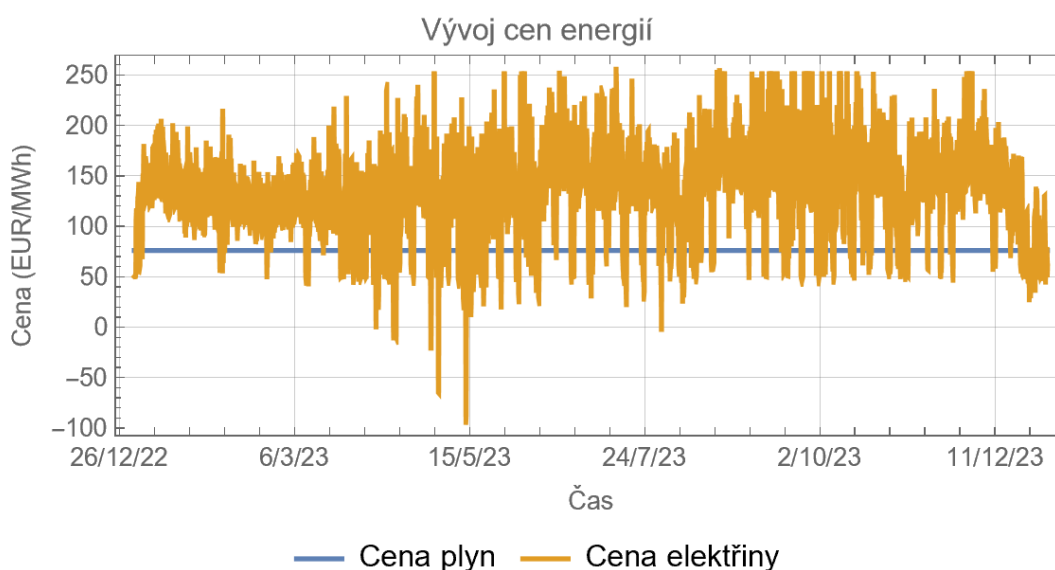
Akumulace elektrické energie

- Akumulace elektrické energie je zajišťována bateriovým úložištěm o výkonu 0,5 MW a kapacitě 1 MWh. Úložiště bylo realizováno pro vyrovnávání poklesů napětí v síti (mikrovýpadkům), které působily krátkodobé výpadky výroby s následnými škodami na vyráběném produktu (vypínání polovodičových zdrojů u pohonů). Podle provozních zkušeností je toto úložiště nedostatečné kvůli jeho výkonu a plánuje se jeho rozšíření.

- Bateriové systémy jsou integrovány do hlavní rozvodny, což umožňuje optimalizaci spotřeby a snižování nákladů na elektrickou energii při případné implementaci optimalizace spotřeby.

Průběh cen energií

Pro případovou studii byl zvolen následující průběh cen energií, ceny elektrické energie byly převzaty z historie denních cen OTE pro roky 2023, 2024 včetně distribučního poplatku a poplatku za OZE a byly zkombinovány. Ceny plynu odpovídají zaslavněné ceně pro rok 2024.



Obrázek 15 Roční průběh cen energií pro případovou studii. [35]

3.7.2 Navrhovaná opatření a provoz pro modelový případ

Cílem navrhovaných opatření je snížení nákladů na energie inteligentním přizpůsobením spotřeby průmyslového podniku a to tak, že nebude ovlivněn výrobní proces. Toho bude dosaženo využitím stávající technologie, doplněním o navrhované komponenty a systém řízení, přičemž samotná řídicí strategie vyplyne z optimalizace modelového případu.

Pro modelový případ je těžké stanovit počet aktivací SVR a dodanou energii, protože reálně závisí jednak na potřebách PS, ale také na nabízené ceně regulační energie, přičemž zdroje jsou aktivovány postupně podle potřeb od nejnižší ceny po nejvyšší. Nicméně v případě modelového případu lze provozovat soustavu tak, že bude možné uskutečnit dodávku regulační energie v rámci protiodchylky i provozovat zařízení jako certifikované SVR, v případě BESS parního vyvíječe i kogenerace. Dále lze předpokládat, že potřeba služeb koreluje s extrémní cenou elektrické energie na denním trhu, to znamená, že v reálném případě při poskytování SVR by

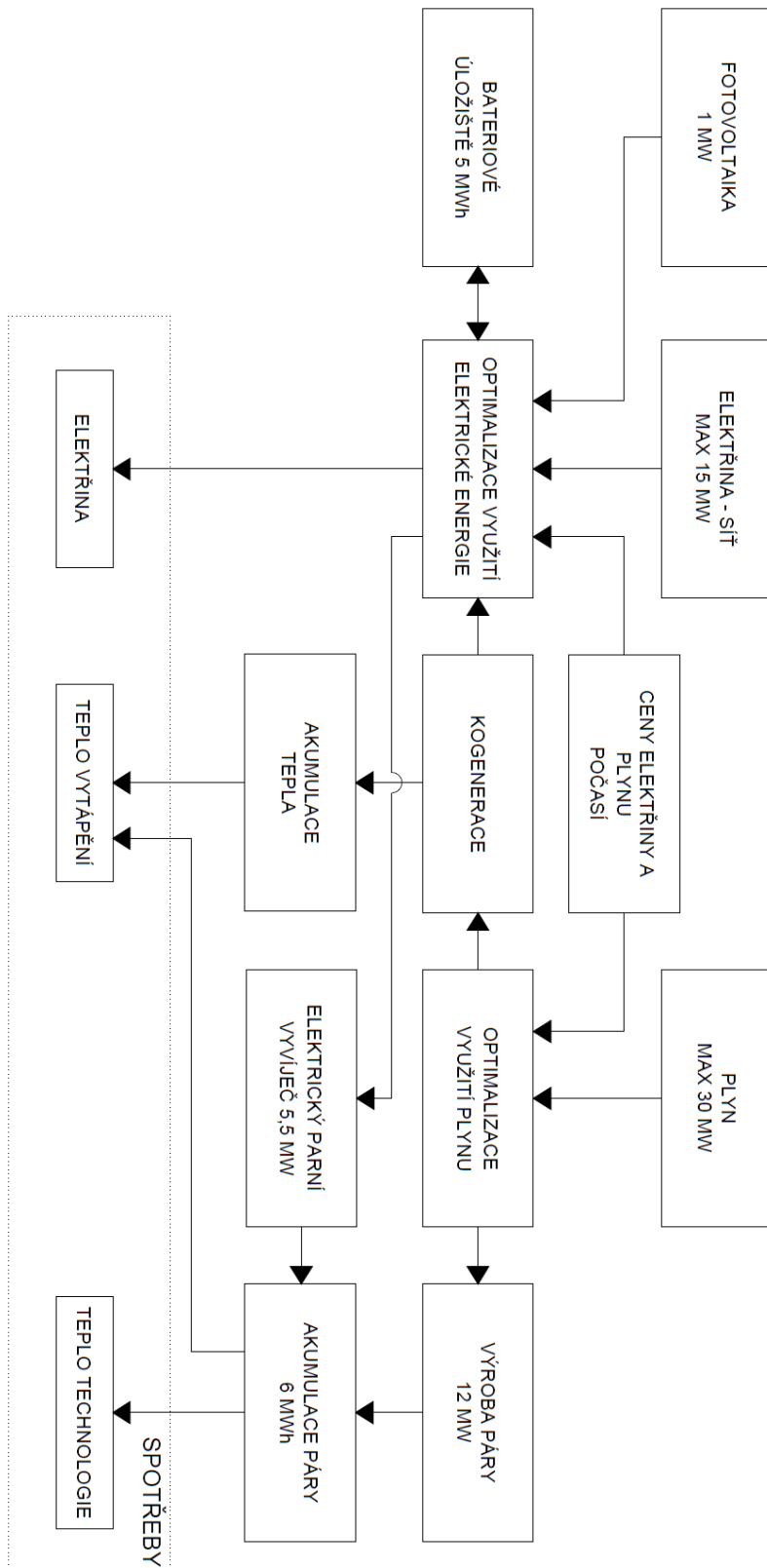
průběh spotřeby odpovídal výsledku provedené optimalizace, jen s násobně větším finančním efektem oproti samotné optimalizaci spotřeby.

Doplnění stávajících energetických celků pro potřeby modelového případu zahrnuje:

- Parní vyvíječ 7,5t páry při 24 bar, výkon 5,5 MW (náklad 400 000 €)
- Rozšíření bateriového úložiště z 1 MWh a 1 MW na 5 MWh a 2,5 MW (náklad 1 360 000 €)
- Kogenerační jednotka o výkonech 999 kWe a 1 359 kWt (náklad 600 000 €)
- Akumulace topné vody 1,6 MWh (35 t) (náklad 110 000 €)

Celkově je potřeba investovat 2 470 000 €, tato částka nezahrnuje systém inteligentního řízení spotřeby včetně potřebného hardware.

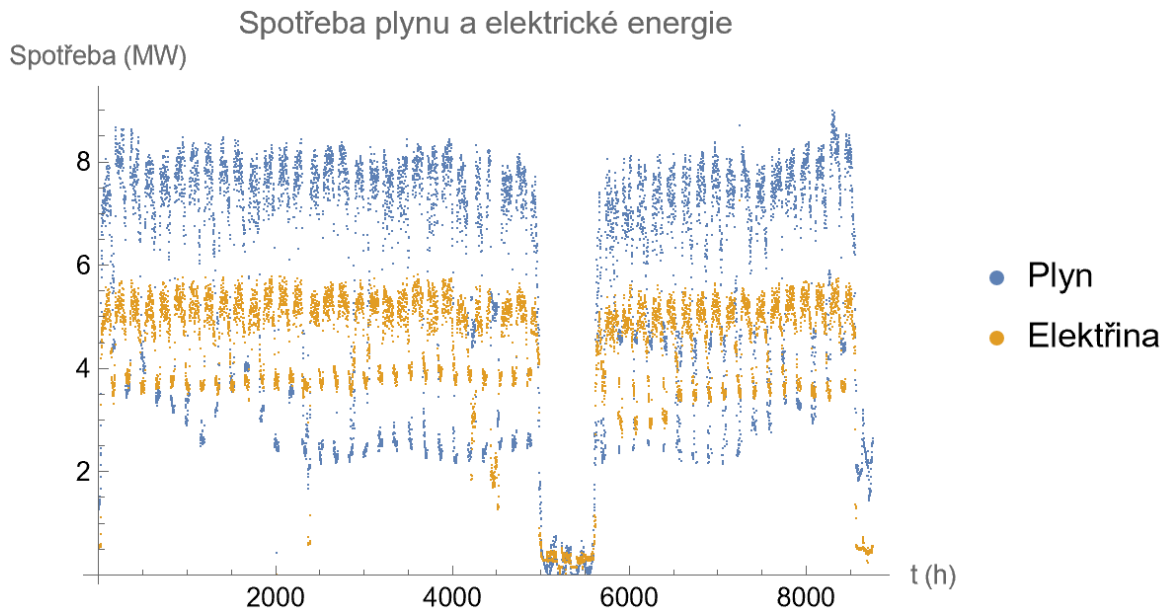
STRATEGIE NASAZOVÁNÍ ZDROJŮ PRO OPTIMALIZACI MODELOVÉHO PŘÍPADU



Obrázek 16 Strategie nasazování zdrojů a spotřeb pro modelový případ

3.7.3 Výchozí stav před optimalizací

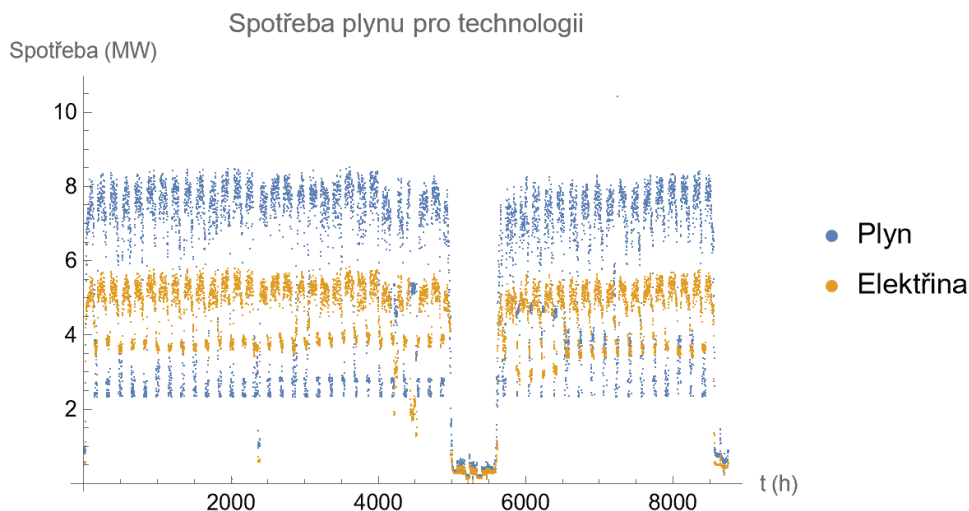
Před optimalizací je nutné identifikovat energetickou soustavu, k dispozici byly hodinová data o spotřebách plynu a elektrické energie na hranici soustavy.



Obrázek 17 Průběh spotřeb energií před optimalizací.

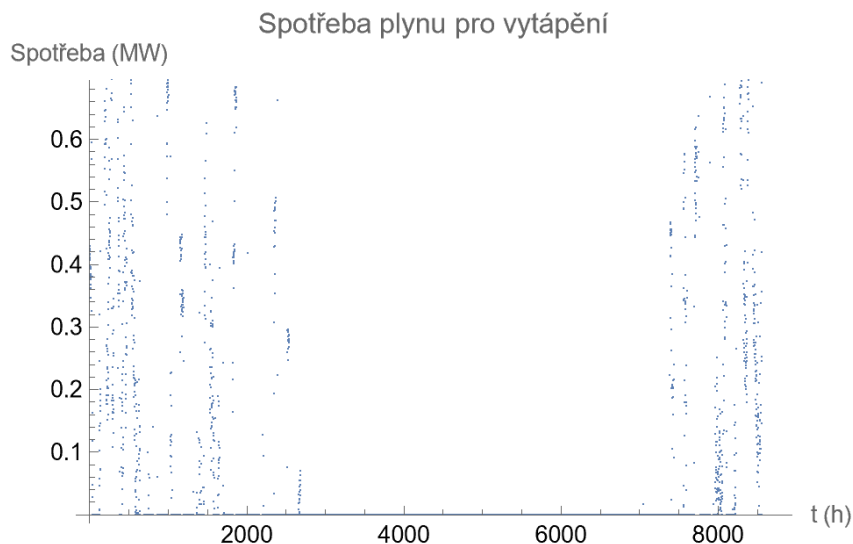
Analýza otopné soustavy

Na základě průběhu spotřeby elektřiny a plynu za měsíce květen až srpen, kdy můžeme s jistotou tvrdit, že nebylo použito teplo pro vytápění, byl pomocí metody neuronových sítí vytvořen regresivní model závislosti spotřeby plynu na odběru elektrické energie. Poté byl vytvořen průběh spotřeby plynu pro technologii dosazením ročního průběhu odběru elektrické energie.



Obrázek 18 Průběh spotřeb energií před optimalizací bez energií pro potřebu vytápění.

Odečtením výsledků regresivního modelu od skutečného průběhu spotřeby plynu byl obdržen průběh spotřeby plynu pro vytápění.



Obrázek 19 Průběh spotřeby plynu pro vytápění.

Pokud provedeme kontrolu a přičteme spotřebu pro technologii z regresivního modelu ke spotřebě tepla pro vytápění a spočítáme relativní chybu z integrálů těchto průběhů vyjde 0,86 %. Takovou chybu lze považovat za dostatečné přiblížení ke skutečnému průběhu.

Následně byly určeny konstanty otopné soustavy k_{Top} (kW/K) z průběhu venkovních teplot. Protože technologická spotřeba tepla generuje tepelné zisky je nutné zároveň určit konstantu využití tepelných zisků k_{Zisk} (-). Tímto postupem byly získány následující hodnoty:

$$k_{Top} = 3,79 \text{ kW.K}^{-1}$$

$$k_{Zisk} = 0,24$$

3.7.4 Výsledky optimalizace

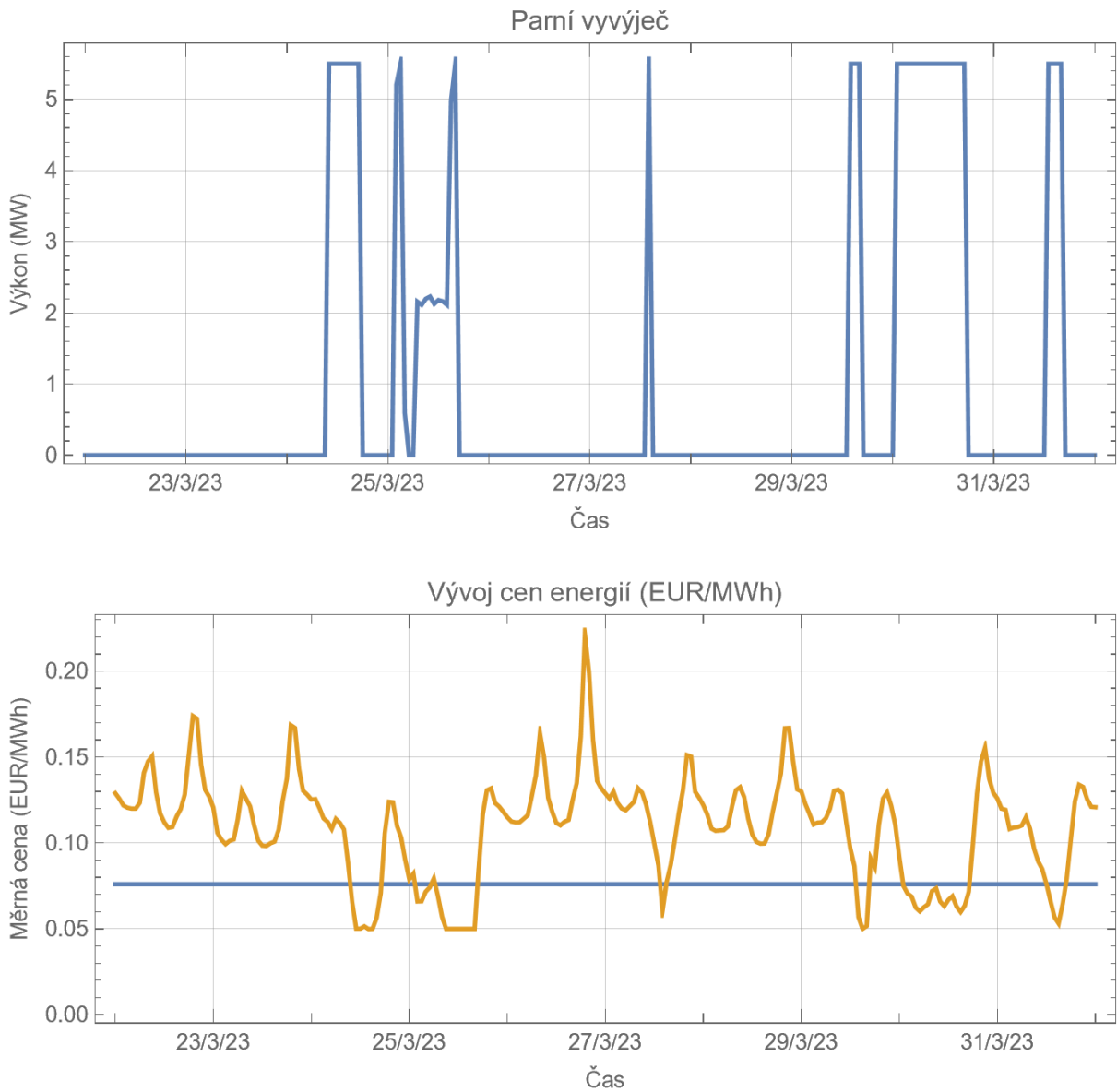
V rámci optimalizace provozu byly provedeny optimalizace s dostupným časovým výhledem daným zveřejňováním cen elektrické energie na denním trhu. Výsledky optimalizace je vhodné znázornit jako výrobní/spotřební diagramy na jednotlivých prvcích soustavy.

Elektrický parní vyvíječ

Provoz parního vyvíječe má následující omezující podmínky:

- Výroba elektrické energie je omezena spotřebou tepla a dostupnou akumulací parního akumulátoru.
- Výkon parního vyvíječe je 5,5 MW.

Následující průběhy ukazují využití parního vyvíječe v závislosti na ceně elektrické energie na denním trhu, z průběhu je patrné, že k zapínání dochází vždy, pokud je cena elektrické energie včetně distribuce nižší než cena plynu.



Obrázek 20 Průběh výkonu parního vyvíječe (spouštění v závislosti na ceně energie na denním trhu).



Obrázek 21 Roční využití parního vyvíječe.

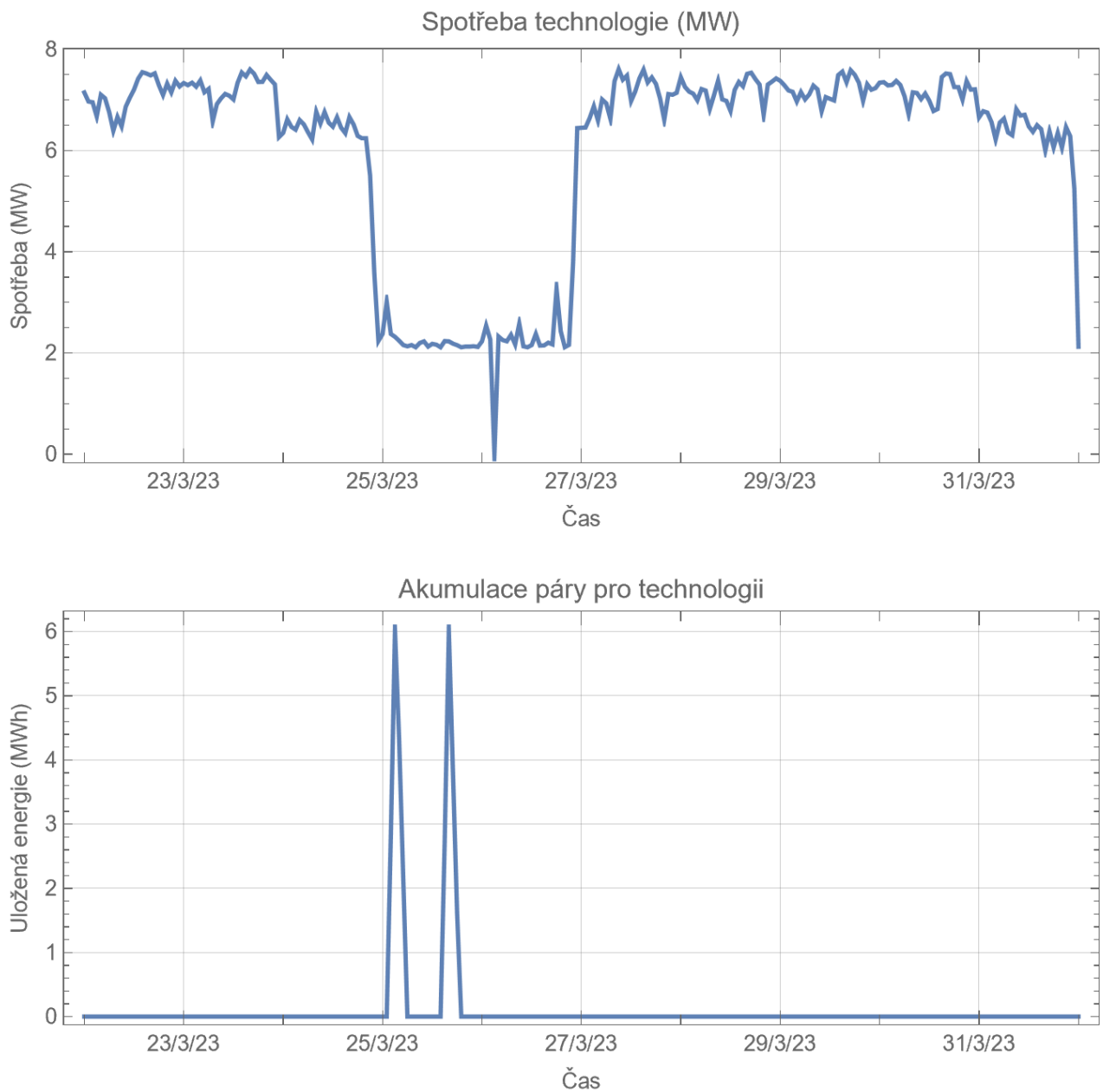
Získaný průběh nám dává informaci o množství elektrické energie použité výrobu páry. Elektrická energie pro výrobu páry je využívána pouze pokud je cena na denním trhu nižší než 25 EUR/MWh. v tomto případě se dá předpokládat, že je v soustavě přebytek elektrické energie z OZE, ta se v mnoha případech maří v odpornících v rámci SVR. Dle dat z [38] je v Evropě v těchto časech přebytek v zemích s emisním faktorem 0,03 t CO₂/MWh, pokud budeme uvažovat tento emisní faktor je úspora CO₂ díky náhradě výroby 3480 MWh z plynu 591 t CO₂.

Parní akumulátor

Provoz parního akumulátoru má následující omezující podmínky:

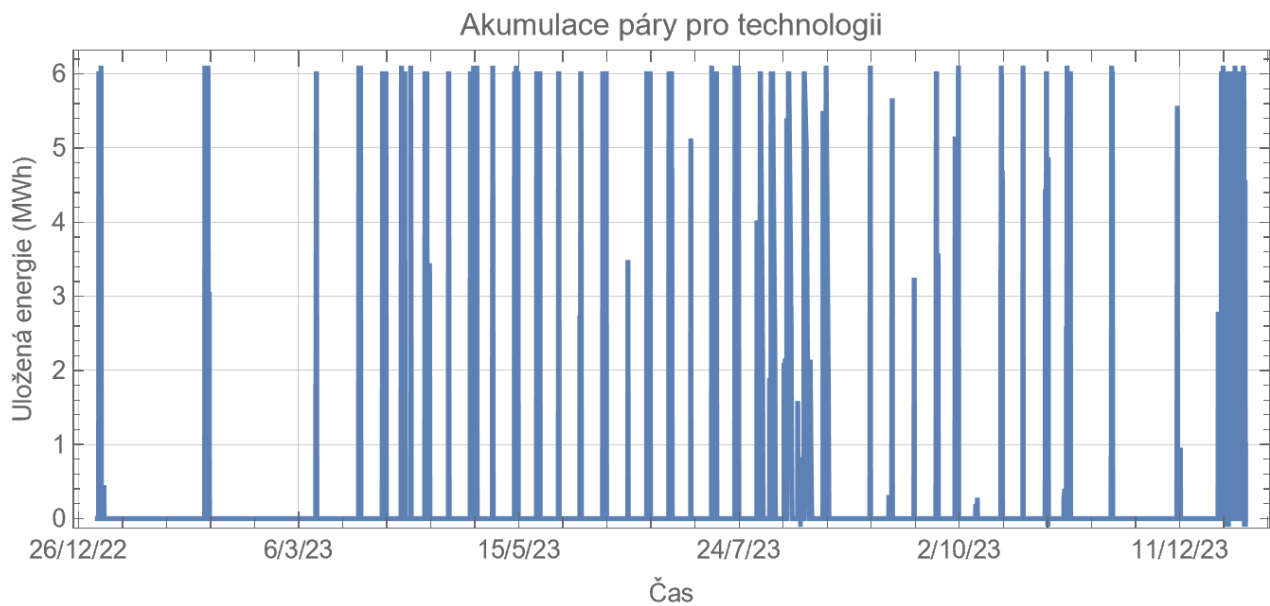
- Vybíjecí a nabíjecí výkon 5,5 MW
- Akumulační kapacita 6 MWh

Pro optimalizaci využití parního vyvíječe je uvažováno využití stávajících parních akumulátorů na vyšších parametrech pro získání přidané akumulární schopnosti páry pouze pro účely optimalizace spotřeby.



Obrázek 22 Využití parního akumulátoru během za vybraný typický časový úsek.

Z následujících průběhů je patrné využití parního akumulátoru, které odpovídá časovému využití parního vyvíječe podle obrázku [19] během víkendu. Vzhledem ke standardní spotřebě technologické páry vyšší než je maximální výkon navrhovaného parního vyvíječe, jsou parní akumulátory využívány pouze během víkendového provozu. Roční využití parní akumulace činí 521 MWh uložené energie což je 15% celkového množství páry vyrobeného z elektrické energie. Přínos parní akumulace z hlediska úspor CO₂ tak činí 88,5 t. Vzhledem k tomu, že jde o využití stávajícího vybavení průmyslového podniku nevyžadující výrazné investice je tento přínos nezanedbatelný.



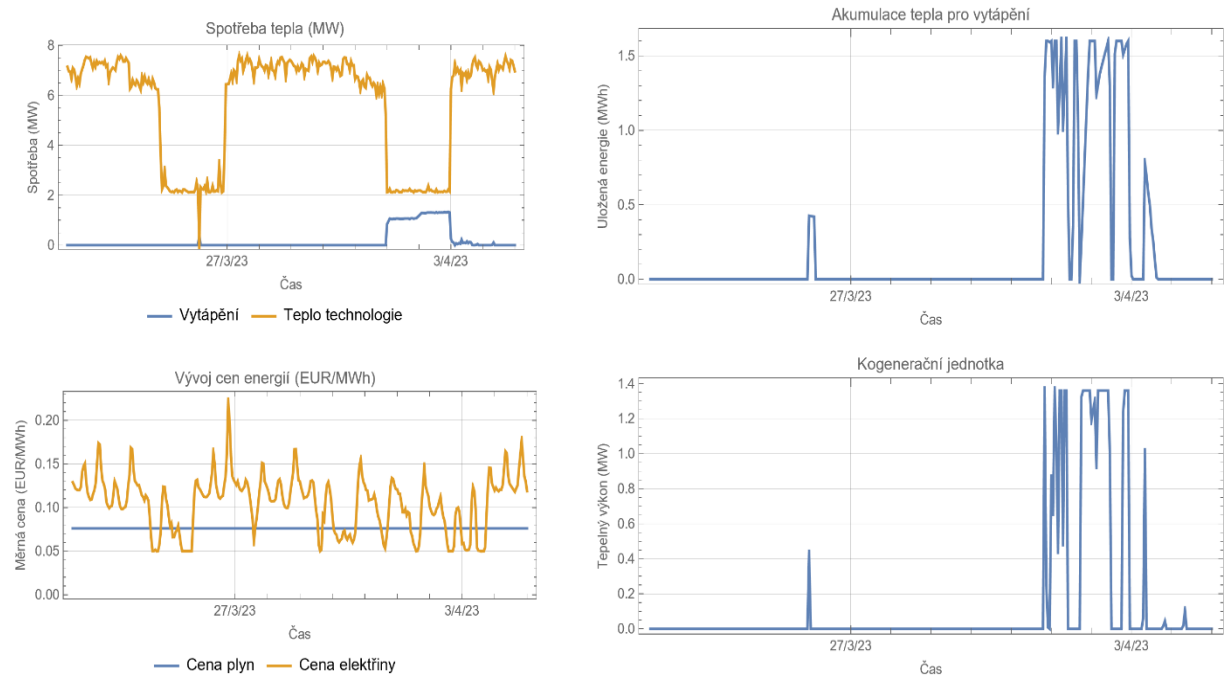
Obrázek 23 Průběh ročního využití parního akumulátoru, celková akumulovaná energie 521 MWh.

Kogenerační jednotka

Provoz kogenerační jednotky má následující omezující podmínky:

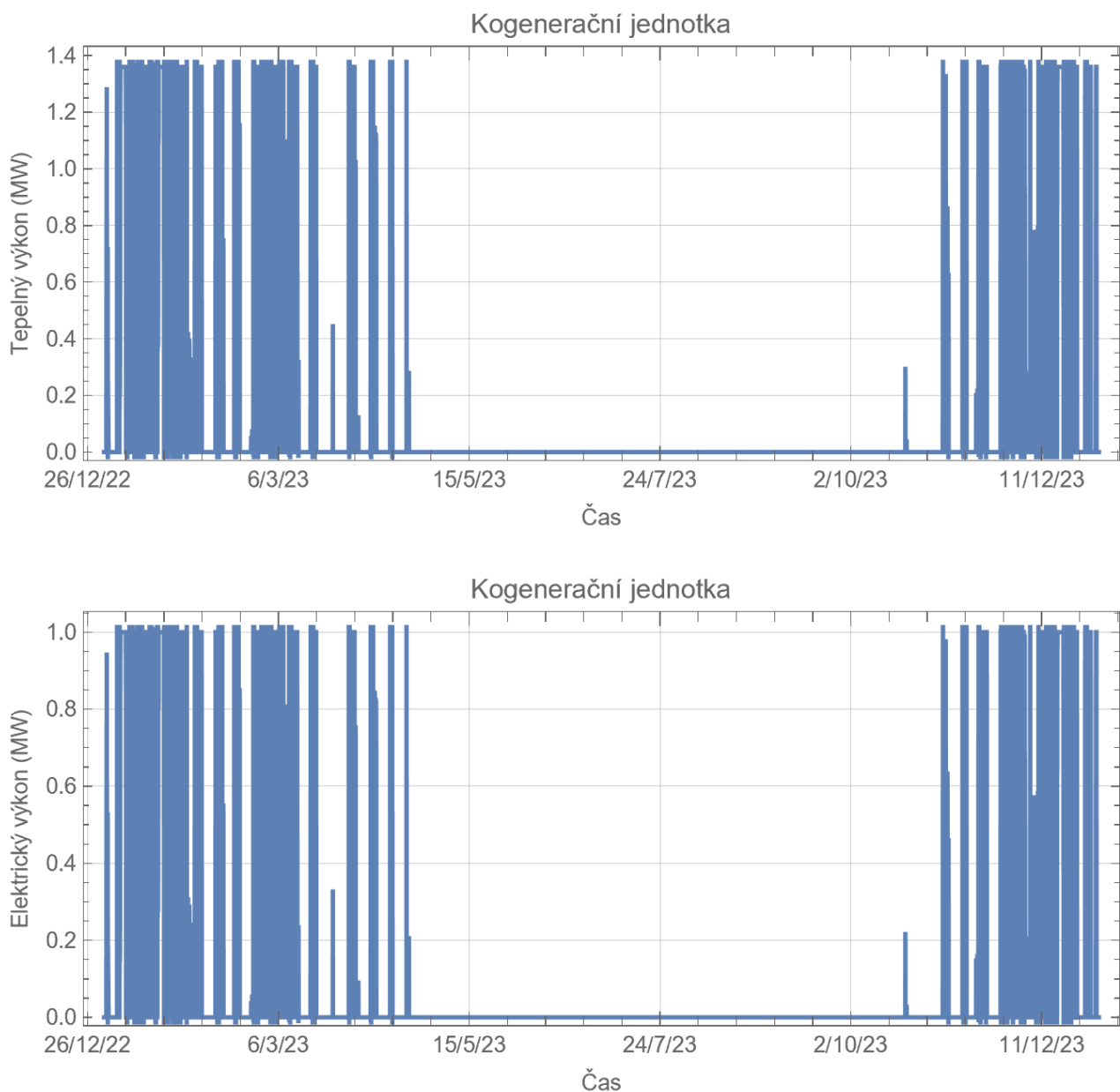
- Výroba elektrické energie je omezena spotřebou tepla a dostupnou akumulací kapacitou tepla.
- Výroba elektrické energie nesmí překročit spotřebu areálu, neuvažuje se dodávka do sítě.
- Teplo vyrobené kogenerační jednotkou je možné použít pouze pro vytápění, pro technologii nemá dostatečný potenciál.

Průběhy získané optimalizací ukazují, spouštění kogenerační jednotky, tak aby byly eliminovány odběry elektrické energie ze sítě v časech s nevyššími cena v rámci denního trhu. z průběhu dle obrázku [23] je dále patrné, že ke konci otopné sezóny již pokrývají tepelné zisky z technologie celou část potřeby tepla na vytápění, proto se kogenerační jednotka uplatní pouze o víkendech, kdy je produkce utlumena.



Obrázek 24 Provoz kogenerační jednotka a akumulace tepla pro vybraných 14 dní v roce.

V případě optimalizovaného sledovaného roku by vyrobila kogenerační jednotka 962 MWh elektrické energie a 1309 MWh tepla.



Obrázek 25 Výroba tepla a elektrické energie během sledovaného období.

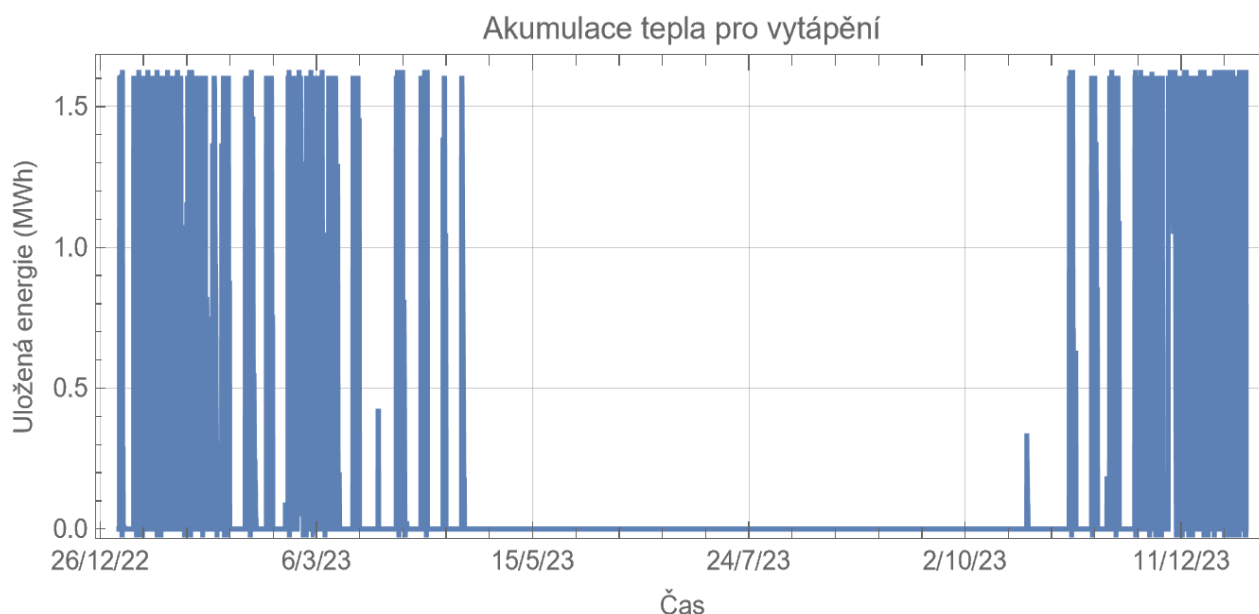
Na základě průměrného emisního faktoru pro rok 2023, který je 0,37 t CO₂/MWh [37], byla určena úspora CO₂ plynoucí z kombinované výroby elektřina a tepla, ta činí v případě modelovaného průběhu 163 t (navrhovaná kogenerační jednotka má účinnost 99%, emisní faktor plynu je 0,2 t CO₂/MWh).

Akumulační nádrž

Provoz parního akumulátoru má následující omezující podmínky:

- Vybíjecí a nabíjecí výkon 1,4 MW
- Akumulační kapacita 1,6 MWh

Pro optimalizaci výroby elektrické energie v kogenerační jednotce byla navržena akumulční nádrž. Její roční využití zobrazuje následující průběh. Za sledované období bylo do akumulční nádrže akumulováno 325 MWh, což je 25 % celkové výroba tepla kogenerační jednotkou.



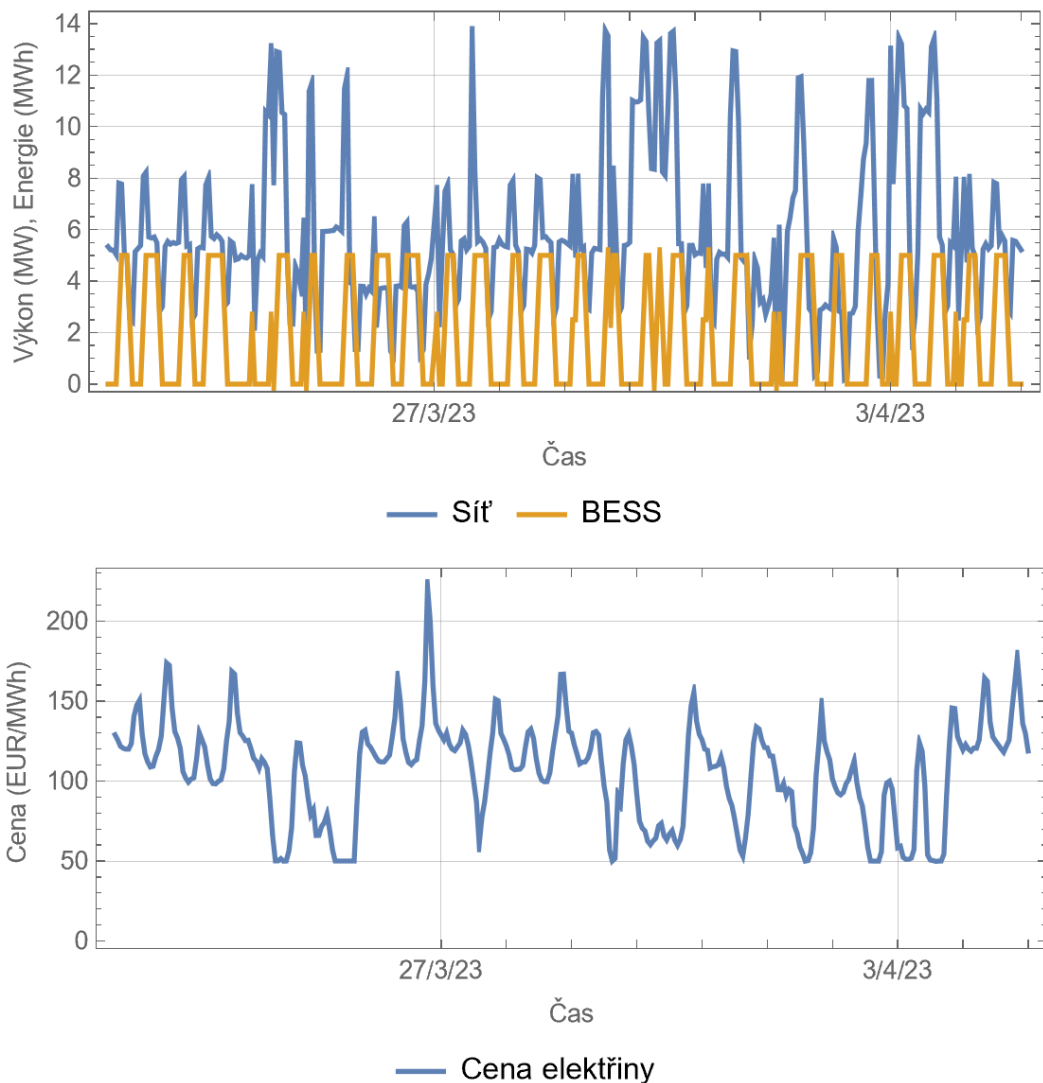
Obrázek 26 Průběh ročního využití parního akumulátoru, celková akumulovaná energie 325 MWh.

Bateriové úložiště

Provoz BESS má následující omezující podmínky:

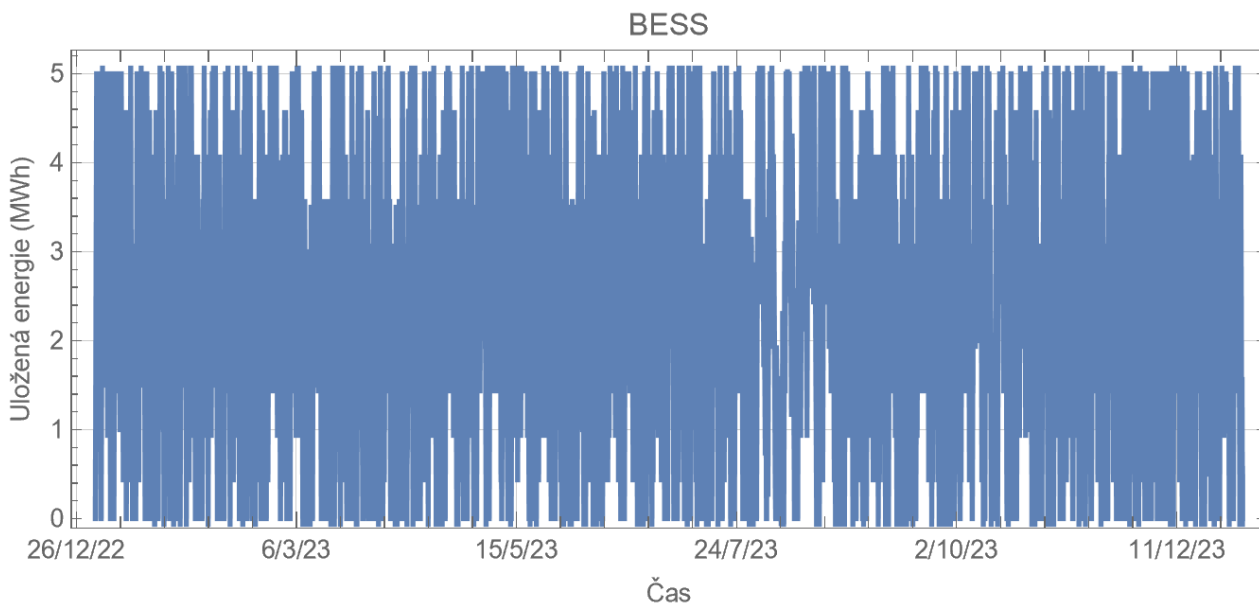
- Vybíjecí a nabíjecí výkon činí polovinu akumulční kapacity.
- Dodávka energie z baterie do sítě je zakázána.

Získané průběhy ukazují, na cenu optimalizovaný průběh akumulované energie v BESS a výkon odebíraný ze sítě. s takto malým úložištěm dochází v podstatě k jednomu nabití a vybití denně, a to vždy v minimu a maximu ceny elektrické energie na denním trhu.



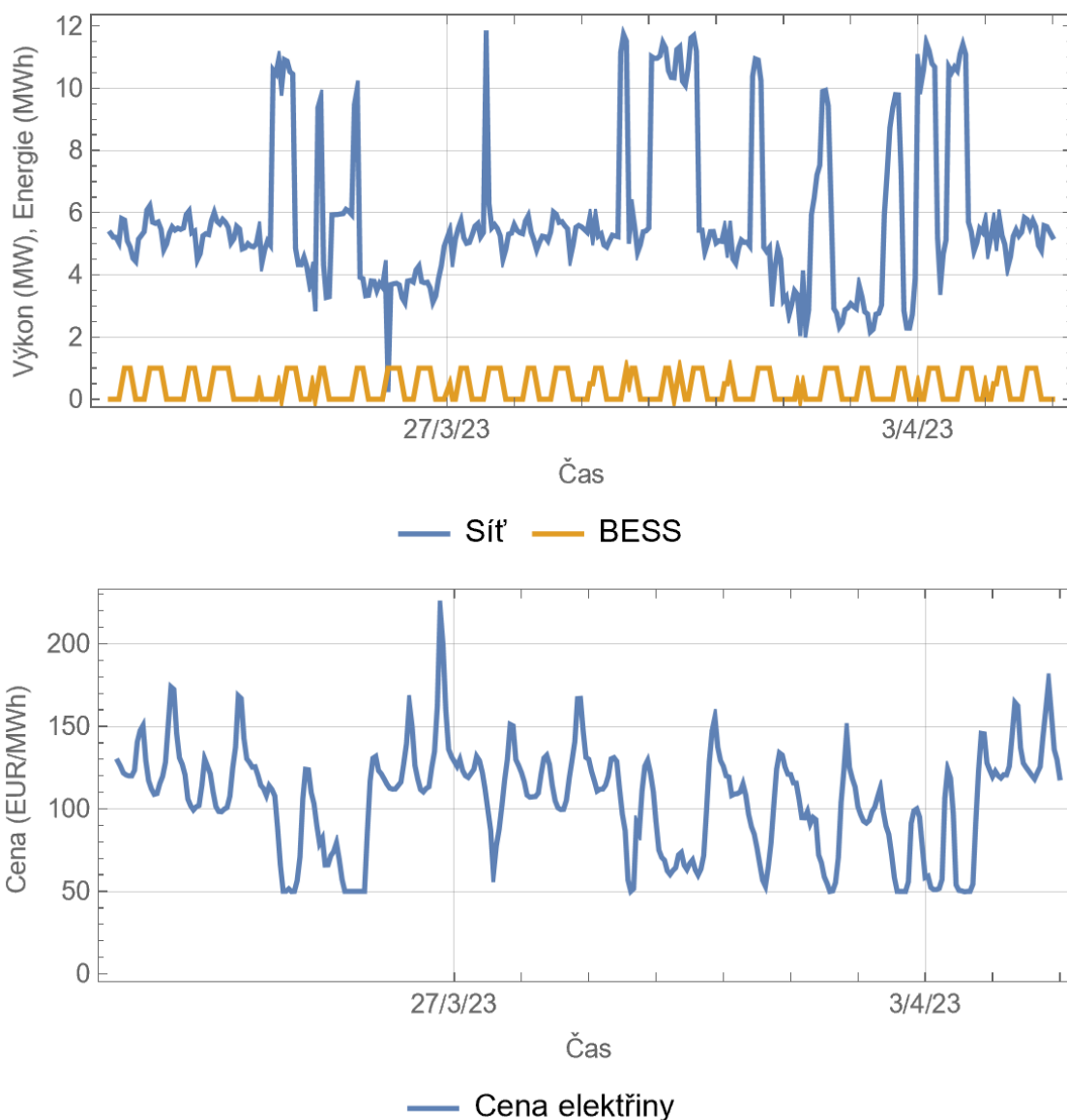
Obrázek 27 Průběh ročního využití BESS 5 MWh v rámci vybraných 14 dnů v roce.

Následující průběh ukazuje využití bateriového úložiště během roku. Získaný průběh nám dává informaci o množství energie použité pro nabíjení baterie a následnou potřebu, na základě tohoto průběhu je možné podobně jako v případě parního vyvíječe určit úsporu CO₂ plynoucí z optimalizované spotřeby díky baterii [17]. Pokud vezmeme průměrný rozptyl emisních faktorů během dne, pohybující se okolo 0,2 t CO₂/MWh [39], který je svázaný s cenami energií, činí úspora CO₂ díky baterii 819 t CO₂.



Obrázek 28 Průběh ročního využití BESS 5 MWh, celková akumulovaná energie 4094 MWh.

Vzhledem k vysoké ceně BESS byla pro porovnání napočtena varianta se zachováním stávajícího úložiště o kapacitě 1 MWh a o výkonu 0,5 MWh. Při této kapacitě je z baterie čerpáno 830 MWh ročně, optimální strategie se tak v podstatě nezměnila, což je patrné z průběhů i z objemu energie, jedná se o 20 % energie, která prošla pětinasobně velkým úložištěm.



Obrázek 29 Průběh ročního využití BESS 1 MWh v rámci vybraných 14 dnů v roce.

Ekonomické přínosy optimalizace spotřeby modelové soustavy

Ekonomické přínosy optimalizace spotřeby lze rozdělit do několika kategorií:

- Úspora za energie plynoucí z optimalizované spotřeby

Tyto úspory plně odpovídají závěrům z optimalizace spotřeby a jsou dány nákupem energií v časech kdy je energie levnější. Dalším z ukazatelů přínosu optimalizace je změna využití elektrické energie, tedy kolik energie plynu bylo nahrazeno elektrickou energií, případně naopak, tabulka 4 ÚSPORY. Úspora na energiích plynoucí z navrhovaných úprav činí **325 554 EUR** (v procentech 3,85 % výdajů za energie). z toho plyne při nákladech **2 470 000 EUR** (bez

nákladů na optimalizované řízení a údržbu instalovaných komponent) prostá doba návratnosti investice **7,6 let**.

- Poskytování SVR

Samotná optimalizace nezahrnuje poskytování SVR z důvodů popsaných na začátku této kapitoly. Nicméně samotné poskytování se v případě modelového případu nabízí, a to na těchto komponentech:

BESS

Vzhledem ke zvolené kapacitě baterie, povaze provozu a jejímu výkonu je možné poskytovat službu *mFRRt-o* výkonu 2,5 MW. Technicky je možné v daném případě poskytovat tuto službu na daném zařízení po celý rok, z hlediska příjmů lze rozumně stanovit pouze příjmy za rezervaci výkonu. Ročně se jedná o částku:

$$8760 \text{ h} \times 10 \text{ EUR/MW.h} \times 2,5 \text{ MW} = 219\,000 \text{ EUR}$$

Parní vyvíječ

Vzhledem k instalovanému výkonu parního vyvíječe je možné poskytovat službu *mFRRt-o* výkonu 5,5 MW. Technicky je možné v daném případě poskytovat tuto službu na daném zařízení po dobu 11 měsíců (z důvodů letní závodní dovolené), z hlediska příjmů lze rozumně stanovit pouze příjmy za rezervaci výkonu. Ročně se jedná o částku:

$$8030 \text{ h} \times 10 \text{ EUR/MW.h} \times 5,5 \text{ MW} = 441\,650 \text{ EUR}$$

Kogenerační jednotka

Vzhledem k elektrickému výkonu kogenerační jednotky je možné poskytovat službu *mFRRt+* výkonu 1 MW. Provozní doba je vzhledem k omezené potřebě tepla na vytápění omezena na období 1.1.2023 – 22.4.2023 a 21.10.2023 – 31.12.2025. Celkem se jedná o 4 392 h, po které je možné službu nabízet. Ročně se jedná o částku:

$$4392 \text{ h} \times 30 \text{ EUR/MW.h} \times 1 \text{ MW} = 131\,760 \text{ EUR}$$

Příjmy za SVR byly stanoveny podle průměrných cen pro rok 2024 [40]. Celkem by bylo možné utržit za sledované období **792 410 EUR**, pokud bychom uvažovali soustavu provozovat pouze pro poskytování SVR jednalo by se o prostou dobu návratnosti navrhovaných úprav technologie (**náklady 2 470 000 EUR**) 3,2 let.

- Záruka původu a povolenky

Příjem ze záruk původu se získává prodejem certifikátů potvrzujících výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů. Záruky původu lze prodat obchodníkům s elektřinou nebo koncovým zákazníkům (zprostředkovává OTE), kteří mají zájem prokázat, že spotřebovali energii vyrobenou z obnovitelných zdrojů [31]. Možný příjem by byl 111 746 EUR.

Příjem z emisních povolenek vzniká, pokud provozovatel zařízení v systému ETS²⁵ sníží své emise a prodá přebytečné povolenky na trhu [31]. Možná úspora by byla 17 005 EUR.

Tyto příjmy jsou samozřejmě hypotetické, protože v současné době neexistuje nástroj jak prokázat úsporu CO₂ plynoucí z optimalizace chování spotřeby. Nicméně změny v účtování energií a nástupu flexibility poukazují na změny v obchodu s elektrickou energií a do budoucna nelze vyloučit, že se nezmění i způsob vykazování úspory CO₂, případně záruky původu.

²⁵ ETS (Emissions Trading System) je systém obchodování s emisními povolenkami, který byl zaveden za účelem regulace emisí skleníkových plynů, zejména oxidu uhličitého (CO₂).

Shrnutí ekonomických přínosů

Proměnná (roční integrál)	Před optimalizací	Po optimalizaci
Spotřeba elektrické energie	36947 MWh	39491,5 MWh
Spotřeba plynu	47376,5 MWh	44829 MWh
Útrata za elektrickou energii	4979468 €	4845240 €
Útrata za plyn	3471888 €	3280561 €
Výroba elektrické energie z plynu (kogenerace)	0 MWh	962,4 MWh
Výroba tepla z elektrické energie (parní vyvíječ)	0 MWh	3480 MWh
Roční útrata za energie	8451355 €	8125801 €
Roční úspora za energie	0	325 554 €
Roční produkce CO ₂	23 170 t	21 597 t
<i>Možný zisk za CO₂ (71.04 €/t) [39]</i>	0	<i>(1573 t) 111 746 €</i>
<i>Možná úspora za záruku původu (100 Kč/MWh) [33]</i>	0	<i>(1573 t CO₂ ≈ 4251 MWh) 17 005 €</i>
<i>Možný zisk mFRRt-</i>	0	<i>660 650 €</i>
<i>Možná zisk mFRRt+</i>	0	<i>131 760 €</i>

Tabulka 4 Ekonomické zhodnocení

3.8 Dílčí závěry

V této kapitole jsem uvedl, jak lze přistupovat k optimalizaci spotřeby. v úvodní části je popsán postup využití metod strojového učení pro zrychlení optimalizace v případě simulace celého roku. Následuje popis matematických vztahů pro modelování jednotlivých prvků decentralizovaných a lokálních distribučních soustav. Další část se zabývá obecným optimalizačním postupem, který byl využit pro trénování metod strojového učení. Zmíněna je také optimalizační strategie, která je použita pro optimalizaci.

Další část se zabývá případovou studií, která je postavena na datech průmyslového podniku umístěného na jižní Moravě. Pro tento konkrétní případ byly navrženy úpravy soustavy pro zvýšení možností z hlediska optimalizace řízení spotřeby energií. Dále byl na základě navržené úpravy soustavy sestaven diagram dle kterého probíhá optimalizace. Tato část řeší také

identifikaci otopné soustavy z hlediska tepelných ztrát a tepelných zisků. Popsané postupy byly využity k vytvoření optimálních průběhů výkonů výrobních, spotřebních a akumulčních prvků. Samotná pasivní optimalizace spotřeby (bez poskytování SVR, flexibility) přinesla relativně malou úsporu nákladů na energie, která činí 3,85% celkových výdajů za energie, to v kontextu vynaložených investiční výdajů spojených s úsporou znamená prostou dobu návratnosti překračující 7 let, taková doba návratnosti obecně není v podnikové energetice vnímána jako akceptovatelná. Pokud bychom navrhovanou technologii použili pro poskytování SVR, byla by doba návratnosti méně než poloviční. Vzhledem k tomu, že optimalizace spotřeby má stejné trendy jako mají SVR (koreluje s cenou na denním trhu) dá se očekávat, že tyto způsoby využití navrhovaných opatření lze kombinovat, čímž se doba návratnosti může zkrátit dokonce pod dobu návratnosti poskytování SVR.

Pro porovnání byla napočítána varianta s BESS o kapacitě 1 MWh a výkonu 0,5 MW, v takovém případě by klesla úspora pouhou optimalizací spotřeby na 2 %, je tedy patrné, že velká část úspory je generována baterií. Průběhy pro porovnání jsou v příloze této práce.

4. Závěr

Disertační práce se zabývá problematikou optimalizace spotřeby energie v rámci decentralizovaných energetických soustav, lokálních distribučních soustav a velkých energetických celků, které jsou z hlediska provozu v podstatě lokální distribuční soustavou. Práce také zdůrazňuje význam flexibility spotřeby a potenciál inovativních technologií, jako jsou smart grids a lokální distribuční soustavy, pro budoucí rozvoj energetiky.

Byla analyzována možnost využití matematických modelů pro řízení spotřeby, výroby a akumulace energie s cílem minimalizace nákladů a snížení závislosti na fosilních palivech. Praktická část práce demonstruje, že vhodně navržený model umožňuje efektivní řízení decentralizovaných systémů tak, aby byly zajištěny spolehlivé dodávky energie při maximální úspoře nákladů. Případová studie provedená na reálném modelovém podniku potvrzuje přínos optimalizovaného řízení v praxi, zejména ve formě snížení energetických nákladů (3,85%), zvýšení energetické spolehlivosti a nezávislosti podnikové energetiky, zároveň byl prokázán pozitivní vliv na elektrizační soustavu díky možnosti poskytování SVR, případně poskytování nově vznikající flexibility a v neposlední řadě došlo ke snížení emisí CO₂ o 6,8 %. Samotný ekonomický přínos optimalizace spotřeby se v tuto chvíli z výsledků případové studie nejeví jako významný, tím spíše, že nebyly započteny náklady na integraci použití optimalizovaných strategií. Na výsledky případové studie je nutné nahlížet v širších souvislostech jako jsou možnosti poskytování SVR, či regulační energie v budoucnu, nebo možnost působit v agregovaném celku jako poskytovatel flexibility. Dále je nutné si uvědomit, že vzhledem k plánům na odstavení uhelných zdrojů a růstu podílu obnovitelných zdrojů je schopnost velkých odběratelů přizpůsobit svoji spotřebu způsob, jak si zajistit vyšší spolehlivost dodávky

a v globálním hledisku i způsob, jak zastavit růst cen za služby spojené s provozem přenosových a distribučních soustav. Pro mnoho výrobních podniků je v současné době dostatek spolehlivé energie za stabilní cenu nejdůležitějším faktorem udržení jejich konkurenceschopnosti.

Naplnění cílů práce a uplatnění výsledků v praxi

Na základě modelu je možné vytvořit unikátní pokročilý software pro prediktivní řízení spotřeby energie v decentralizovaných energetických soustavách. Ten najde uplatnění v LDS, u firem které spravují rozsáhlé developerské projekty s více uživateli, dále právnické a fyzické osoby. Uplatnění se také najde u všech subjektů, které se rozhodnou realizovat energetické koncepce s prvky komunitní energetiky. Tyto subjekty nemají k dispozici žádný nástroj, kterým by dokázali dostupnou energii ideálně využívat. Výsledky práce se také mohou stát prvním krokem pro budoucí rozšíření do menších energetických celků (rodinné a bytové domy).

Od modelu pro prediktivní řízení spotřeby energie v decentralizovaných energetických soustavách se dá očekávat, že přinese následující pozitivní dopady:

Optimalizace odezvy na poptávku: Analýzou historických dat a informací v reálném čase lze předvídat vzorce spotřeby energie a optimalizovat strategie reakce na poptávku. Umožňuje identifikaci období špičkové poptávky a umožňuje přesouvání zátěže nebo opatření k omezení poptávky. Snížením špičkové poptávky a vyrovnáváním spotřeby energie pomáhá tento model optimalizovat využití energie a minimalizovat potřebu další výroby energie na bázi fosilních paliv, čímž snižuje emise skleníkových plynů.

Zvýšení energetické účinnosti: Díky náhledu na vzorce spotřeby energie lze identifikovat neefektivitu a navrhnout optimalizační strategie. Analýza údajů o spotřebě energie z různých zdrojů a zařízení v rámci decentralizovaných energetických systémů, jako jsou budovy nebo průmyslové budovy, umožní identifikovat oblasti, kde lze zlepšit energetickou účinnost. Zavedením těchto doporučení lze snížit spotřebu energie, což má za následek nižší emise uhlíku spojené s výrobou energie.

Integrace obnovitelných zdrojů energie: Díky predikci spotřeby lze efektivně koordinovat a optimalizovat využití energie z obnovitelných zdrojů. To umožňuje lepší koordinaci nabídky a poptávky po energii, snížení závislosti na výrobě energie z fosilních paliv a usnadnění zvýšeného využívání čistých a udržitelných zdrojů energie.

Vyrovnávání zátěže a stabilita sítě: Díky inteligentním řízením toku a ukládání energie v systému lze snížit potřebu záložní energie ze zdrojů na bázi fosilních paliv a zvýšit celkovou účinnost energetického systému.

Optimalizace skladování energie: Predikce vzorců spotřeby energie a výroby obnovitelné energie umožní optimalizovat skladování energie. Lze tak identifikovat nejlepší dobu pro nabíjení a vybíjení baterií a bude tak zajištěno, že přebytečná obnovitelná energie bude uložena, když je k dispozici, a využita během období špičky. To

pomáhá maximalizovat využití obnovitelné energie a snížit závislost na konvenčních zdrojích energie.

Závěry pro další rozvoj vědy a realizace v praxi

Vzhledem k situaci na trhu s energií rozličných energonositelů se dá předpokládat vývoj podobných systémů jako je systém v práci navrhovaný. Současný stav v energetice představuje možnost značného snížení nákladů pro velkoodběratele, kteří nakupují energie za spotové ceny, které jsou značně volatilní. Velkoodběratelé nemají softwarový nástroj, jak se této změně přizpůsobit, přestože vlastní hardware (pokročilé MaR), který by umožňoval změnu v přístupu k nasazování významných spotřebičů s velkou časovou konstantou, jako je například výroba tepla a chladu. Případně je možné nahradit část výroby tepla z plynu přebytky v síti, kde by bylo energii jinak potřeba mařit. Úspor tak lze dosáhnout velmi rychle pouze dodáním potřebného optimalizačního nástroje, samotné úpravy technologií nejsou zpravidla potřeba, ty by samozřejmě integraci těchto změn časově značně prodlužovaly. Další faktor proč dojde ke snaze o tvorbu a začlenění těchto systémů, může být tlak na udržení stability elektrizační soustavy a tlak na snížení nákladů na podpůrné služby. Toho mohou distribuční společnosti dosahovat aplikováním poplatků za distribuci v kritických časech, což by návratnost těchto řídicích SW řešení dále zrychlilo.

Z hlediska dalšího rozvoje vědy se nabízí rozšíření modelu na více LDS současně, čemuž nahrávají energetická společenství, která mají v současné době vznikající podporu v legislativě. Aplikací modelu na více LDS se zapojí více statistických vlivů, což umožní ještě lepší optimalizaci, jednotlivé LDS se pak budou navzájem doplňovat, například fotovoltaika v jedné LDS s KVET v druhé.

5. Literatura

- [1] Kodex přenosové soustavy II. ČEPS [online]. ČR: ČEPS, 2020, leden 2020 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>
- [2] Technologická agentura ČR. TK02010049: Ověření využitelnosti agregace flexibility s využitím řízení strany spotřeby pro potřeby regulace elektrizační soustavy [online]. Praha: Technologická agentura ČR, 2024 [cit. 2024-07-07]. Dostupné z: <https://starfos.tacr.cz>.
- [3] MINISTERSTVO PRŮMYSLU a OBCHODU. Hodnocení zdrojové přiměřenosti elektrizační soustavy ČR 2022 [online]. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2023 [cit. 2024-07-07]. Dostupné z: <https://www.mpo.gov.cz/assets/cz/energetika/elektroenergetika/2023/5/Hodnoceni-zdrojove-primerenosti-elektrizacni-soustavy-CR-2022.pdf>
- [4] **EVROPSKÁ KOMISE**. *Alternative Fuels Infrastructure* [online]. European Commission - Mobility and Transport, [cit. 2024-10-09]. Dostupné z: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/clean-transport/alternative-fuels-sustainable-mobility-europe/alternative-fuels-infrastructure_en.
- [5] Shekhawat, Khushboo & Doda, Devendra & Gupta, Abhishek & Bundele, Mahesh. (2019). Decentralised Power Generation Using Renewable Energy Resources: Scope, Relevance and Application. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 8. 3052-3060. 10.35940/ijitee.I8595.078919.
- [6] Schnidrig, J.; Chuat, A.; Terrier, C.; Maréchal, F.; Margni, M. Power to the People: On the Role of Districts in Decentralized Energy Systems. *Energies* 2024, 17, 1718. <https://doi.org/10.3390/en17071718>
- [7] Zarębski, P.; Katarzyński, D. Small Modular Reactors (SMRs) as a Solution for Renewable Energy Gaps: Spatial Analysis for Polish Strategy. *Energies* 2023, 16, 6491. <https://doi.org/10.3390/en16186491>
- [8] Kay Lup, Andrew & Soni, Vikram & Gwineth, Benjamin & Son, Jaewon & Taghartapeh, Mohammad & Menezes Morato, Marcelo & Poya, Yalinu & Mocholí Montañés, Rubén. (2023). Sustainable energy technologies for the Global South: Challenges and solutions toward achieving SDG 7. *Environmental Science: Advances*. 2. 10.1039/D2VA00247G.
- [9] Kojonsaari, AR., Palm, J. Distributed Energy Systems and Energy Communities Under Negotiation. *Technol Econ Smart Grids Sustain Energy* 6, 17 (2021). <https://doi.org/10.1007/s40866-021-00116-9>

- [10] ČEZ Distribuce. Pravidla provozování distribučních soustav – Příloha 4. [online] 2022. Dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/file/edee/distribuce/ppds/ppds-2022_priloha-4.pdf [cit. 2024-07-07].
- [11] EGC – EnerGoConsult ČB s.r.o. Regulace činného a jalového výkonu elektrických výroben. [online] Dostupné z: <https://www.egc-cb.cz/kompletni-realizace-energetickych-celku/regulace-cinneho-a-jaloveho-vykonu-elektrickych-vyroben.html> [cit. 2024-07-07].
- [12] Zhao, J.; Xu, F. Finite-Time Thermodynamic Modeling and a Comparative Performance Analysis for Irreversible Otto, Miller and Atkinson Cycles. *Entropy* 2018, 20, 75. <https://doi.org/10.3390/e20010075>
- [13] MINISTERSTVO PRŮMYSLU a OBCHODU. **Vyhláška o elektřině z vysokoúčinné kombinované výroby elektřiny a tepla a elektřině z druhotných zdrojů** [online]. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2012 [cit. 2024-07-07]. Dostupné z: <https://www.mpo.gov.cz/assets/dokumenty/47465/53528/594422/priloha004.pdf>
- [14] Ministerstvo průmyslu a obchodu. Kogenerace s využitím účinné výroby (KVET) – Spalovací pístový motor [online]. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2016 [cit. 2024-07-07]. Dostupné z: <https://www.mpo.gov.cz/assets/cz/energetika/energeticka-legislativa/legislativa-cr/2016/11/KVET-UPE-spalovaci-pistovy-motor.pdf>
- [15] WIND EUROPE. Větrná energie v Evropě: Statistika 2023 a výhled na období 2024-2030 [online]. 28. února 2024 [cit. 2024-07-07]. Dostupné z: <https://windeurope.org>.
- [16] Kiasari, M.; Ghaffari, M.; Aly, H.H. A Comprehensive Review of the Current Status of Smart Grid Technologies for Renewable Energies Integration and Future Trends: The Role of Machine Learning and Energy Storage Systems. *Energies* 2024, 17, 4128. <https://doi.org/10.3390/en17164128>
- [17] Votava, Jan and Saker, Maan and Ghanem, Safwan and Rehabi, Mohammad and Afif, Mudar and Fandi, G. and Muller, Zdenek and Krepl, Vladimír and Čábelková, Inna and Smutka, Lubos and Tlustý, Josef and Fandie, Soliman, Sustainable Energy Management System for Microgrids Assistant by Iot and Improving by Ai. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4841681> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4841681>
- [18] Hussain, A.; Bui, V.-H.; Kim, H.-M. Impact Analysis of Demand Response Intensity and Energy Storage Size on Operation of Networked Microgrids. *Energies* 2017, 10, 882. <https://doi.org/10.3390/en10070882>
- [19] Faqiry, M.N.; Edmonds, L.; Zhang, H.; Khodaei, A.; Wu, H. Transactive-Market-Based Operation of Distributed Electrical Energy Storage with Grid Constraints. *Energies* 2017, 10, 1891. <https://doi.org/10.3390/en10111891>

- [20] J. Votava, J. Kyncl, Z. Muller, L. Vetoshkin and J. Rimbala, "Optimized Use of the Steam Accumulator in the Combined Heat and Power Production," 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, Czech Republic, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/EPE.2019.8778141.
- [21] Bortotti, M.F.; Rigolin, P.; Udaeta, M.E.M.; Grimoni, J.A.B. Comprehensive Energy Analysis of Vehicle-to-Grid (V2G) Integration with the Power Grid: A Systemic Approach Incorporating Integrated Resource Planning Methodology. *Appl. Sci.* 2023, 13, 11119. <https://doi.org/10.3390/app132011119>
- [22] Boroojeni, K.G., Amini, M.H., Iyengar, S.S. (2017). Reliability in Smart Grids. In: *Smart Grids: Security and Privacy Issues*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45050-6_2
- [23] Mashal, I., Khashan, O.A., Hijjawi, M. et al. The determinants of reliable smart grid from experts' perspective. *Energy Inform* 6, 10 (2023). <https://doi.org/10.1186/s42162-023-00266-3>
- [24] Votava, Jan & Kyncl, Jan & Straka, Libor. (2018). Energy consumption measurements based on numerical integration. 1-4. 10.1109/EPE.2018.8395973.
- [25] Escoto, M.; Guerrero, A.; Ghorbani, E.; Juan, A.A. Optimization Challenges in Vehicle-to-Grid (V2G) Systems and Artificial Intelligence Solving Methods. *Appl. Sci.* 2024, 14, 5211. <https://doi.org/10.3390/app14125211>
- [26] Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR. Národní akční plán pro chytré sítě (NAP SG) [online]. Praha: MPO, 2015 [cit. 2024-07-07]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/elektroenergetika/2020/3/NAP_SG.pdf.
- [27] A. Zidan, E.F. El-Saadany, A cooperative multi-agent framework for self-healing mechanisms in distribution systems. *IEEE Trans. Smart Grid* 3 (3), 1525–1539 (2012)
- [28] Brož, F., Křivanec, L., Procházka, K., Votruba, S. Možnosti zvýšení spolehlivosti distribuce za použití inovativních prvků v propojených soustavách nn. *Elektroenergetika*. 2015, 65(6), 322-325, Praha: Český svaz zaměstnavatelů v energetice. ISSN 0375-8842.
- [29] Elektroenergetické datové centrum, a.s. *Flexibilita* [online]. 1. srpna 2024 [cit. 2024-07-07]. Dostupné z: <https://www.edc-cr.cz/pro-verejnost/nase-temata/flexibilita/>.
- [30] Skoblík, Václav. *Virtuální elektrárny jako byznys budoucnosti. O co jde a jak ovlivní energetiku?* [online]. Forbes, 2024 [cit. 2024-07-07]. Dostupné z: <https://forbes.cz/virtualni-elektrarny-jako-byznys-budoucnosti-o-co-jde-a-jak-ovlivni-energetiku/>.

- [31] Česká republika. Vyhláška č. 37/2016 Sb., o elektřině z vysokoúčinné kombinované výroby elektřiny a tepla a elektřině z druhotných zdrojů [online]. 2016 [cit. 2024-07-07]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-37>.
- [32] OTE, a.s. Záruky původu - Základní informace. [online] Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/zaruky-puvodu-a-povolenky/zaruky-puvodu/zakladni-informace> [cit. 2024-07-07].
- [33] Energetický regulační úřad. Energetický regulační věstník 4/2023. [online] Dostupné z: <https://eru.gov.cz/energeticky-regulacni-vestnik-42023#ke-stazeni> [cit. 2024-07-07].
- [34] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. **Pravidla provozování přenosové soustavy. Kodex přenosové soustavy, část II: Podpůrné služby (PpS)** [online]. Praha: Energetický regulační úřad, [cit. 2024-07-07]. Dostupné z: [<https://eru.gov.cz>]
- [35] ČEZ Distribuce, a.s. **Pro lokální distribuční soustavy** [online]. [cit. 2024-07-07]. Dostupné z: <https://www.cezdistribuce.cz/cs/pro-lokalni-distribucni-soustavy>
- [36] Technologická agentura ČR. Vývoj a implementace inovativních řešení pro chytré sítě [online]. Starfos, 2024 [cit. 2024-07-07]. Dostupné z: <https://starfos.tacr.cz/cs/projekty/TK02010078>.
- [37] VOTAVA, Jan. Dimenzování plynového parního kotle pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2017 [cit. 2024-07-07]. Diplomová práce. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/70100/F3-DP-2017-Votava-Jan-Jan_Votava_Diplomova_Prace.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [38] MINISTERSTVO PRŮMYSLU a OBCHODU. **Emisní faktor CO₂ z výroby elektřiny za léta 2010–2023** [online]. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2023 [cit. 2024-07-07]. Dostupné z: https://www.mpo.gov.cz/cz/energetika/statistika/elektrina-a-teplo/emisni-faktor-co2-z-vyroby-elektriny-za-leta-2010_2023--280262/
- [39] ELECTRICITYMAPS.COM. **Electricity Map - Czech Republic** [online]. Electricity Maps, 2024 [cit. 2024-07-23]. Dostupné z: <https://app.electricitymaps.com/zone/CZ?lang=cs>
- [40] CARBONCREDITS.COM. **Live Carbon Prices Today** [online]. CarbonCredits.com, 2024 [cit. 2024-07-23]. Dostupné z: <https://carboncredits.com/carbon-prices-today/>
- [41] ČEPS, a.s. **Průměrné ceny** [online]. Praha: ČEPS, a.s., 2024 [cit. 2024-07-23]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/statistiky-svr>
- [42] McDonald, J.D., Wojszczyk, B., Flynn, B., Voloh, I. (2012). Distribution Systems , Substations, and Integration of Distributed Generation. In: Meyers, R.A. (eds)

Encyclopedia of Sustainability Science and Technology. Springer, New York, NY.
https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3_761

- [43] XIANG, Y., LIU, J., YANG, W. et al. Active energy management strategies for active distribution system. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy* 3, 533–543 (2015).
<https://doi.org/10.1007/s40565-015-0159-2>
- [44] Hollm erus, Ilkka. The Power Shift: How Will Decentralized Markets Change the Energy Industry? [online]. Futurice, 2020 [cit. 2024-07-07]. Dostupn e z:
<https://www.futurice.com/blog/the-power-shift-how-will-decentralized-markets-change-the-energy-industry>.
- [45] Kojonsaari, AR., Palm, J. Distributed Energy Systems and Energy Communities Under Negotiation. *Technol Econ Smart Grids Sustain Energy* 6, 17 (2021).
<https://doi.org/10.1007/s40866-021-00116-9>
- [46] Forootan, M.M.; Larki, I.; Zahedi, R.; Ahmadi, A. Machine Learning and Deep Learning in Energy Systems: A Review. *Sustainability* 2022, 14, 4832.
<https://doi.org/10.3390/su14084832>
- [47] Phyo, P.-P.; Byun, Y.-C.; Park, N. Short-Term Energy Forecasting Using Machine-Learning-Based Ensemble Voting Regression. *Symmetry* 2022, 14, 160.
<https://doi.org/10.3390/sym14010160>
- [48] Votava, Jan & Kyncl, Jan & Straka, Libor. (2018). Optimization of local cogeneration stations. 1-6. 10.1109/EPE.2018.8396037.
- [49] Liu, Z.; Jia, W.; Liang, L.; Duan, Z. Analysis of Pressure Pulsation Influence on Compressed Natural Gas (CNG) Compressor Performance for Ideal and Real Gas Models. *Appl. Sci.* 2019, 9, 946. <https://doi.org/10.3390/app9050946>
- [50] Votava, Jan & Kyncl, Jan & Muller, Zdenek & Vetoshkin, Lavr & Rimbala, Jan. (2020). Primary Energy Reduction Using Small CHP Systems. 1-6. 10.1109/EPE51172.2020.9269204.
- [51] Rimbala, Jan & Votava, Jan & Kyncl, Jan. (2019). Assessment of Energy Consumption in the Residential Building with a Heat Pump. 1-5. 10.1109/EPE.2019.8778066.
- [52] Man, S.S.; Lee, W.K.H.; Chan, A.H.S.; Tsang, S.N.H. The Economic and Environmental Evaluations of Combined Heat and Power Systems in Buildings with Different Contexts: A Systematic Review. *Appl. Sci.* 2023, 13, 3855.
<https://doi.org/10.3390/app13063855>
- [53] Jansen, T. (2001). On Classifications of Fitness Functions. In: Kallel, L., Naudts, B., Rogers, A. (eds) Theoretical Aspects of Evolutionary Computing. Natural Computing Series. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04448-3_18

- [54] Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. *Optimization by Simulated Annealing*. Science, 1983, 220(4598), 671–680. DOI: 10.1126/science.220.4598.671.
- [55] Baeldung. *Simulované ochlazování* [online]. 2024 [cit. 2024-07-07]. Dostupné z: <https://www.baeldung.com/cs/simulated-annealing>.
- [56] Xu, L., Yin, T. Analysis of the Fourier series Dirichlet-to-Neumann boundary condition of the Helmholtz equation and its application to finite element methods. Numer. Math. 147, 967–996 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00211-021-01195-7>
- [57] Golyanik, V. *Diophantine equations: a systematic approach* [online]. arXiv, 2021 [cit. 2024-07-07]. Dostupné z: <https://ar5iv.labs.arxiv.org/html/2108.08705>.
- [58] Ferigo, A., Custode, L.L. & Iacca, G. Quality–diversity optimization of decision trees for interpretable reinforcement learning. *Neural Comput & Applic* (2023). <https://doi.org/10.1007/s00521-023-09124-5>
- [59] Laguna, M. (2018). Tabu Search. In: Martí, R., Pardalos, P., Resende, M. (eds) *Handbook of Heuristics*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07124-4_24
- [60] Katoch, S., Chauhan, S.S. & Kumar, V. A review on genetic algorithm: past, present, and future. *Multimed Tools Appl* **80**, 8091–8126 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6>

6. Seznam publikací

Publikace vztahující se k tématu disertační práce

Publikace v impaktovaných časopisech:

- [17] Votava, Jan and Saker, Maan and Ghanem, Safwan and Rehabi, Mohammad and Afif, Mudar and Fandi, G. and Muller, Zdenek and Krepl, Vladimír and Čábelková, Inna and Smutka, Lubos and Tlustý, Josef and Fandie, Soliman, Sustainable Energy Management System for Microgrids Assistant by Iot and Improving by Ai. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4841681> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4841681>

Práce souvisí s disertační prací tím, že se zabývá integrací mikrogridů do elektrizační soustavy, jejich optimalizací pomocí IoT a AI. K optimalizaci jsou použité predikční modely spotřeby a počasí. V této publikaci jsem pracoval na části rozhodovacích strategií o časovém využití a spotřebě elektrické energie.

Publikace ostatní:

- [19] J. Votava, J. Kyncl, Z. Muller, L. Vetoshkin and J. Rimbala, "Optimized Use of the Steam Accumulator in the Combined Heat and Power Production," 2019 20th

Práce souvisí s disertační prací tím, že se zabývá akumulací tepelné energie v podobě páry, tedy tepelné energie využívané v průmyslu. V této publikaci jsem pracoval na části modelování termodynamiky parního akumulátoru.

- [23] Votava, Jan & Kyncl, Jan & Straka, Libor. (2018). Energy consumption measurements based on numerical integration. 1-4. 10.1109/EPE.2018.8395973.

Práce souvisí s disertační prací tím, že se zabývá pokročilým měřením elektrické energie, které je základem k inteligentnímu řízení spotřeby a výroby elektrické energie. V této publikaci jsem pracoval na zpracování dat a tvorbě průběhů

- [47] Votava, Jan & Kyncl, Jan & Straka, Libor. (2018). Optimization of local cogeneration stations. 1-6. 10.1109/EPE.2018.8396037.

Práce souvisí s disertační prací tím, že se zabývá optimálním nasazováním kogeneračních jednotek pro vytápění v měřítku rodinných domů a malých ubytovacích zařízeních. V této publikaci jsem pracoval na části modelování otopné soustavy.

- [49] Votava, Jan & Kyncl, Jan & Muller, Zdenek & Vetoshkin, Lavr & Rimbala, Jan. (2020). Primary Energy Reduction Using Small CHP Systems. 1-6. 10.1109/EPE51172.2020.9269204.

Práce souvisí s disertační prací tím, že se zabývá kogenerací s akumulací na úrovni ostrovního systému a tím i optimalizací výroby a spotřeby. V této publikaci jsem pracoval na části rozhodovací strategie.

[50] Rimbala, Jan & Votava, Jan & Kyncl, Jan. (2019). Assessment of Energy Consumption in the Residential Building with a Heat Pump. 1-5. 10.1109/EPE.2019.8778066.

Práce souvisí s disertační prací tím, že se zabývá modelováním spotřeby tepla a jejím pokrýváním tepelnými čerpadly podle průběhu vnitřních a venkovních teplot. V této publikaci jsem pracoval na části modelování otopné soustavy.

Ostatní publikace nevztahující se k tématu disertační práce

L. Vetoshkin, J. Votava, J. Kyncl and Z. Müller, "Improvement of transient stability using STATCOM combined with optimization," 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, Czech Republic, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/EPE.2019.8778105.

Podíly spoluautorů na jednotlivých publikacích jsou rozděleny rovným dílem.

Ohlasy

Publikace [19] byla citována:

[C1] Madhlopa, Amos. (2022). Concepts of thermal energy storage and solar receivers. 10.1016/B978-0-323-85271-5.00006-9.

Publikace [23] byla citována:

[C1] Ma, Chi & Huang, Baosheng & Basher, Md & Rob, Md & Jiang, Yuqiang. (2024). Fuzzy PID Control Design of Mining Electric Locomotive Based on Permanent Magnet Synchronous Motor. *Electronics*. 13. 1855. 10.3390/electronics13101855.

[C2] Styslo, Bohdan & Danylchenko, Dmytro & Fedorchuk, Stanislav & Ivakhnov, Andrii & Dryvetskyi, Stanislav. (2024). Active Balancer with Targeted Charge Transfer Between Stack Batteries. 10.1007/978-3-031-67091-6_6.

Publikace [47] byla citována:

[C1] Wlas, M.; Galla, S.; Kouzou, A.; Kolodziejek, P. Analysis of an Energy Management System of a Small Plant Connected to the Rural Power System. *Energies* **2022**, *15*, 719. <https://doi.org/10.3390/en15030719>

- [C2] Jirinec, Jakub & Rot, David. (2019). Measuring System for Recuperation Units. Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science. 5. 10.1115/1.4043103.

Publikace [50] byla citována:

- [C1] Streckiene, Giedre & Kropas, Tomas & Mikučionienė, Rūta & Džiugaitė-Tumėnienė, Rasa. (2024). Energy and exergy analysis of an air source heat pump under variable ambient conditions. Journal of Environmental Engineering and Landscape Management. 32. 12-21. 10.3846/jeelm.2024.20771.
- [C2] Kemmler, Thomas & Thomas, Bernd. (2020). Design of Heat-Pump Systems for Single- and Multi-Family Houses Using a Heuristic Scheduling for the Optimization of PV Self-Consumption. Energies. 13. 1118. 10.3390/en13051118.

7. Přílohy

7.1 Regrese ročního průběhu spotřeby technologického tepla

```
yy = Drop[Drop[{plyn}, 3500], -2759]; (*Spotřeba plynu - výběr dat za letní období*)  
X = Table[elektrina[[i]], {i, 3500, 6000}];  
(*Spotřeba elektřiny - výběr dat za letní období*)
```

```
(*Trénink modelu*)
```

```
data = Transpose[{X, yy}];  
formattedData = Association @@ (Rule @@@ data);  
dataList = Normal[formattedData2];  
  
model = Predict[dataList2, Method → "NeuralNetwork",  
PerformanceGoal → "Quality", RandomSeeding → Automatic]
```

Out[72]=

```
PredictorFunction [  Input type: Numerical  
Method: NeuralNetwork ]
```

```
(*Spotřeba plynu pro technologii během celého roku*)
```

```
predictions = model /@ elektrina;
```

```
(*Spotřeba plynu pro vytápění*)
```

```
SpotrebaTop = spotrebaPlyn - predictions
```

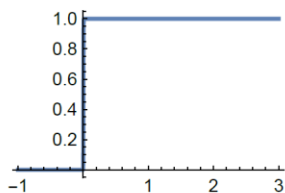
7.2 Konstanty otopné soustavy

Tato část kódu slouží ke stanovení konstanty otopné soustavy k_{Top} (kW/K) a dále k určení procenta využití tepelných zisků k_{Zisk} (-).

```
In[41]:= (*hledání parametrů otopné soustavy*)
datas = {Ptech, Ptop, teplspom};
n = Min[Length /@ datas];
datas2 = {Ptech2, Ptop2, teplspom2} = {Range[n], Take[#, n]}^T & /@ datas;
{iPtech, iPtop, iteplspom} =
  Interpolation[#, InterpolationOrder -> 0] & /@ {Ptech2, Ptop2, teplspom2};
```

```
In[39]:= vyr1[x_] := 0.5 * (1 + Tanh[500 (x - 0.005)]); (*Penalizační funkce,
pokud jsou tepelné zisky z technologie větší, než je potřeba tepla na vytápění*)
Plot[vyr1[x], {x, -1, 3}]
```

Out[40]=



(*Průběh použité penalizační funkce*)

```
In[44]:= err[t_] :=
  (((kTop * (Tin - iteplspom[t]) - kZisk * iPtech[t]) * vyr[kTop * (Tin - iteplspom[t]) -
    kZisk * iPtech[t]]) - iPtop[t])^2; (*Účelová funkce*)
errCelk = Total[err /@ Range[500]];
(*Výstup optimalizace - získané parametry otopné soustavy*)
NMinimize[errCelk, {kTop, kZisk}]
```


7.3 Omezující podmínky modelu (optimalizace pro trénování neuronových sítí)

Omezující podmínky modelu

```
cenyl1 - cena elektriny
spotrebyEl1 - spotreba elektriny
stavBaterie0 - pocatecni stav baterie

cenyllyn - cena plynu
spotrebyPara - spotreba pary
stavZasobnik0 - pocatecni stav zasobniku pary

spotrebaTopeni - spotreba tepla pro topeni
stavZasobnikTeplo0 - pocatecni stav zasobniku pro topeni (tepla voda)

param - parametry

kapacitaBaterie = "kapacitaBaterie" /. param;
nabijeciKapacita = "nabijeciKapacita" /. param;
vybijeciKapacita = "vybijeciKapacita" /. param;
If[("netopit" /. param) != "netopit",
  intervalyNulProTopeni = "netopit" /. param;
  ,
  intervalyNulProTopeni = {}];

parniAkumulator = "parniAkumulator" /. param;
(*parni akumulator pro technologii kWh*)
vybijeniParniAkumulator = "vybijeniParniAkumulator" /. param;
(*rampa vybijeni parni akumulace kWh/hod*)
nabijeniParniAkumulator = "nabijeniParniAkumulator" /. param;
(*rampa nabijeni parni akumulace kWh/hod*)

vodniAkumulator = "vodniAkumulator" /. param;
kogeneracePomer1 = "kogeneracePomer" /. param;
kogeneraceCelkVykon = "kogeneraceCelkVykon" /. param;

elektroKotel = "elektroKotel" /. param; (*max. vykon elektrokotle*)

n = Length[cenyl1];
(*elektrina *)
podminky = {};
xty = Array[premena1, n]; (*premena elektriky na teplo X→Y; velikost premeny*)
kog = Array[kogen, n]; (*premena plynu na (vytapani + elektrinu);
kogenerace *)
x = Array[sit, n]; (*odber ze site/ dodavka do site neni povolena *)
baterie = Array[b, n];

y = Array[plyn, n]; (*odber plynu do pary / dodavka do je nesmysl*)
parniAku = Array[c, n];
```

```

ytz = Array[vytapeni, n]; (*odber pary do vytapeni / dodavka zpět je nesmysl*)
vodniAku = Array[d, n];

(*elektrika *)
AppendTo [podminky, baterie[[1]] ==
    stavBaterie0 + x[[1]] - spotrebyEl1[[1]] - xty[[1]] + kog[[1]] * kogeneracePomer1[[2]]];
AppendTo [podminky, x[[1]] ≥ 0]; (*x-odber ze site;s1-je spotreba*)
AppendTo [podminky, baterie[[1]] ≥ 0]; (*baterie se nesmi se vybit do zaporna*)
AppendTo [podminky, baterie[[1]] ≤ kapacitaBaterie];
AppendTo [podminky, baterie[[1]] - stavBaterie0 ≤ nabijeciKapacita];
AppendTo [podminky, stavBaterie0 - baterie[[1]] ≤ vybijeciKapacita];
(*Plyn; technologie*)
AppendTo [podminky,
    parniAku[[1]] == stavZasobnik0 + y[[1]] - spotrebyPara[[1]] + xty[[1]] - ytz[[1]]];
AppendTo [podminky, y[[1]] ≥ 0]; (*x-odber ze site;s1-je spotreba*)
AppendTo [podminky, parniAku[[1]] ≥ 0]; (*baterie nesmi se vybit do zaporna*)
AppendTo [podminky, parniAku[[1]] ≤ parniAkumulator];
AppendTo [podminky, parniAku[[1]] - stavZasobnik0 ≤ nabijeniParniAkumulator];
AppendTo [podminky, stavZasobnik0 - parniAku[[1]] ≤ vybijeniParniAkumulator];

AppendTo [podminky, vodniAku[[1]] ==
    stavZasobnikTeplo0 + ytz[[1]] - spotrebaTopeni[[1]] + kog[[1]] * kogeneracePomer1[[1]]];
AppendTo [podminky, ytz[[1]] ≥ 0]; (*y-odber pary na vytapeni*)
AppendTo [podminky, vodniAku[[1]] ≥ 0]; (*baterie nesmi se vybit do zaporna*)
AppendTo [podminky, vodniAku[[1]] ≤ vodniAkumulator];
(*premena pary na teplou vodu nema omezeni*)

AppendTo [podminky, xty[[1]] ≥ 0]; (*x-odber ze site el.;y-je para*)
AppendTo [podminky, xty[[1]] < elektroKotel]; (*x-odber ze site;
s1-je spotreba*)

AppendTo [podminky, kog[[1]] ≥ 0]; (*x-odber plynu*)
AppendTo [podminky, kog[[1]] < kogeneraceCelkVykon];

Do[
    AppendTo [podminky, baterie[[t]] ==
        baterie[[t - 1]] + x[[t]] - spotrebyEl1[[t]] - xty[[t]] + kog[[t]] * kogeneracePomer1[[2]]];
        (*x-odber ze site;
s1-je spotreba*)
    AppendTo [podminky, x[[t]] ≥ 0]; (*x-odber ze site;s1-je spotreba*)
    AppendTo [podminky, baterie[[t]] ≥ 0];
        (*baterie nesmi se vybit do zaporna*)
    AppendTo [podminky, baterie[[t]] ≤ kapacitaBaterie];
        (*baterie nesmi prekrocit maximalni kapacitu*)
    AppendTo [podminky, baterie[[t]] - baterie[[t - 1]] ≤ nabijeciKapacita];
        (*baterie nesmi prekrocit maximalni rychlost nabijeni*)
    AppendTo [podminky, baterie[[t - 1]] - baterie[[t]] ≤ vybijeciKapacita];
        (*baterie nesmi prekrocit maximalni rychlost vybijeni*)

```

```

AppendTo[podminky,
  parniAku[[t]] == parniAku[[t - 1]] + y[[t]] - spotrebyPara[[t]] + xty[[t]] - ytz[[t]];
(*x-odber ze site;
s1-je spotreba*)
AppendTo[podminky, y[[t]] ≥ 0]; (*x-odber ze site;s1-je spotreba*)
AppendTo[podminky, parniAku[[t]] ≥ 0];
(*baterie nesmi se vybit do zaporna*)
AppendTo[podminky, parniAku[[t]] ≤ parniAkumulator];
(*baterie nsemi prekrocit maximalni kapacitu*)
AppendTo[podminky, parniAku[[t]] - parniAku[[t - 1]] ≤ nabiieniParniAkumulator];
(*baterie nsemi prekrocit maximalni rychlost nabijeni*)
AppendTo[podminky, parniAku[[t - 1]] - parniAku[[t]] ≤ vybijeniParniAkumulator];
(*baterie nesmi prekrocit maximalni rychlost vybijeni*)

AppendTo[podminky, vodniAku[[t]] ==
  vodniAku[[t - 1]] + ytz[[t]] - spotrebaTopeni[[t]] + kog[[t]] * kogeneracePomer1[[1]]];
AppendTo[podminky, ytz[[t]] ≥ 0]; (*y-odber pary na vytapeni*)
AppendTo[podminky, vodniAku[[t]] ≥ 0];
(*baterie nesmi se vybit do zaporna*)
AppendTo[podminky, vodniAku[[t]] ≤ vodniAkumulator];

AppendTo[podminky, xty[[t]] ≥ 0];
(*x-odber ze site;
s1-je spotreba*)
AppendTo[podminky, xty[[t]] < elektroKotel];
(*x-odber ze site;
s1-je spotreba*)

AppendTo[podminky, kog[[t]] ≥ 0]; (*kog-odber plynu pro kogen.*)
AppendTo[podminky, kog[[t]] < kogeneraceCelkVykon];
, {t, 2, n}];

(*doani podminky pro odstaveni topeni mimo topnou
sezonu tj. aspon 1 den se netopi nebo parametrizace jina*)
If[intervalyNulProTopeni != {},
  Do[
    If[# ≤ n,
      AppendTo[podminky, vodniAku[[#]] == 0];] & /@
      Range[intervalyNulProTopeni[[inx4, 1]], intervalyNulProTopeni[[inx4, 2]]];
    ,
    {inx4, Length[intervalyNulProTopeni]}]
  ];

cena = cenyEl1.x + cenyPlyn. (y + kog); (*+Variance[x]/20;*)
nn = NMinimize[Flatten[{cena, podminky}],
  Flatten[{x, baterie, y, parniAku, xty, vodniAku, ytz, kog}]];
(**
  odber sit=spotreba+baterka
  x=s+baterka
*)

```



```

cena2E1 = ((cenyE11.x) /. nn[[2]]);
cena2Plyn = ((cenyPlyn.(y + kog)) /. nn[[2]]);
<| (*sitOp=*)
"odberSit_E1" → x /. nn[[2]], (*spotreba elektriny vuci siti*)
"odber_Plyn" → y /. nn[[2]], (*spotreba plynu vuci siti tj. para+topeni*)
"prevod_na_vytapeni" → ytz /. nn[[2]],
(*premena pary→topeni, takze bilancne uz v "Y"*)
"elektrokotel_to_para" → xty /. nn[[2]],
"plyn_to_kogenerace" → kog /. nn[[2]],
"stavBaterie" → baterie /. nn[[2]],
"parniAku" → parniAku /. nn[[2]],
"vodniAku" → vodniAku /. nn[[2]],
"KSpotreba_E1" → spotrebyE11, "KCena_E1" → cenyE11,
"cenaBezOpt_E1" → (cenyE11.spotrebyE11), "cenaPoOpt_E1" → cena2E1(*nn[[1]]*),
"cenaBezOpt_Plyn" → (cenyPlyn.(spotrebyPara + spotrebaTopeni)),
"cenaPoOpt_Plyn" → cena2Plyn,
"cenaBezOpt" → cenyE11.spotrebyE11 + cenyPlyn.(spotrebyPara + spotrebaTopeni),
"cenaPoOpt" → cena2E1 + cena2Plyn
|>
(*Kspotreba - jen pro kontrolu vypoctu, zda je spotrebna spravna*)
];

```