

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA  
V BRATISLAVE**

**FAKULTA CHEMICKEJ A POTRAVINÁRSKEJ  
TECHNOLÓGIE**

Evidenčné číslo: FCHPT-5414-76098

**Statická a dynamická optimalizácia  
virtuálnych elektrární**

**DIPLOMOVÁ PRÁCA**

2020

Bc. Tereza Ábelová



**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA  
V BRATISLAVE**

**FAKULTA CHEMICKEJ A POTRAVINÁRSKEJ  
TECHNOLÓGIE**

Evidenčné číslo: FCHPT-5414-76098

# **Statická a dynamická optimalizácia virtuálnych elektrární**

**DIPLOMOVÁ PRÁCA**

Študijný program: automatizácia a informatizácia v chémii a potravinárstve  
Študijný odbor: 19. Kybernetika  
Školiace pracovisko: Ústav informatizácie, automatizácie a matematiky  
Vedúci práce: doc. Ing. Michal Kvasnica, PhD.

**2020**

**Bc. Tereza Ábelová**





## ZADANIE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Študentka: **Bc. Tereza Ábelová**  
ID študenta: 76098  
Študijný program: automatizácia a informatizácia v chémii a potravinárstve  
Študijný odbor: kybernetika  
Vedúci práce: doc. Ing. Michal Kvasnica, PhD.  
Miesto vypracovania: Oddelenie informatizácie a riadenia procesov (ÚIAM FCHPT)

Názov práce: **Statická a dynamická optimalizácia virtuálnych elektrární**

Jazyk, v ktorom sa práca vypracuje: slovenský jazyk

Špecifikácia zadania:

Cieľom práce je navrhnuť a implementovať systém na optimalizáciu topológie a prevádzky virtuálnych elektrární, ktoré sa skladajú z veľkého množstva malých zdrojov. Príkladom sú napr. obnoviteľné zdroje energie, ale aj kontrahovanie chladiacich kapacít v supermarketoch či priemyselných jednotkách, kde zníženie žiadanej hodnoty na teplotu hoc i o 1 stupeň celzia môže viesť k úsporám spotreby, ktoré sa dajú využiť v inej časti siete. Pre každý zdroj sú prítom platné iné ohraničenia, ktoré je potrebné dodržať. Cieľom statickej optimalizácie je zistiť, akú maximálnu špičkovú kapacitu dokáže dané zapojenie zdrojov generovať a po aký čas. Úlohou dynamickej optimalizácie je potom v čase riadiť jednotlivé zdroje podľa aktuálnych požiadaviek, opäť pri rešpektovaní ich ohraničení.

Riešenie zadania práce od: 17. 02. 2020

Dátum odovzdania práce: 07. 06. 2020

**Bc. Tereza Ábelová**  
študentka

**doc. Ing. Michal Kvasnica, PhD.**  
vedúci pracoviska

**prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.**  
garant študijného programu



## Podakovanie

Velké ďakujem patrí vedúcemu mojej práce, doc. Ing. Michalovi Kvasnicovi, PhD. za jeho podporu a ochotu pomôcť svojou odbornosťou. Chcela by som sa poďakovať aj konzultantom práce, RNDr. Ing. Mikulášovi Praščákovi a Ing. Michalovi Sekerákovi za ich odborné rady, znalosti a inšpiráciu. V neposlednom rade pri poďakovaní myslím na tých, vďaka ktorým som sa rozhodla pre štúdium automatizácie a na tých, vďaka ktorým som ho mohla absolvovať na oddelení informatizácie a riadenia procesov.





# Čestné vyhlásenie

---

Vyhlasujem, že predloženú záverečnú prácu som vypracovala samostatne pod vedením vedúceho záverečnej práce, s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú citované v práci a uvedené v zozname použitej literatúry. Ako autorka záverečnej práce ďalej prehlasujem, že som v súvislosti s jej vytvorením neporušila autorské práva tretích osôb.



# Abstrakt

---

Táto diplomová práca sa venuje téme virtuálnej elektrárne – subjektu na energetickom trhu agregujúceho distribuované zdroje flexibility s cieľom pomôcť stabilizácii elektrizačnej sústavy pri rozmachu obnoviteľných zdrojov. Samostatne distribuované zdroje nie sú schopné priamo poskytovať podporné služby, pretože sú príliš malé a/alebo s prerušovanou disponibilitou. Môže ísť o zariadenia vyrábajúce elektrinu, ale aj elektrinu odoberajúce, ak môžu riadiť svoju spotrebu. Cieľom práce je vytvoriť optimalizačný model, ktorý bude brať do úvahy všetky obmedzenia zariadení rôznych typov a nájde spôsob ako ich riadiť s dosiahnutím čo najlepšieho výsledku. Úloha je formulovaná v prostredí MATLAB s použitím modelovacieho toolboxu YALMIP ako rozsiahly binárny optimalizačný problém, na ktorého riešenie sa použil výkonný solver určený na celočíselné programovanie.

## **Kľúčové slová:**

Agregátor v energetike, distribuované zdroje flexibility, celočíselná optimalizácia.



# Abstract

---

This master thesis deals with the topic of the virtual power plant – a subject on the energy market, which aggregates the heterogeneous distributed energy resources. Virtual power plant can help with the power grid stabilization, what is necessary because of expansion of renewable sources. Distributed energy resources alone are not able to provide sustainable power for the grid balancing, because they are too small or inconsistent in the power delivery. As a distributed energy resource can be considered an energy source, storage, or energy consumption unit. The aim of this work is to create an optimization model, handling all possible constraints while finding the best way how to control all resources. The problem is formulated in the MATLAB environment using the YALMIP toolbox as a large mixed-integer linear program and solved with the high-performance solver.

## **Keywords:**

Virtual power plant, distributed energy resources, integer optimization.



# Obsah

---

<b>Abstrakt</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>Zoznam skratiek</b>	<b>xv</b>
<b>Zoznam symbolov</b>	<b>xvii</b>
<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>I Teoretická časť</b>	<b>3</b>
<b>1 Energetika</b>	<b>5</b>
1.1 Elektrizačná sústava . . . . .	5
1.2 Zdroje elektrickej energie . . . . .	7
1.3 Skladovanie energie . . . . .	8
1.3.1 Prečerpávacie elektrárne . . . . .	8
1.3.2 Elektrochemické akumulátory . . . . .	9
1.4 Stabilita siete . . . . .	9
1.4.1 Synchronná sústava . . . . .	11
1.4.2 Podporné služby . . . . .	11

---

<b>2</b>	<b>Agregátor</b>	<b>13</b>
2.1	Výhody a nevýhody . . . . .	14
2.2	Distribúované zdroje flexibility . . . . .	16
2.2.1	Distribúované zdroje energie . . . . .	16
2.2.2	Riadenie odberu . . . . .	16
2.2.3	Typy DER a ich vlastnosti . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Optimalizácia</b>	<b>25</b>
3.1	Všeobecná matematická formulácia . . . . .	26
3.2	Konvexnosť . . . . .	27
3.3	Celočíselná optimalizácia . . . . .	28
3.3.1	Aplikácie . . . . .	28
3.3.2	Matematická formulácia celočíselného problému . . . . .	29
3.3.3	Metóda vetiev a hraníc . . . . .	30
3.3.4	Metóda vetiev a rezov . . . . .	33
<b>II</b>	<b>Praktická časť</b>	<b>35</b>
<b>4</b>	<b>Typy obmedzení zdrojov</b>	<b>37</b>
4.1	Maximálny čas zapnutia/vypnutia . . . . .	37
4.2	Minimálny čas zapnutia/vypnutia . . . . .	38
4.3	Maximálny čas v danom intervale . . . . .	39
4.4	Stav nabitia . . . . .	39
<b>5</b>	<b>Súbor zdrojov</b>	<b>41</b>
5.1	Individuálne obmedzenia zdrojov . . . . .	43



---

<b>6</b>	<b>Optimalizácia súboru</b>	<b>49</b>
6.1	Statická optimalizácia . . . . .	49
6.1.1	Matematická formulácia statickej optimalizácie . . . . .	50
6.1.2	Riešenie statickej optimalizácie . . . . .	52
6.2	Dynamická optimalizácia . . . . .	57
6.2.1	Matematická formulácia dynamickej optimalizácie . . . . .	58
6.2.2	Riešenie dynamickej optimalizácie . . . . .	58
6.3	Diskusia . . . . .	61
	<b>Záver</b>	<b>63</b>
	<b>Literatúra</b>	<b>65</b>



# Zoznam skratiek

---

<b>aFRR</b>	automatic Frequency Restoration Reserve (slovenským ekvivalentom je sekundárna regulácia činného výkonu)
<b>B&amp;B</b>	Branch-and-Bound (metóda vetiev a hraníc)
<b>B&amp;C</b>	Branch-and-Cut (metóda vetiev a rezov)
<b>BTM</b>	Behind-the-Meter (meranie za elektromerom)
<b>DER</b>	Distributed Energy Resource (distribučovaný zdroj flexibility)
<b>DG</b>	Distributed Generation (distribučovaný zdroj energie)
<b>DR</b>	Demand Response (riadenie odberu)
<b>ENTSO-E</b>	European Network of Transmission System Operators for Electricity (Európska sieť prevádzkovateľov prenosových sústav pre elektrinu)
<b>ES</b>	Elektrizačná sústava
<b>FCR</b>	Frequency Containment Reserve (slovenským ekvivalentom je primárna regulácia činného výkonu)
<b>LP</b>	Linear Programming (lineárne programovanie)
<b>mFRR</b>	manual Frequency Restoration Reserve (slovenským ekvivalentom je terciárna regulácia činného výkonu)
<b>MILP</b>	Mixed-Integer Linear Programming (zmiešané celočíselné lineárne programovanie)
<b>MIP</b>	Mixed-Integer Programming (zmiešané celočíselné programovanie)

<b>NP</b>	Nedeterministický polynomiálny
<b>PpS</b>	Podporné služby (patria sem PRV, SRV, TRV, ZNO a ZVO)
<b>PRV</b>	Primárna regulácia činného výkonu
<b>PV</b>	Photovoltaics (fotovoltika)
<b>SEPS</b>	Slovenská elektrizačná prenosová sústava, a. s.
<b>SoC</b>	State of Charge (stav nabitia)
<b>SRV</b>	Sekundárna regulácia činného výkonu
<b>TRV</b>	Terciárna regulácia činného výkonu
<b>VPP</b>	Virtual Power Plant (virtuálna elektrárň)
<b>ZNO</b>	Zníženie odberu
<b>ZVO</b>	Zvýšenie odberu

# Zoznam symbolov

---

## Množiny a indexy

$t \in \mathcal{T}$  Časové kroky s dĺžkou  $T_s$ , množina  $\mathcal{T} = \{1, \dots, N\}$

$z \in \mathcal{Z}$  Množina všetkých zariadení, obsahuje podmnožiny zariadení  $\mathcal{Z}_x$  s istými typmi ohraňení

## Parametre

$a_z(t)$  Dostupnosť zariadenia podľa jeho prevádzkovej doby

$\alpha_z$  Parameter batérie charakterizujúci výdrž

$\beta_z$  Parameter batérie charakterizujúci dobu obnovy

$D_z^{\max}$  Maximálny čas vypnutia

$D_z^{\min}$  Minimálny čas vypnutia

$E_z$  Výdrž batérie

$I_z$  Dĺžka intervalu, v ktorom je definované ohraňenie

$M_z$  Povolený čas zapnutia v intervale  $I_z$

$N$  Počet časových okien s dĺžkou  $T_s$  v celom časovom horizonte  $T$

$p_{\text{ref}}(t)$  Požiadavka na dodaný výkon v čase  $t$

$P_z^{\text{unit}}$  Jednotkový výkon zariadenia

$R_z$	Doba obnovenia batérie
$S_z$	Podiel nedostupnosti, tzv. shutdown
$T$	Dĺžka časového horizontu
$T_s$	Periódna vzorkovania, v tejto práci uvažujeme 15 min
$U_z^{\max}$	Maximálny čas zapnutia
$U_z^{\min}$	Minimálny čas vypnutia

### Premenné

$\gamma_z(t)$	Pomocná optimalizovaná premenná pri počítaní $SOC_z(t)$
$\delta_z(t)$	Binárna optimalizovaná premenná vyjadrujúca zapnutý/vypnutý stav
$O_z(t)$	Indikátor zapnutia
$P$	Výkon
$p(t)$	Hodnota výkonu v každom čase
$SOC_z(t)$	Stav nabitia
$V_z(t)$	Indikátor vypnutia

# Úvod

---

V energetickom sektore nastáva postupný odklon od konvenčných centralizovaných zdrojov výroby energie smerom k obnoviteľným zdrojom, ktoré z princípu ich fungovania sú distribuované. Narastajúci objem obnoviteľných zdrojov energie súčasne nesie so sebou problém narastajúcej volatility z dôvodu nepredikovatelnosti týchto zdrojov, čo má veľký vplyv na stabilitu prenosovej sústavy. S týmito zmenami súčasne stúpa tlak na efektivitu distribúcie a spotreby energie.

Z týchto dôvodov vzniká potreba zmeny prístupu pri riešení rýchlo sa meniacej situácie stability prenosovej sústavy a potreby flexibilnejšieho a efektívnejšieho spôsobu balansovania siete. Stavanie konvenčných zdrojov na poskytovanie podporných služieb je nákladné a neefektívne.

Jedným z riešení situácie je zavedenie subjektu agregátora na energetický trh. Agregátor združuje distribuovanú flexibilitu a tým zvyšuje efektívne využitie existujúcich zdrojov.

Zvyšujúci sa dopyt po batériových úložiskách energie a ich klesajúce náklady na výrobu prispievajú k rozmachu virtuálnych elektrární, pretože sú ideálne flexibilným zdrojom. Ďalšie zo zariadení, ktoré môžu byť zapojené sú dieselagregáty, vzduchotechnické jednotky, bioplynové stanice a iné zariadenia na výrobu alebo spotrebu energie.

Konvenčné zdroje na poskytovanie podporných služieb sú realizované na relatívne malom množstve zdrojov s veľkou kapacitou a trvalou disponibilitou. Agregátor naopak združuje veľké množstvo zdrojov, ktoré samé o sebe nespĺňajú podmienky na priame poskytovanie podporných služieb (či už z dôvodu nedostatočnej kapacity alebo disponibility). Každý jednotlivý zdroj má definovanú dostupnú flexibilitu, ktorú môže poskytnúť, ako aj sadu obmedzení kedy má danú flexibilitu dostupnú.

Súčasným riadením veľkého množstva malých zdrojov je možné vyskladať v každom časovom okamihu istú mieru dostupnej kapacity a ponúkať ju na energetickom trhu pre bilančné skupiny alebo pre prevádzkovateľa prenosovej sústavy.

Úlohou tejto práce je navrhnúť optimalizačný model pre nájdenie minimálnej hodnoty kapacity, ktorej disponibilita je trvale dostupná. Takáto kapacita spĺňa podmienky na poskytovanie podpornej služby a je ju možné poskytnúť na balansovanie siete.

Práce je rozdelená na teoretickú a praktickú časť. V kapitole 1 objasníme fungovanie energetického sektora, čo sú a na čo potrebujeme podporné služby. V ďalšej kapitole predstavíme agregátor a distribuované zdroje flexibility. V kapitole 3 opíšeme teóriu optimalizácie od základov po metódy na riešenie celočíselných problémov, ktoré sú náročné z výpočtového a časového hľadiska, ale dovoľujú nám riešiť binárne rozhodovacie úlohy.

V praktickej časti prejdeme k opisu jednotlivých zariadení zaradených v súbore a modelovaní príslušných obmedzení. Na záver, v kapitole 6 formulujeme účelovú funkciu a prezentujeme výsledky statickej optimalizácie, ktorou zistíme maximálny potenciál súboru a následne výsledky dynamickej optimalizácie, ktorá má simulovať aktiváciu zariadení v reálnom čase.



Časť I

**Teoretická časť**



# Energetika

---

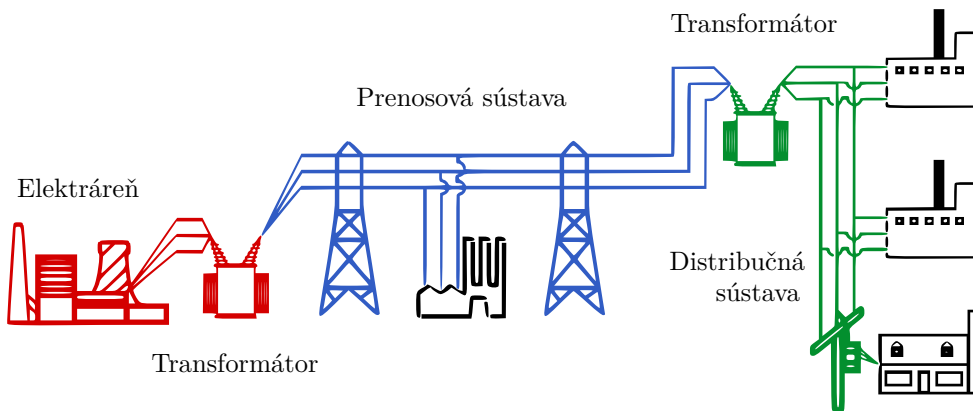
V súčasnosti je svet nevyhnutne závislý od elektrickej energie a jej výroby. Výroba a spotreba elektrickej energie je vzájomne veľmi úzko previazaná, takmer všetka vyrobená elektrina je aj okamžite spotrebovaná bez ohľadu na to ako ďaleko od seba je výrobca a spotrebiteľ energie. Tento okamžitý prenos je umožnený infraštruktúrou elektrizačnej sústavy zloženej z niekoľkých častí. Keďže elektrinu sieť nedokáže uchovať, vyrobenej elektriny v každom momente je potrebné mať presne toľko koľko sa jej spotrebuje (vrátane strát), inak môže dôjsť k výpadku až kolapsu siete.

## 1.1 Elektrizačná sústava

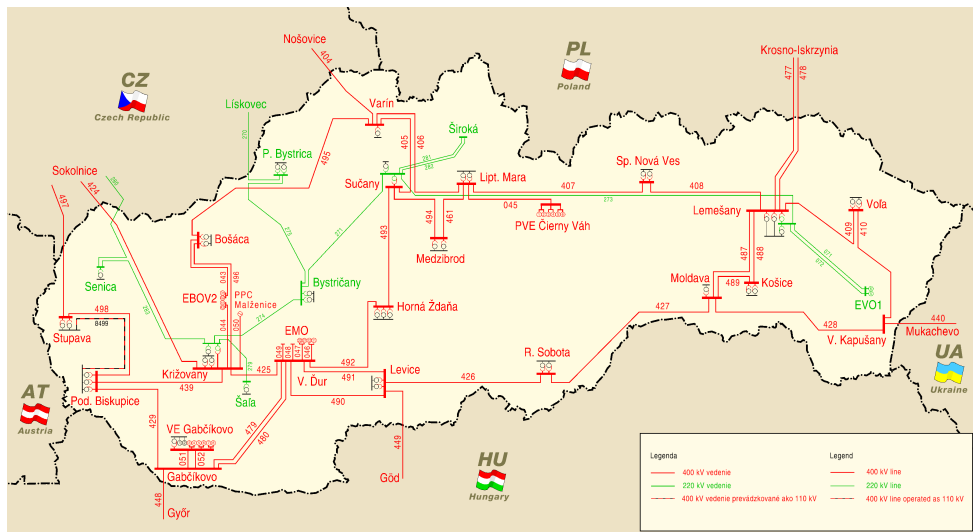
Elektrizačná sústava (**ES**) sa skladá zo zariadení na výrobu elektriny, jej prenos, distribúciu a transformáciu (obr. 1.1).

Prenosová sústava slúži na prenos elektrickej energie na veľké vzdialenosti, od výroby k rozvodniam. Na Slovensku prenosovú sústavu (obr. 1.2) prevádzkuje Slovenská elektrizačná prenosová sústava, a. s. (**SEPS**), ktorá je prepojená s európskou sústavou (**ENTSO-E**) združujúcou systémových operátorov v rámci EÚ. Slovensko je tým v jednej spoločnej synchrónnej oblasti s väčšinou krajín Európy.

Základnou kostrou prenosovej sústavy je vonkajšie elektrické vedenie vysokého napätia. Elektrárne produkujúce vysoký výkon vyrábajú prúd v rozsahu tisícok ampérov pri napätí len niekoľko tisíc voltov. Pri prenose na veľké vzdialenosti je z hľadiska



Obr. 1.1: Schéma elektrizačnej sústavy: červená – výroba elektriny, modrá – prenos, zelená – distribúcia, čierna – spotrebiteľ.<sup>1</sup>



Obr. 1.2: Mapa prenosovej sústavy na Slovensku.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Zdroj: United States Department of Energy, by J. Messerly, upravené

<sup>2</sup> Zdroj: <https://www.sepsas.sk/SchemaSiete.asp?kod=17>

strát vhodnejšie udržiavať prúd čo najmenší, aby sa minimalizovali ohmické straty priamoúmerné druhej mocnине prúdu. Súčin elektrického prúdu a napätia na vstupe a výstupe transformátora je konštantný, preto sa napätie v transformačných staniciach mení na vysoké (400, 220 a 110 kV).

Neskôr je nutné napätie opäť znížiť na 35 kV až 230 V a distribuovať k spotrebiteľom. Na Slovensku existujú 3 veľké regionálne distribučné sústavy (pripojených viac ako 100 000 odberných miest) a stovky miestnych distribučných sústav (menej ako 100 000 odberných miest).

## 1.2 Zdroje elektrickej energie

Podľa prvého termodynamického zákona v izolovanom systéme energiu nie je možné vytvoriť, iba premeniť z jednej formy na inú. Najčastejšie je premieňaná tepelná energia cez mechanickú na elektrickú. Striedavé elektrické napätie a prúd sú generované alternátorom, ktorý transformuje kinetickú energiu rotačného pohybu na elektrickú a pracuje na princípe elektromagnetickej indukcie.

Generátor je vo väčšine prípadov poháňaný turbínou, ktorá premieňa energiu vodnej pary, para sa vytvára spaľovaním rozličného média (jadrové, uhľové elektrárne) alebo priamym teplom (geotermálne, solárne koncentračné elektrárne). V druhom prípade je turbína poháňaná potenciálnou energiou vody (vodné elektrárne) alebo kinetickou energiou vetra (veterné elektrárne). Iným typom výroby elektriny úplne obchádzajúcim alternátor a mechanickú energiu je využitie fotoelektrického javu – premieňanie slnečného žiarenia na jednosmerný elektrický prúd (fotovoltické elektrárne).

Zdroje elektrickej energie v súčasnosti delíme na konvenčné a obnoviteľné. Všetky typy elektrární majú svoje výhody a nevýhody. Líšia sa dobou výstavby a životnosti, počiatočnými a prevádzkovými nákladmi, regulovateľnosťou a vplyvom na životné prostredie.

Podľa IEA (International Energy Agency) [4] sa v roku 2017 vyrobilo 25 606 TWh elektrickej energie, z toho najviac, až 38,5 % bolo vyrobených z uhlia (zahŕňajúc bridlicu a rašelinu), 23,0 % zo zemného plynu, 15,9 % tvorili vodné elektrárne,

10,3 % jadrové elektrárne, 9,0 % energie bolo vytvorených z obnoviteľných zdrojov (geotermálne, fotovoltaické, veterné a i. okrem vodných elektrární) a 3,0 % z ropy. Celosvetová ročná výroba/spotreba elektriny rastie. Najrýchlejšie tempo rastu za posledné roky majú obnoviteľné zdroje, ale najväčší objemový prírastok majú fosílné palivá, najmä zemný plyn.

Na Slovensku [16] je od roku 2016 spotreba elektrickej energie nad úrovňou 30 TWh, v roku 2018 konkrétne 30 947 GWh. Množstvo vyrobenej elektriny v roku 2018 zo zdrojov na území Slovenska bolo 27 149 GWh, ide o pokles oproti predchádzajúcemu roku. Rozdiel je dovezený zo zahraničia. Nadpolovičný podiel z vyrobenej elektriny má jadrové palivo, druhá najväčšia časť elektriny je vyrobená z fosílnych palív (z toho najviac zemný plyn, čierne a hnedé uhlie), až 21,7 %. Vodné elektrárne mali na Slovensku 14,4-percentný podiel. Od roku 2004 vyrobili najmenší objem elektriny, prepad zapríčinilo extrémne sucho v jarých a letných mesiacoch. Z obnoviteľných zdrojov sa v roku 2018 vyrobilo 8,8 % elektrickej energie, prevažne z biomasy, zvyšok tvoria fotovoltaické elektrárne a bioplyn. Maximálne zaťaženie elektrizačnej sústavy dosiahlo hodnotu 4 506 MW, zatiaľ čo celkový inštalovaný výkon elektrární na území Slovenska je 7 728 MW.

## 1.3 Skladovanie energie

Súčasťou elektrizačnej sústavy na zabezpečenie jej chodu musia byť aj úložiská energie. Energia sa do nich dočasne ukladá v čase nadbytku a do siete sa vracia keď je zvýšená potreba, v čase špičkového odberu elektriny. Prispievajú tak k stabilite siete.

### 1.3.1 Prečerpávacie elektrárne

Najväčším úložiskom energie sú prečerpávacie vodné nádrže. Kapacita úložiska sa počíta v gigawatt hodinách. Keď je energie prebytok, voda je pumpovaná do vyššie položenej nádrže a prebytočná energia sa ukladá vo forme potenciálnej energie. Keď je spotreba v sieti zvýšená, kinetická energia vypustenej vody poháňa turbínu a vyrába elektrickú energiu. Naspäť dokáže vrátiť 70 – 80 % odobratej energie. Požiadavky na výstavbu prečerpávacej vodnej nádrže sú vysoké. Počet miest kde je možné vystavať

rozľahlé zásobníky vody blízko seba, ale s čo najväčším výškovým rozdielom je limitovaný a výstavba je spojená s nepriaznivými zásahmi do životného prostredia.

Najväčšou prečerpávacou vodnou nádržou na Slovensku je Čierny Váh na Liptove. Jej inštalovaný výkon je 735 MW a ročne priemerne vyrobí cez 300 GWh energie, ktorú poskytuje najmä pre podporné služby pre systémového operátora. Samotná elektrárňa generuje dostatočný výkon aby mohla byť samostatne pripojená do prenosovej sústavy [15].

### 1.3.2 Elektrochemické akumulátory

Ďalším typom energetického úložiska sú batérie (správnejšie akumulátory alebo sekundárne elektrochemické články). Ich výkon aj kapacita sú rádovo menšie ako v prípade vodných nádrží, ale malé rozmery umožňujú ich umiestnenie takmer kdekoľvek. Ďalšími prednosťami batérií sú takmer okamžitá doba nábehu, škálovateľnosť, vyššia účinnosť a neznečisťujúca prevádzka. Nevýhodou sú obmedzená životnosť a nie malé počiatkové náklady. Používajú sa aj ako lokálne záložné systémy počas výpadkov energie alebo v spojení s obnoviteľnými zdrojmi na presun zaťaženia v čase. Na to aby mohli byť samostatne priamo pripojené do prenosovej siete a slúžiť nielen ako lokálne úložisko zvyčajne nemajú dostatočnú kapacitu a/alebo výkon. Môžu byť však súčasťou agregátora. Vo svete už existujú stovky sieťových inštalácií, najviac lítium-iónové a sodíkovno-sírové akumulátory [8].

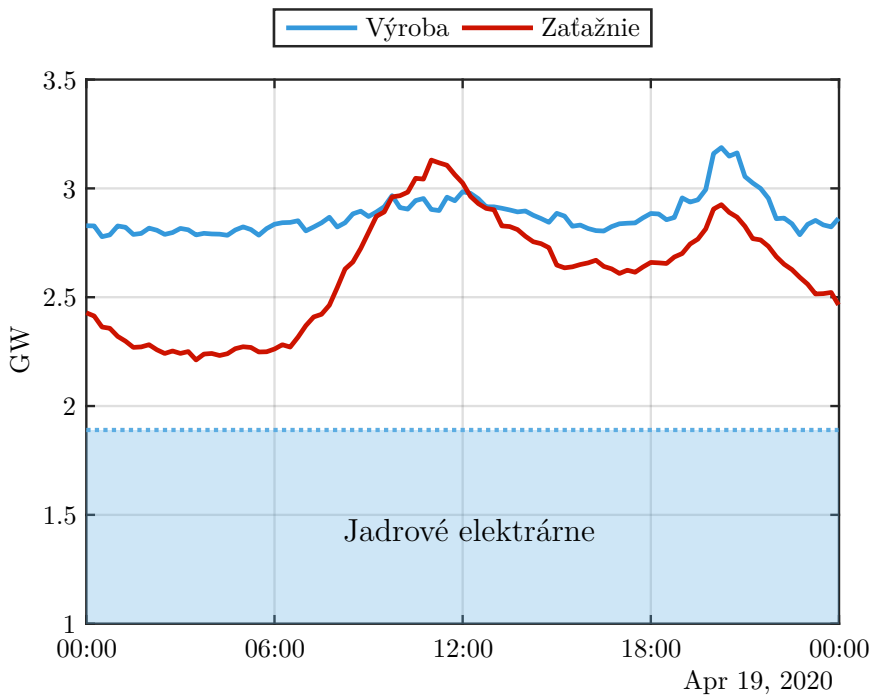
Okrem vody a elektrochemických batérií elektrickú energiu je možné dočasne uskladniť aj v stlačenom vzduchu, zotrvačníkoch, superkapacitoroch, úložiskách supravodivej magnetickej energie alebo tepelných akumulátoroch [8].

## 1.4 Stabilita siete

Úlohou prevádzkovateľa prenosovej sústavy je zabezpečovanie spoľahlivosti a dodržiavanie kvality dodávky elektrickej energie. Podľa očakávanej spotreby energie je potrebné naplánovať výrobu. Veľký odberatelia a výrobcovia elektrickej energie (nad 1 MW) sú priamo povinní dopredu nahlasovať svoje očakávané denné diagramy

(tzv. day-ahead) a za ich nedodržanie sú sankcionovaní. Za ostatných vrátane domácností majú túto povinnosť ich obchodníci s elektrickou energiou. Keď sa ich nepodarí dodržať alebo neočakávane dôjde k zlyhaniu veľkého zdroja energie, musia sa aktivovať podporné služby.

Priemerná krivka spotreby počas dňa má dvojhrbý tvar – spotreba narastá ráno a večer (obr. 1.3). Základné zaťaženie na Slovensku pokrývajú jadrové elektrárne, ktorých regulačná schopnosť výkonu je veľmi malá a s veľmi dlhou dobou odozvy na požiadavku zmeny. Očakávané denné výkyvy pokrývajú vodné elektrárne a výroba elektriny z fosílnych palív. Špičkovú energiu poskytujú zdroje s najväčšou flexibilitou.



**Obr. 1.3:** Priebeh výroby a zaťaženia ES Slovenska v jeden deň, nie je zahrnutá cezhraničná výmena (saldo import-export). Základné zaťaženie pokrývajú jadrové elektrárne, najväčšie rozdiely medzi výrobou a zaťažením zaisťujú prečerpávacie vodné elektrárne, zostávajúce odchýlky riešia zdroje s najväčšou flexibilitou.



Ťažkosti s plánovaním výroby a balansovaním siete nie sú spôsobené iba nepresnosťami v predikcii spotreby. Problémy sa vyskytujú aj na strane produkcie. Objem energie vyrobenej z obnoviteľných zdrojov narastá a tým aj produkcia energie, ktorú nedokážeme ovplyvniť. Závislosť od počasia a iných vonkajších vplyvov nás obmedzuje v riadení a ostáva nám len možnosť predikcie. Navyše fotovoltika (PV) prestáva vyrábať energiu večer keď spotreba najviac stúpa, čím spôsobuje prudší nárast dopytu a skracuje dobu nábehu záložných zdrojov. Pokračujúci rastúci trend obnoviteľnej energie len zväšuje dopyt po flexibilitě na oboch stranách.

### 1.4.1 Synchronná sústava

Menovitá frekvencia v elektrizačnej sústave sa udržiava na hodnote 50 Hz. Táto veličina sa používa ako ukazovateľ stavu siete, pretože odchýlka signalizuje problémy s balansom. Náhlý pokles dodávky alebo odberu energie sa prejaví vychýlením frekvencie od rovnováhy. Môže byť zapríčinený výpadkom turbíny v elektrárni alebo nečakaným nárastom spotreby. Počas celej doby odchýlka nesmie byť väčšia ako  $\pm 0,2$  Hz a počas 99,5 % roku sa frekvencia nesmie odchyliť o viac ako 1 % od menovitej frekvencie (musí ostať v rozsahu 49,5 Hz – 50,5 Hz) [9].

Slovensko je prepojené s väčšinou Európy vytvárajúc jednu synchronnú oblasť, v ktorej musí byť hodnota menovitej frekvencie rovnaká. Synchronná oblasť kontinentálnej Európy je najväčšia (vzhľadom na objem výkonu) prepojená sústava na svete. Veľká prepojená sústava má svoje výhody aj nevýhody. Združovanie veľkého objemu zdrojov prispieva k nižším výrobným nákladom a zvýšeniu spoľahlivosti, menšie výkyvy v prípade zlyhania veľkého zdroja alebo cezhraničná výpomoc. Naopak nevýhodou je, že vznik problému v jednej časti môže mať dôsledky v celej sieti a neskorý/nesprávny zásah vyústí do výpadku veľkých rozmerov.

### 1.4.2 Podporné služby

V prípade nerovnováhy v sieti prevádzkovateľ aktivuje podporné služby (PpS), aby bol schopný dodržať kvalitu elektrickej dodávky a zabezpečiť prevádzkovú spoľahlivosť elektrizačnej sústavy. Výsledkom aktivácie PpS je poskytnutie regulačnej energie, môže to byť dodávka ale aj odber. Prevádzkovateľ nakupuje podporné služby od

poskytovateľov, ktorí spĺňajú technické a obchodné podmienky. Veľký výrobcovia elektriny sú zo zákona povinný inštalovať a certifikovať zariadenia na poskytovanie PpS [17, 18].

Typy podporných služieb sa delia podľa doby nábehu na:

- Primárna regulácia činného výkonu a frekvencie (**PRV/FCR**) – zariadenia poskytujúce **PRV** autonómne reagujú na zmenu frekvencie v sieti zvýšením alebo znížením výkonu.
- Sekundárna regulácia činného výkonu a frekvencie (**SRV/aFRR**) – **SRV** udržiava rovnováhu medzi výrobou a spotrebou elektriny v rámci každej regulačnej oblasti. Zariadenie musí začať pôsobiť najneskôr do 30 sekúnd po vzniku odchýlky a doba plnej aktivácie na maximálnu hodnotu ponúkaného regulačného výkonu je do 15 minút (od 1.1.2022 do 7,5 minúty). Sekundárna regulačná rezerva musí byť symetrická.
- Terciárna regulácia činného výkonu (**TRV/mFRR**) – **TRV** je manuálna alebo automatická zmena činného výkonu zariadení s cieľom zaručiť dostatočnú rezervu pre **SRV**. Terciárnu reguláciu činného výkonu rozdeľujeme zvlášť na kladnú a zápornú, 3, 10 a 15 minútovú (od 1.1.2022 len 3 a 12,5 minútovú).
- Zvýšenie odberu (**ZVO**) a zníženie odberu (**ZNO**) – podporné služby **ZVO** a **ZNO** poskytujú len odberné zariadenia. V prípade potreby zmenia svoj odoberaný činný výkon (od 1.1.2022 bude táto služba zrušená a zlúčená s **mFRR**).

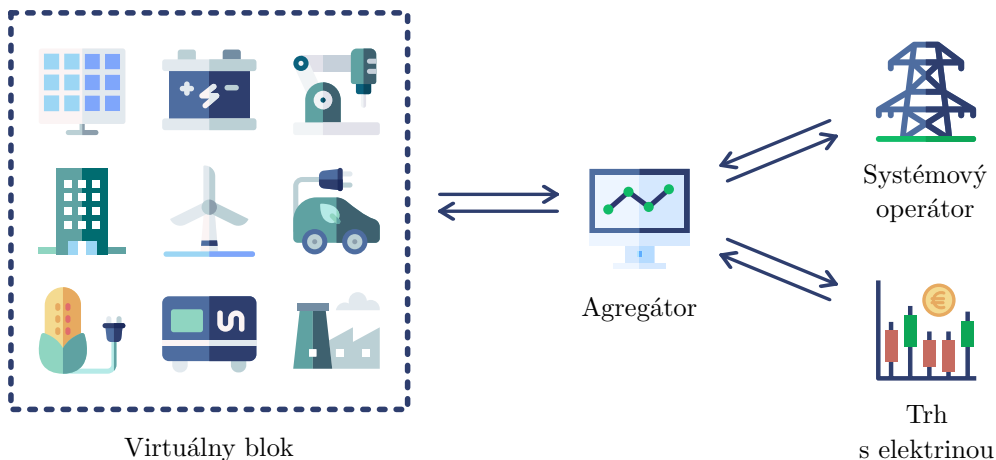
## Agregátor

---

Agregátor alebo virtuálna elektrárň (VPP – virtual power plant) združuje distribuované zdroje flexibility (DER – distributed energy resources), vid obr. 2.1. Virtuálna elektrárň agreguje zdroje, ktoré sú sami o sebe malé na to aby mohli poskytovať podporné služby alebo byť priamo zapojené do sústavy, zdroje ktoré kvôli technickým obmedzeniam – pomalá reakčná schopnosť, nie sú nepretržite k dispozícii – nemôžu samostatne poskytovať PpS alebo zdroje, pre ktoré PpS nie sú primárny účel ich prevádzky.

SEPS do technických podmienok zavádza pojem agregácie a definuje ho ako kombináciu technologických celkov, ktoré sú k prenosovej sústave pripojené cez jeden riadiaci terminál umožňujúci poskytovanie podporných (regulačných) služieb [17]. Smernica Európskej Únie 2019/944 vysvetľuje pojem agregátor ako fyzickú alebo právnickú osobu, ktorá zlučuje viacero miest odberu alebo výroby elektriny na účely predaja, nákupu alebo aukcie na akomkoľvek trhu s elektrinou [1].

Energetický sektor sa posúva vpred smerom od veľkých konvenčných zdrojov k decentralizovaným, digitalizovaným a dekarbonizovaným riešeniam. Európska únia sa zaviazala k zníženiu emisií skleníkových plynov o 40 % do roku 2030 a do roku 2050 dosiahnuť uhlíkovú neutralitu (rovnováha medzi emisiami a pohlcovaním CO<sub>2</sub> – nulový prírastok). Tlak na znižovanie uhlíkovej stopy vedie k nárastu obnoviteľných zdrojov elektriny, ktoré sú malé, distribuované a spôsobujú zvýšený dopyt po flexibilitě.



**Obr. 2.1:** Distribuované zariadenia vo virtuálnom bloku sú pripojené k agregátorovi, ktorý ich riadi a poskytuje podporné služby pre systémového operátora alebo obchoduje flexibilitu bloku na trhu s elektrinou.<sup>3</sup>

## 2.1 Výhody a nevýhody

Výhodami agregátora oproti konvenčným zdrojom je okamžitá dostupnosť flexibility – rýchla reakčná doba v prípade potreby, keďže agregátor združuje zdroje s rôznymi dobami nábehu a rôznymi technickými obmedzeniami. Najviac disponibilnej kapacity má agregátor v časoch keď je flexibilita najviac potrebná, čiže v špičke kedy je zapnutých najviac zariadení.

Dôvodom, prečo by vo všeobecnosti mal byť záujem aby agregátor či VPP vznikli, je zvýšenie efektivity už existujúcich zariadení. Odpadá nutnosť budovať veľké elektrárne napriek rastúcej spotrebe energie. Vysoké počiatkové náklady, dlhá doba návratnosti a environmentálny dopad konvenčných zdrojov nie sú žiaduce. Virtuálna elektrárň je riešenie ako využiť už existujúce zdroje a ich rezervy.

<sup>3</sup> Zdroj ikon (upravené): <https://www.flaticon.com/authors/freepik>

Keďže ide o novú službu, nemôže sa oprieť o dlhú históriu ako tradičné zdroje. Treba hľadať nové spôsoby realizácie a postupy ako riešiť problémy vyplývajúce z podstaty agregátora. Na jednej strane sú technické obmedzenia a na druhej legislatívne.

Krajiny Európskej Únie sú povinné pripraviť priestor pre nástup agregátorov. Podľa smernice Európskeho parlamentu a Rady EÚ 2019/944 z 5. júna 2019 o spoločných pravidlách pre vnútorný trh s elektrinou musia členské štáty zabezpečiť aby všetci odberatelia mohli slobodne nakupovať a predávať elektroenergetické služby, vrátane agregácie a v prípade, keď chce koncový odberateľ uzavrieť zmluvu o agregácii, bol oprávnený tak urobiť bez súhlasu elektroenergetických podnikov tohto koncového odberateľa. Okrem toho musia členské štáty zabezpečiť spravodlivú účasť agregátorov na trhoch s elektrinou a to, aby prevádzkovatelia prenosových sústav a prevádzkovatelia distribučných sústav zaobchádzali s agregátormi rovnako ako s ostatnými účastníkmi trhu [1].

Technicky je potrebné vyriešiť zautomatizovanie procesu ovládania veľkého počtu rôznych zdrojov, ktoré sú decentralizované a rôznych typov. Agregátor môže združovať zariadenia na výrobu elektriny, jej spotrebu aj uchovávanie. Pri vysokom počte zdrojov je nutné vyvinúť algoritmy na efektívne automatické riadenie v reálnom čase.

Agregátor preferuje zapojenie zdrojov za bodom merania (**BTM** – behind-the-meter), lebo nezasahuje priamo do siete. Zdroj elektriny za elektromerom priamo dodáva energiu spotrebiteľovi na pokrytie jeho potrieb a tým znižuje potrebu odberu zo siete a svoje náklady.

Pripájanie nových distribuovaných zdrojov do siete je limitované Ministerstvom hospodárstva SR. Pre agregátora to znamená, že nebude pôsobiť ako výrobca energie, ale zmenšením množstva odoberanej energie tak navonok pôsobiť. Neodobraná energia z hľadiska sústavy je ekvivalentná ako energia navyše vyrobená. Zmenšiť množstvo odoberanej energie je možné buď znížením výkonu odberného zariadenia alebo vyrobiť si ju na svojej strane (**PV**, batéria).

## 2.2 Distribuované zdroje flexibility

Distribuované zdroje flexibility sú malé až stredne veľké zariadenia alebo systémy na výrobu alebo spotrebu elektrickej energie, zvyčajne lokalizované v blízkosti konečného spotrebiteľa, v prevádzkach a priemyselných parkoch (potenciálne aj v domácnostiach), pripojené do distribučnej sústavy<sup>4</sup>. DER môžeme rozdeliť do troch kategórií: distribuované zdroje energie (DG – distributed generation), energetické úložiská a riadenie odberu (DR – demand response).

### 2.2.1 Distribuované zdroje energie

Medzi distribuované zdroje energie sa okrem iného radia obnoviteľné zdroje ako sú fotovoltaické panely a veterné turbíny. Sú vysoko závislé od vonkajších podmienok a neovládateľné. Ich výhodou sú nízke náklady na produkciu elektriny a udržateľnosť. Na území Slovenska je málo veterných turbín a fotovoltaika je zatiaľ z dôvodu súčasných podporných mechanizmov skoro nevyužitelná pre agregátora pôsobiaceho na Slovensku, preto sa s nimi nebudeme zaoberať.

Ďalším zdrojom energie, ktorý patrí medzi distribuované a tiež (čiastočne) obnoviteľné sú biomasa a bioplyn. Energia sa z nich získava spaľovaním a vznikajúce teplo poháňa turbínu generujúcu elektrinu. Podobne spaľovaním fosílnych palív elektrinu vyrába dieselagregát alebo kogeneračná jednotka.

### 2.2.2 Riadenie odberu

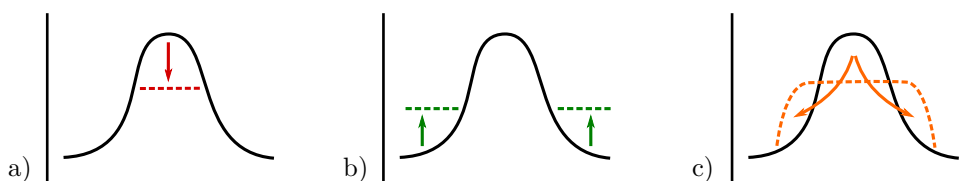
Riadenie odberu (angl. demand response) je zmena odberu elektriny zo strany koncových odberateľov, ktorá je odklonom od ich bežných alebo aktuálnych vzorov spotreby v reakcii na trhové signály vrátane časovo variabilných cien elektriny alebo stimulačných platieb, alebo v reakcii na akceptáciu ponuky koncového odberateľa na predaj zníženia alebo zvýšenia odberu za odplatu na organizovanom trhu, či už samostatne alebo prostredníctvom agregácie [1].

---

<sup>4</sup> Distribučná sústava je vedenie nižšieho napätia ako prenosová sústava, prepája prenosovú sústavu s konečnými užívateľmi.

Žiaduce je to pri balansovaní elektrickej výroby na jednej strane a elektrickej spotreby na druhej strane, čo je v záujme prenosových operátorov, ktorí majú povinnosť zabezpečiť stabilitu sústavy. Bez riadenia odberu to bolo možné len na strane výrobcov, teraz sa presúva možnosť ovládania aj na stranu odberateľov.

Zdroje poskytujúce „demand response“ môžu ponúkať flexibilitu tromi rôznymi spôsobmi znázornenými na obr. 2.2: znížením spotreby, zvýšením spotreby alebo kombináciou, keď sa odoberaná energia posunie v čase a tým vyrovnáva krivku spotreby (tzv. load-shifting) [7].



**Obr. 2.2:** Riadenie odberu elektriny, a) zníženie spotreby, b) zvýšenie spotreby, c) posun spotreby v čase.

Motiváciou prečo má majiteľ zariadenia záujem meniť jeho štandardný odber a poskytovať na svojom zariadení službu pre prevádzkovateľa sústavy resp. sprostredkovane cez agregátora je finančná kompenzácia alebo zníženie nákladov na činnosť zariadenia. Prevádzkovateľ prenosovej sústavy platí fixný poplatok certifikovanému zariadeniu za držanie kapacity a variabilný poplatok za každú realizovanú aktiváciu. V prípade, že užívateľ nakupuje energiu na burze, jeho benefitom, ktorý mu riadenie odberu prináša, je možnosť prispôbovať svoju spotrebu – odoberať elektrinu keď je lacnejšia a vyhnúť sa špičkovej elektrine kedy je najdrahšia. V extrémnych prípadoch cena elektriny na burze môže byť dočasne záporná a výrobcovia platia kupujúcim za odber ich energie. Fluktuácie v cene elektriny obzvlášť spôsobujú neovládateľné zdroje závislé od počasia.

Zariadenia schopné DR sa nachádzajú v priemysle, komerčnom sektore a aj v domácnostiach, ale kvôli škálovateľnosti a veľkosti sa prvé implementácie na Slovensku plánujú realizovať v priemyselnej a komerčnej oblasti. Príklady konkrétnych zariadení:

elektrická oblúková pec, vzduchotechnická jednotka, výroba stlačeného vzduchu, chladenie/ohrievanie. V domácnostiach majú v budúcnosti potenciál poskytovať DR elektromobily a inteligentné spotrebiče akými sú práčky, sušičky, chladničky, umývačky riadu – všetky spotrebiče ktoré môžu plánovať a posúvať svoju prevádzku v čase [7].

### 2.2.3 Typy DER a ich vlastnosti

V tejto časti je opis vybraných typov distribuovaných zdrojov, ktoré majú najväčší potenciál byť zapojené behind-the-meter ako jeden z blokov agregátora. Okrem základného opisu ako fungujú sa kladie dôraz ako môžu ponúkať flexibilitu.

#### Batéria

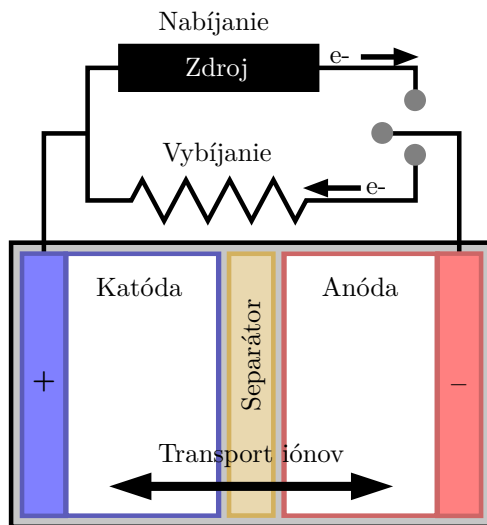
Akumulátorové články, ktoré nazývame nabíjateľné batérie uchovávajú chemickú energiu, ktorú je možné premeniť na elektrinu. Batéria pozostáva z elektrochemických článkov, každý článok má kladnú a zápornú elektródu ponorenú v kvapalnom alebo tuhom elektrolyte umožňujúcom prechod iónov. Pri vybíjaní nastáva vratná elektrochemická reakcia medzi dvoma elektródami a vonkajším obvodom prúdia elektróny (obr. 2.3). Pri vnútení prúdu opačným smerom batéria ukladá energiu, z ktorej časť dokáže vrátiť naspäť. Najrozšírenejšie batérie sú založené na báze olova a kyseliny, niklu a kadmia, sodíku a síry alebo lítia a uhlíku [6].

Kapacita priemyselných batérií sa pohybuje od desiatok kilowatt hodín po megawatt hodiny. Zvyčajne slúžia ako záložné zdroje pri prerušení dodávky elektriny zo siete, ale môžu poskytovať aj iné služby prinášajúce finančné výhody, napríklad cenovú arbitráž alebo znižovanie špičkového odberu energie.

Flexibilitu batéria môže ponúkať keď nie je potrebná pre iné služby a to obidvoma smermi (kladná a záporná regulácia). Pri nabíjaní zvyšuje spotrebu odberného miesta a naopak, počas vybíjania znižuje spotrebu odberného miesta pri BTM riešení. Maximálny výkon, ktorý batéria poskytuje závisí od veľkosti invertera a doba poskytovania sa odvíja od jej kapacity a aktuálneho stavu nabitia (SoC – state of



charge). Pri úplnom vybití alebo nabití je pre agregátora disponibilná iba v jednom smere a potrebuje čas na obnovenie kapacity.



**Obr. 2.3:** Schéma sekundárneho (vratného) elektrochemického článku.<sup>5</sup>

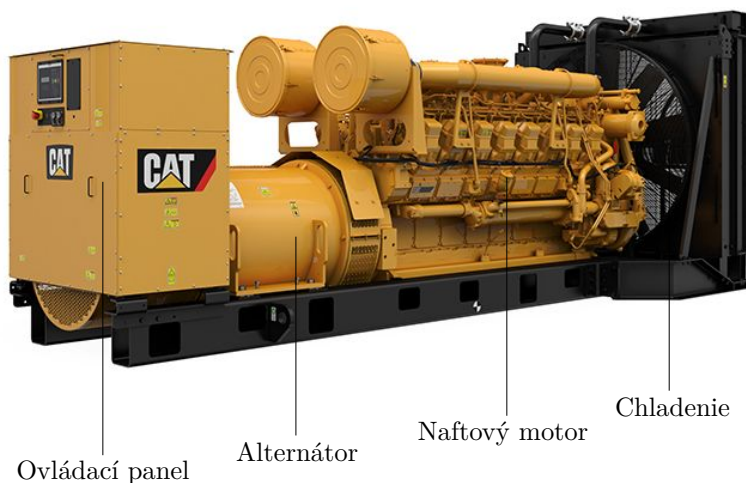
Vlastník batérie v záujme spomalenia degradácie životnosti batérie limituje množstvo celkovej dodanej energie pre služby agregátora na maximálny počet MWh/rok. Ďalším obmedzením, s ktorým sa ráta pri návrhu riadenia batérie, je obmedzenie využiteľnej kapacity a hĺbka vybitia, samovybíjanie (rádovo 0,1 % za deň), vlastná spotreba batériového úložiska a degradácia spôsobená časom používaním.

### Dieselagregát

Podobe ako batérie aj dieselagregáty primárne slúžia ako záložný zdroj energie. Nachádzajú sa všade na miestach, kde výpadky elektriny sú kritické – v nemocniciach alebo veľkých priemyselných parkoch. Okrem výpadkov, mobilné dieselagregáty zabezpečujú výrobu elektriny na miestach, kde nie je dostupná vôbec alebo v nedostatočnom množstve.

<sup>5</sup> Zdroj: Tkarcher/CC BY-SA (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>), upravené

Stroj pozostáva zo spalovacieho motora a synchronného alternátora (obr. 2.4), palivom je nafta. Priemerne veľké zariadenie dokáže generovať výkon niekoľko MW. Núdzové zdroje musia byť nepretržite pripravené, ale väčšinu doby sú vypnuté a nevyužívané. Ich prevádzková doba je maximálne desiatky hodín ročne. Zariadenia musia byť pravidelne testované kontrolnými štartmi, ich frekvencia závisí od toho v akej prevádzke sú umiestnené alebo od predpisu výrobcu (napríklad v nemocniciach raz za týždeň).



**Obr. 2.4:** Dieselový generátor s výkonom 1600 – 2000 kVA pri frekvencii 50 Hz, rozmery (v × š × h): 2,4 × 2,3 × 5,9 m, použiteľný aj ako záložný zdroj.<sup>6</sup>

Keďže ide o zariadenie na výrobu energie, pre potreby agregátora môže poskytovať zápornú flexibilitu znížením celkovej odoberanej elektriny subjektu. Výkon je teoreticky regulovateľný od 0 do 100 %, ale náklady na nákup, prevádzku a údržbu zariadenia sú fixné a cena za MWh pri nižšom výkone je vyššia.

Dieselový generátor môže znižovať iba aktuálnu spotrebu odberného miesta, ktorá nemôže byť po zapnutí generátora záporná (nemôže dodávať energiu do siete). Preto sú niektoré zariadenia pre agregátor disponibilné iba počas pracovných hodín.

<sup>6</sup> <https://www.pon-cat.com/en/products/electric-power-generation/diesel-generator/cat-3516-50-hz>

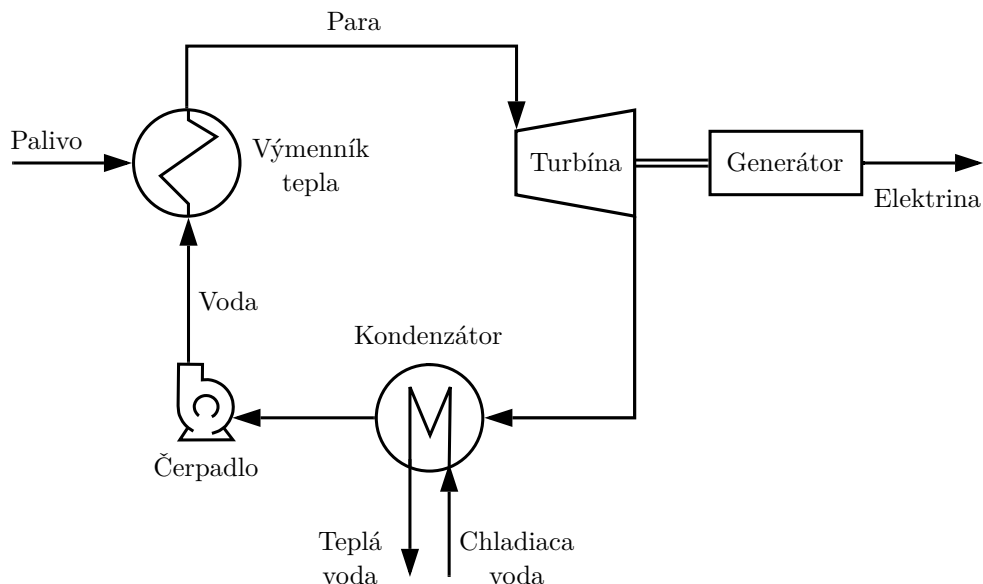
Veľkosť palivového zásobníka je dimenzovaná podľa potreby prevádzky, zvyčajne je dostatočná na 24 a viachodinovú prevádzku. Dopĺňanie nafty je manuálne a možné aj počas chodu zariadenia.

Počet nábehov a dobehov zariadenia pre služby agregátora nie je limitovaný ani spojený s ďalšími nákladmi. Obmedzením pre agregátor je maximálny počet prevádzkových hodín, ktoré vychádzajú z vyhlášky Ministerstva životného prostredia Slovenskej republiky o monitorovaní emisií zo stacionárnych zdrojov znečisťovania ovzdušia [2]. Podľa vyhlášky sa u takýchto zdrojov musia merať hodnoty emisnej veličiny. Ak čas prevádzky neprekračuje 500 hodín ročne, pre zariadenie platí periodické meranie, inak sa musia emisie monitorovať kontinuálne s použitím automatizovaného meracieho systému. Pre stroj, ktorý primárne slúži iba ako záloha náklady na merací systém nie sú prijateľné.

### Kogeneračná jednotka

Kogeneračná jednotka je zariadenie na kombinovanú výrobu tepla a elektriny, čím dosahuje vysoký stupeň účinnosti. Stroj pozostáva zo spaľovacieho motora (podobne ako u dieselaagregátu) alebo plynovej turbíny a synchronného generátora (obr. 2.5). Väčšina energie uložená v palive sa pri spaľovaní premieňa na teplo a z približne 40 % sa získava elektrická energia. Kogeneračná jednotka s vznikajúcim odpadovým teplom narába ako s produktom a odvádza ho ďalej na využitie, napríklad na vykurovanie alebo ohrev teplej vody, výnimočne v prípade trigenerácie aj na chladenie.

Napájaná je kontinuálnym prívodom zemného plynu. Beží cca 80 % času (7 000 h/rok), väčšinu leta je vypnutá pretože nie je požiadavka na dodávku tepla a nemá ho kam odvieť. Z toho vyplýva dostupnosť pre agregátor. Ten môže pracovať len so zapnutou kogeneračnou jednotkou a znižovať jej aktuálny výkon. Narozdiel od dieselového generátora poskytuje kladnú reguláciu, aj keď je to podobné zariadenie na výrobu elektriny. Pre subjekt s BTM riešením zapojenia znížením výkonu kogeneračnej jednotky rastie spotreba odobranej energie zo siete.



**Obr. 2.5:** Schéma kogeneračnej jednotky s plynovou turbínou, energia z paliva sa odvádza vo forme elektriny a tepla.

Flexibilita závisí od typu zdroja a technických možností daného zariadenia, zvyčajne je možné regulovať výkon jednotky v rozmedzí 50 – 100 %. Flexibilitu 50 % z maximálneho výkonu počas dostupnosti niektoré zariadenia ponúkajú nepretržite, čiže na požiadavku agregátora môže byť jej výkon znížený až na polovicu bez časového obmedzenia. 100 % z maximálneho výkonu, čiže úplne sa vypnúť pre potreby agregátora môže najviac na 3 hodiny nasledované 3 hodinami bežnej prevádzky.

### Bioplynová stanica

Bioplynová stanica funguje na rovnakom princípe ako kogeneračná jednotka len s odlišným palivom, ktorým je bioplyn. Najčastejšie bioplyn pochádza z čističky odpadových vôd alebo z poľnohospodárskej výroby. Produkcia bioplynu je variabilná a nie nutne nepretržitá, zbiera sa v zásobníku. Stanica má zásobník na zabezpečenie aspoň dvoch hodín chodu jednotky pri maximálnom výkone, z dôvodu aby nedochá-

dzalo k častým štartom a vypnutiam, ktoré škodia technike. Agregátor môže opäť len znižovať nominálny výkon na 50 %, vtedy kapacita zásobníka vydrží 4 hodiny. Bioplynová stanica je ročne v prevádzke okolo 5 000 hodín, závisí od typu.

### Vzduchotechnická jednotka

Primárnou funkciou vzduchotechniky je výmena a cirkulácia vzduchu. Sekundárnou je udržiavanie kvalitatívnych parametrov akými sú teplota a vlhkosť vzduchu. Vzduchotechnické jednotky sú umiestnené v stredne veľkých až veľkých verejných a priemyselných budovách, napríklad kancelárskych priestoroch a nákupných strediskách. V noci nie sú prevádzkované a tak ani disponibilné pre agregátora.

Na svoju činnosť potrebujú určité množstvo energie. Agregátor ráta s tým, že vzduchotechnika môže dočasne svoj aktuálny výkon znížiť alebo zvýšiť bez toho, aby došlo k citeľnej zmene kvality vzduchu. Jej aktuálna spotreba elektriny závisí najmä od vonkajšej teploty. V lete potrebuje energiu na chladenie a v zime na kúrenie. Vtedy keď je jej výkon vyšší môže ponúkať aj väčšiu flexibilitu. Počas roka sa tak mení jej disponibilný výkon v závislosti od vonkajšej a požadovanej vnútornej teploty.

### Výroba stlačeného vzduchu

Zariadením na výrobu stlačeného vzduchu sú kompresory a nachádzajú sa predovšetkým v priemyselných prevádzkach. Kompresor môže na krátku dobu na požiadanie znížiť svoj nominálny výkon (záporná regulácia), čím klesne tlak vzduchu v potrubí. Nejakú dobu, jej dĺžka závisí od typu, techniky a spôsobu prevádzky je to možné bez ohrozenia svojej funkcie. Počet aktivácií nie je obmedzený, ale ich dĺžka (pre nami uvažované zariadenia, ak je doba limitovaná na jednu štvrtinu) je maximálne 30 minút a musia byť nasledované prestávkou minimálne trikrát dlhšou ako bola doba aktivácie, aby došlo k obnove tlaku. Riadenie odberu zariadenia je dostupné iba keď beží výroba, čiže počas pracovných hodín.

### **Výroba chladiacej vody**

Podobný režim platí aj pre výrobu chladiacej vody s rozdielom, že regulácia je kladná aj záporná. Maximálne štvrtinu doby môže byť odber elektriny zvýšený alebo znížený oproti štandardnému odberu.

### **Výroba chladu**

Ide o napríklad o chladenie dátového centra alebo skladových priestorov v potravinárstve. Zariadenie na výrobu chladu udržiava teplotu v priestoroch na určitej limitne vyhovujúcej hodnote tak, aby to prevádzkovali optimálne s ohľadom na spotrebu energií. Nižšia teplota znamená vyššie náklady na energiu, ale negatívne neovplyvní chod dátového centra alebo skladu, skôr naopak. Agregátor tak môže bez časového obmedzenia zvýšiť spotrebu subjektu.

# Optimalizácia

---

Hľadanie najlepšieho riešenia problému spomedzi všetkých možných riešení je optimalizovanie. Využitie je tam, kde je vôľa niečo spraviť lepšie, efektívnejšie, presnejšie alebo lacnejšie. Optimalizujú nielen ľudia ale aj príroda, čiže optimalizačné nástroje vieme využiť aj pri štúdiu fyzikálnych systémov, ktoré sa prirodzene dostávajú do stavu s najmenšou energiou alebo sa pohybujú najkratšou možnou cestou [14].

Najprv treba identifikovať účel a nájsť merateľnú vlastnosť systému, ktorá opisuje jeho hodnotu a dá sa číselne vyjadriť. Hlavným účelom môže byť minimalizovanie nežiaducich vecí – náklady, straty, chyby; alebo maximalizovanie žiaducich vecí – profit, účinnosť, kvalita a pod. Hodnota systému je závislá od neznámych premenných veličín, cieľom optimalizácie je určiť ich tak, aby bol systém v najlepšom stave. Premenné často podliehajú obmedzeniam a môžu nadobúdať len určité hodnoty.

Prvým krokom je modelovanie – určenie premenných, účelovej funkcie a ohraničujúcich podmienok. Potom nasleduje hľadanie optimálneho riešenia pomocou vhodného algoritmu. Neexistuje univerzálny algoritmus, ktorý by bol najlepší v každom prípade, ale pre každý typ optimalizačného problému je určený súbor metód. Zvolenie správnej metódy je kľúčové z hľadiska času aj kvality riešenia [14].

### 3.1 Všeobecná matematická formulácia

Optimalizačný problém sa všeobecne zapisuje [5]:

$$\underset{x}{\text{minimalizuj}} \quad f(x) \quad (3.1a)$$

$$\text{vzhľadom na} \quad g_i(x) \leq 0, \quad \forall i \in \{1, \dots, m\}, \quad (3.1b)$$

$$h_j(x) = 0, \quad \forall j \in \{1, \dots, p\}, \quad (3.1c)$$

kde  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^\top$  je vektor optimalizovaných premenných, funkcia  $f$  je účelová funkcia  $x$ , ktorú chceme minimalizovať, funkcie  $g_i$  sú nerovnostné ohraničenia a funkcie  $h_j$  sú rovnostné ohraničenia. Vektor  $x^*$  je optimálne riešenie problému ak účelová funkcia nadobúda najmenšiu hodnotu spomedzi všetkých prípustných riešení a zároveň vektor  $x$  spĺňa ohraničenia a funkcia je v ňom definovaná

$$f(x^*) \leq f(x), \quad \forall x \in \{x : g_i(x) \leq 0, h_j(x) = 0, \forall i, j\} \cap \text{dom}(f). \quad (3.2)$$

$J^*$  je hodnota účelovej funkcie v optime. Optimalizácia sa štandardne definuje ako minimalizácia a maximalizáciu dosiahneme negáciou účelovej funkcie.

Ak  $m = p = 0$ , problém je neohraničený. Neohraničený problém môže vzniknúť priamo, ak premenné môžu nadobúdať všetky reálne hodnoty a aj nepriamo, reformuláciou ohraničeného problému elimináciou rovnostných ohraničení alebo nahradením ohraničení penalizačným členom a pridaním do účelovej funkcie [14].

Ak je  $x$  prípustné riešenie a platí  $g_i(x) = 0$ ,  $i$ -te nerovnostné ohraničenie  $g_i(x) \leq 0$  je aktívne v bode  $x$ . Ak platí  $g_i(x) < 0$ ,  $i$ -te ohraničenie je neaktívne, t. j. bod  $x$  na ňom neleží. Ohraničenie je redundantné ak sa jeho odstránením nezmení množina prípustných riešení.

Je možné zbaviť sa rovnostných ohraničení a uvažovať iba nerovnostné. Ak sú ohraničenia lineárne (v tvare  $Ax = b$ ) alebo ich vieme na ne konvertovať, môžu sa eliminovať substitúciou nájdením nulového priestoru  $F$  k matici  $A$  a nájdením konkrétneho riešenia  $x_0$ . Druhou možnosťou je nahradenie rovností obojstrannými nerovnosťami:

$$h(x) = 0 \quad \Rightarrow \quad h(x) \leq 0, \quad h(x) \geq 0. \quad (3.3)$$



Ako sa optimalizačný problém rieši závisí od typu účelovej funkcie aj od typu ohraničení. V najjednoduchšom prípade keď ohraničenia nie sú, tzn.  $x \in \mathbb{R}$  a účelová funkcia je lineárna, optimum vypočítame analyticky. Ak je účelová funkcia konvexná, stále ide o jednoduchý problém a môžeme použiť niektorú z gradientových metód. Najčastejšie sa úlohy formulujú ako lineárny, prípadne kvadratický program a následne je možné využívať existujúce efektívne algoritmy.

## 3.2 Konvexnosť

Koncept konvexnosti je v optimalizácii zásadný. Závisí od neho riešiteľnosť a rýchlosť hľadania optima, problémy s touto vlastnosťou sú vo všeobecnosti jednoduchšie na riešenie. Konvexné môžu byť množiny aj funkcie. Množina  $S \in \mathbb{R}^n$  je konvexná vtedy keď úsečka spájajúca ľubovoľné 2 body z množiny leží celá v množine  $S$  [5]. Formálne, pre akékoľvek  $x, y \in S$  platí  $\theta x + (1 - \theta)y \in S$  pre všetky  $\theta \in [0, 1]$ .

Funkcia  $f$  je konvexná ak jej definičný obor je konvexná množina  $S$  a pre ľubovoľné  $x, y \in S$  platí nasledovná vlastnosť

$$f(\theta x + (1 - \theta)y) \leq \theta f(x) + (1 - \theta)f(y), \quad \forall \theta \in [0, 1]. \quad (3.4)$$

Geometricky to značí, že úsečka medzi  $(x, f(x))$  a  $(y, f(y))$  leží nad grafom funkcie  $f$ . Jednoduchým príkladom konvexnej množiny je jednotková guľa alebo akýkoľvek polyéder definovaný lineárnymi rovnicami a nerovnicami. Konvexnou funkciou je každá lineárna, exponenciálna alebo kvadratická funkcia  $f(x) = x^T H x$ , kde  $H$  je symetrická pozitívne semidefinitná matica. Funkcia je konkávna vtedy keď  $-f$  je konvexná.

Ak sú účelová funkcia aj ohraničenia optimalizačného problému konvexné, lokálne optimum je zároveň globálnym optimom. Lokálne optimum je také, že v jeho blízkom okolí hodnota účelovej funkcie rastie, ale nie nutne v celej množine prípustných bodov. Hľadanie globálneho optima v prípade konvexných funkcií uľahčuje, že derivácia účelovej funkcie hovorí o smere poklesu alebo rastu jej hodnoty, a že optimálna hodnota je len jedna. Naopak, v prípade nelineárneho optimalizačného problému viaceré metódy negarantujú nájdenie globálneho optima.

Ak niektoré z optimalizovaných premenných môžu nadobúdať iba hodnoty celých čísel, ide o celočíselnú optimalizáciu. Takýto problém je veľmi nekonvexný.

### 3.3 Celočíselná optimalizácia

Mnoho bežných úloh sa dá formulovať ako celočíselný problém. Všade, kde neznáma premenná opisuje početnosť alebo keď sa rozhoduje či udalosť nastane alebo nie. Z toho vyplývajú dve formulácie, vyjadriť diskretnú kvantitu ako celé číslo a on/off správanie ako binárne číslo.

#### 3.3.1 Aplikácie

Celočíselná optimalizácia sa uplatňuje v rozvrhovaní výroby pri obmedzenom počte rôznych zdrojov s cieľom maximalizovať produkciu, pri distribuovaní tovaru, umiestnenia zariadení alebo plánovaní tokov v sieti, kde možno maximalizovať prenesený objem či minimalizovať náklady. V matematike samotnej celočíselná optimalizácia vychádza z oblastí teórie grafov, kombinatoriky a logiky. Vedecké aplikácie sa vynárajú v molekulárnej biológii, časticovej fyzike či röntgenovej kryštalografii [20].

Najznámejšie triedy celočíselných úloh sú problém obchodného cestujúceho a problém batohu. Názov problém batohu vyplýva z analógie turistu (alebo zlodēja) vyberajúceho si spomedzi predmetov rôznej váhy a ceny, ktoré si vezme so sebou tak aby mal batoh čo najväčšiu hodnotu a zároveň ho uniesol. Predmet si zabalí celý alebo vôbec, nič medzi tým a tak vzniká binárny problém.

Majme množinu miest (vrcholov) a množinu ciest (hrán), ktoré spolu vytvárajú mapu (graf). Obchodný cestujúci chce navštíviť všetky mestá, ale iba raz a začať aj skončiť v meste, v ktorom sa práve nachádza (prejsť po Hamiltonovskej kružnici). Jeho problém je nájsť najkratšiu cestu, pričom obťažnosť s množstvom miest narastá exponenciálne. Možností má konečne veľa, ale aby si vybral najlepšiu v rozumnom čase, musí použiť efektívny algoritmus. Cestujúci v tomto šťastie nemá, algoritmus, ktorý by mu zabezpečil nájdenie optimálneho riešenia v polynomiálnom čase nie je známy. Hľadanie Hamiltonovskej kružnice je totiž NP-ťažký problém. Úlohy s malým

počtom miest je možné vyriešiť použitím bežných optimalizačných algoritmov, ale veľké úlohy sa riešia heuristicky. Problém obchodného cestujúceho má mnoho praktických aplikácií: ekonomická výroba dosiek plošných spojov, kde si možno predstaviť vrták ako obchodného cestujúceho, ktorý minimalizuje čas na navrtanie potrebných dier alebo pri osadzovaní súčiastok; v logistike, kde záleží na umiestnení skladov a hľadaní najrýchlejšej cesty medzi nimi; plánovaní pohybov robota, ktorý musí navyše vykonávať operácie v istom poradí; alebo problém rozvozu tovaru [10].

### 3.3.2 Matematická formulácia celočíselného problému

Účelová funkcia môže byť ľubovoľná, prídruže obmedzenie na hodnoty, ktoré môžu premenné nadobúdať:

$$\min_{\delta} f(\delta) \quad (3.5a)$$

$$\text{s.t. } g(\delta) \leq 0, \quad (3.5b)$$

$$\delta \in \mathbb{Z}^m, \quad (3.5c)$$

kde  $\mathbb{Z}$  je množina  $m$ -dimenzionálnych vektorov celých čísel. Ak  $\delta \in \{0,1\}^m$  ide o binárne programovanie a ak niektoré z premenných sú spojité, ide o zmiešané celočíselné programovanie (MIP – mixed-integer programming):

$$\min_{x,\delta} f(x,\delta) \quad (3.6a)$$

$$\text{s.t. } g(x,\delta) \leq 0, \quad (3.6b)$$

$$x \in \mathbb{R}^n, \quad (3.6c)$$

$$\delta \in \mathbb{Z}^m. \quad (3.6d)$$

Náročnosť riešenia závisí od charakteru funkcií, najťažšie optimalizačné úlohy majú účelovú funkciu a/alebo ohraničenia nekonvexné (MINLP – mixed-integer nonlinear programming). Takéto úlohy sú v reálnom čase riešiteľné len pre nízky počet premenných. V lepšom prípade sú ohraničenia lineárne a účelová funkcia kvadratická alebo lineárna (MIQP resp. MILP – mixed-integer quadratic/linear programming).

Všeobecná formulácia MILP [20]:

$$\min_{x, \delta} c^T x + h^T \delta \quad (3.7a)$$

$$\text{s.t. } Ax + G\delta \leq b, \quad (3.7b)$$

$$x \in \mathbb{R}^n, \quad (3.7c)$$

$$\delta \in \mathbb{Z}^m, \quad (3.7d)$$

kde  $\mathbb{R}$  je množina reálnych  $n$ -dimenzionálnych vektorov,  $\mathbb{Z}$  je množina celočíselných  $m$ -dimenzionálnych vektorov,  $x = (x_1, \dots, x_n)^T$  a  $\delta = (\delta_1, \dots, \delta_m)^T$  sú neznáme premenné. Úloha je špecifikovaná  $n$ -rozmerným vektorom  $c$ ,  $m$ -vektorom  $h$ ,  $p \times n$  rozmernou maticou  $A$ ,  $p \times m$  maticou  $G$  a  $p$ -vektorom  $b$ . Zvyčajne sa vyžaduje, aby premenné nadobúdali len nezáporné hodnoty. Množina prípustných bodov je

$$S = \{x \in \mathbb{R}^n, \delta \in \mathbb{Z}^m : Ax + G\delta \leq b\} \quad (3.8)$$

a  $(x, \delta) \in S$  je prípustné riešenie. Prípustný bod  $(x^*, \delta^*)$ , pre ktorý je hodnota účelovej funkcie najmenšia možná, tzn.:

$$c^T x^* + h^T \delta^* \leq c^T x + h^T \delta, \quad \forall (x, \delta) \in S \quad (3.9)$$

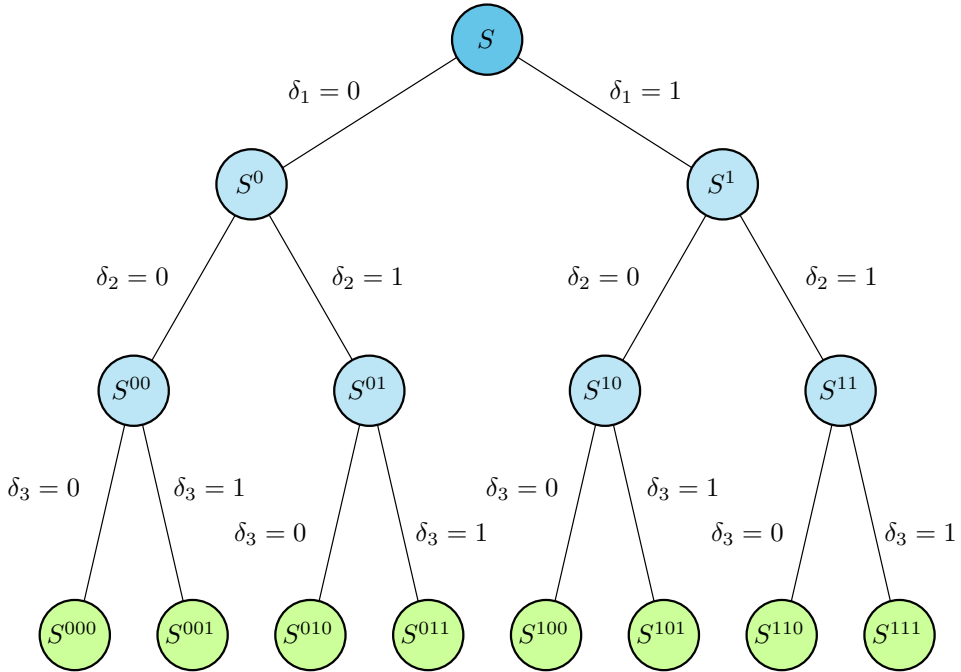
je optimálne riešenie a  $J^* = c^T x^* + h^T \delta^*$  je optimálna hodnota riešenia. Ak úloha pozostáva z malého počtu premenných (jednotky, možno desiatky), riešenie je možné nájsť prehľadaním celého priestoru. Riešenie rozmerných problémov sa hľadá pomocou efektívnych algoritmov celočíselného programovania.

### 3.3.3 Metóda vetiev a hraníc

Princíp metódy vetiev a hraníc (B&B – branch-and-bound) spočíva v prehľadávaní stavového priestoru vo forme stromu, ale iba vybraných častí. Názov metódy je zložený z dvoch základných operácií: vetvenie (branching) – delenie množiny riešení na menšie podmnožiny a ohraničenie (bounding) – určovanie hraníc na hodnoty účelovej funkcie danej podmnožiny riešení.

Prehľadavací stavový strom (obr. 3.1) pozostáva z koreňa, kde je množina všetkých riešení celočíselného programu (MIP, uvažovať budeme MILP), ktorá sa následne

vetví a každý vzniknutý vrchol stromu je nový, obmedzenejší optimalizačný problém. K pôvodným ohraničeniam sa pridajú ďalšie. Podstatou B&B je vylúčenie vetiev stromu, v ktorých sa nemôže nachádzať optimálne riešenie čím prekonáva obyčajné prehľadávacie algoritmy, ktoré musia navštíviť všetky vrcholy grafu. Prehľadanie celého stromu by pri mnohorozmernom probléme bolo časovo nerealizovateľné.

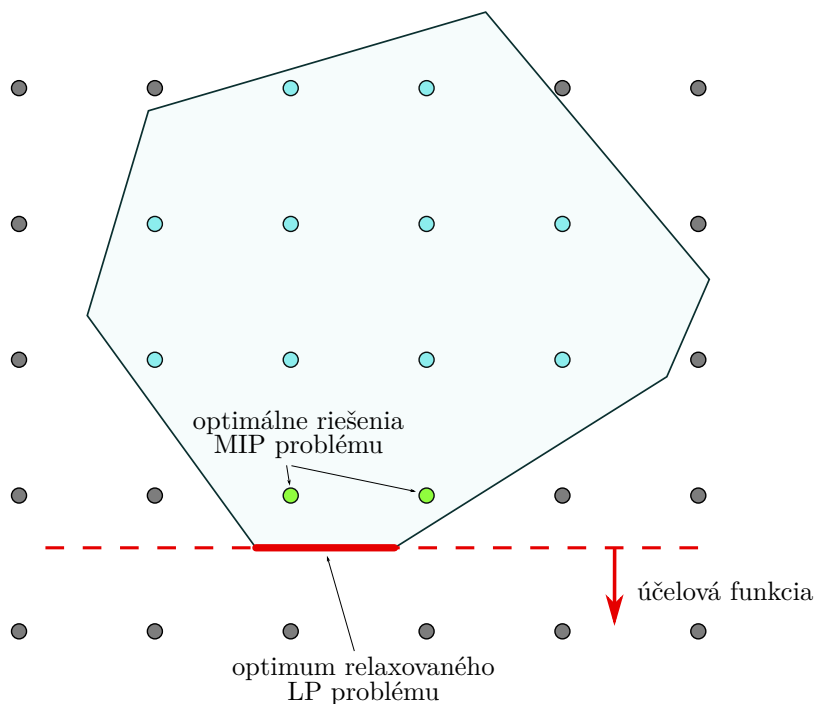


**Obr. 3.1:** Prehľadavací strom s tromi binárnymi premennými. V koreni (tmavomodrá) je množina všetkých riešení  $S$ , v každom ďalšom vrchole je optimalizačný sub-problém s podmnožinou riešení  $S^x$ . Optimálne riešenie sa nachádza v niektorom z listov stromu (zelená), algoritmus B&B je efektívny, pretože zvyčajne nemusí prehľadať všetky.

Algoritmus v každom vrchole rieši relaxovaný problém, t. j. rieši optimalizačnú úlohu so všetkými ohraničeniami, ale premenné uvažuje spojité, nie diskrétné

$$\delta_i \in \{0,1\} \Rightarrow 0 \leq \delta_i \leq 1. \quad (3.10)$$

Relaxácia premenných transformuje NP-úplný problém (MILP) na príbuzný problém lineárneho programovania (obr. 3.2) riešiteľný napr. pomocou simplexového algoritmu, v najhoršom prípade v exponenciálnom čase, ale zvyčajne je riešenie nájditelné v polynomiálnom čase [19].



**Obr. 3.2:** Relaxovaný LP problém; mnohoúhelník zobrazuje množinu prípustných LP riešení, body vnútri sú prípustné diskrétné riešenia.

Postup riešenia [3]:

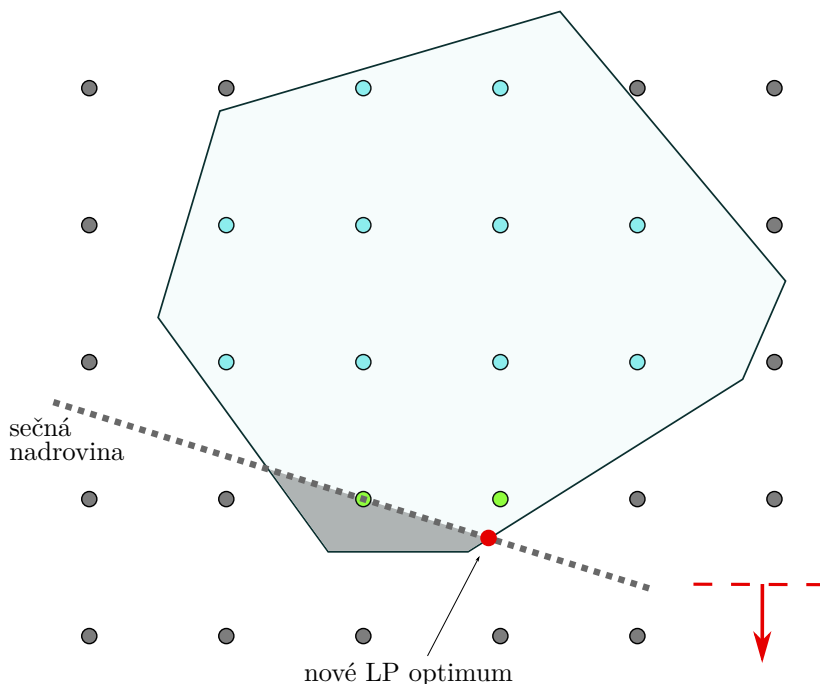
- Začína sa s pôvodným MILP problémom, ktorý predstavuje koreňový vrchol stromu. Odstránia sa celočíselné obmedzenia a vyrieši sa LP problém. Ak relaxovaný problém nemá prípustné riešenie, ani pôvodný problém nemá riešenie, pretože odstránením ohraničení sa množina prípustných riešení môže len zväčšiť a zahŕňa všetky ďalšie.

- Ak vyriešením relaxovaného LP problému získame optimálne riešenie a zároveň premenné, ktoré majú byť celočíselné sú celočíselné, resp. binárne, tak riešenie je aj optimálnym riešením MILP problému.
- Ak optimálne riešenie relaxácie porušuje aspoň jedno celočíselné obmedzenie, daný vrchol sa rozvetví na dva MILP sub-problémy. Vyberie sa jedna z celočíselných premenných, ktorá nespĺňa podmienku, a pridaním ohraničení  $\delta_i \leq \lfloor f \rfloor$  a  $\delta_i \geq \lfloor f \rfloor + 1$  k prvému, resp. druhému sub-problému sa množina riešení rozdelí na dve disjunktné množiny. Ohraničenia ostávajú platné pre všetky nasledovné vrcholy.
- Následne sa riešia relaxované sub-problémy. Keď sa stane, že relaxované riešenie spĺňa aj celočíselné obmedzenia, dôjde k zapamätaniu hodnoty účelovej funkcie ak je lepšia ako doteraz nájdená a bude sa uvažovať ako horný limit (pri minimalizácii) pri rozhodovaní o orezávaní vetiev.
- Pri prehľadávaní sa porovnáva hodnota účelovej funkcie relaxovaného problému s aktuálnou najlepšou hodnotou prípustného celočíselného riešenia, t. j. s horným limitom. Ak je porovnávaná hodnota vyššia, dôjde k orezaniu vetvy, pretože s istotou k optimu nevedie.
- Za dolný limit sa považuje najnižšia hodnota účelovej funkcie spomedzi všetkých vrcholov, ktoré nie sú rozvetvené (listy stromu).
- Rozdiel medzi horným a dolným limitom sa označuje ako gap alebo suboptimalita a keď dosiahne 0, nájdené riešenie je optimálne.

#### 3.3.4 Metóda vetiev a rezov

Vylepšenou verziou predchádzajúceho algoritmu je metóda vetiev a rezov (B&C – branch-and-cut), ktorá kombinuje B&B s metódou sečných nadrovín (angl. cutting planes). Algoritmus postupuje podobne, ale pri riešení relaxovaného LP problému pridáva ďalšie lineárne ohraničenia bez toho, aby došlo k rozvetveniu stromu a tvorby sub-problémov. Ohraničenie sa vytvorí tak, aby odrezalo optimálne relaxované riešenie od množiny prípustných celočíselných riešení a prechádzalo jedným z nich (obr. 3.3). Dochádza k odrezaniu spojitých oblastí, v ktorej sa nenachádzal žiadny celočíselný bod.

Pridaním takýchto platných nerovností sa redukuje množina prípustných spojitých riešení a tým prispieva k významnému zrýchleniu prehľadávania. Možných nerovností existuje veľmi veľa, je potrebné nájsť balans medzi vytváraním rezov a vetvením.



**Obr. 3.3:** Pridanie sečnej nadroviny medzi ohraničenia.

Efektívnosť algoritmu závisí od jeho implementácie. Rôznymi spôsobmi sa môže rozhodovať o výbere vetviacej premennej a ich poradí. Najlepšie je pomocou rozličných heuristických metód zvoliť takú, ktorá oreže čo najväčšiu časť stromu, čiže čo najbližšie ku koreňu. Dobrá heuristika sa snaží nájsť prípustné riešenie čo najskôr a tak urýchliť ďalšie prehľadávanie, čím je riešenie lepšie, tým viac vetiev môže algoritmus orezať.

V praxi **MIP** problémy riešia solvre na to určené a líšia sa vo viacerých ohľadoch. V tom akú formuláciu problému podporujú, či majú užívateľské rozhranie, prístupnosť z iných programovacích jazykov, ako efektívne riešia problémy a akú licenciu ponúkajú. Najvýkonnejšie komerčné solvre sú GUROBI, CPLEX, MOSEK alebo Xpress, ktoré dokážu rádovo rýchlejšie hľadať riešenia ako open-source solvre GLPK, SCIP alebo CLP [13].



Časť II

**Praktická časť**



# Typy obmedzení zdrojov

---

Súbor zdrojov je zložený z viacerých malých zdrojov, ktoré nemôžu poskytovať svoj výkon pre agregátor nepretržite. Najčastejšie sú zariadenia limitované maximálnou dĺžkou doby, na akú môže zmeniť svoj aktuálny výkon počas bežnej prevádzky. Nasledovne je nutná prestávka o minimálnej dĺžke, kedy zariadenie funguje vo svojom štandardnom režime.

Uvažovať budeme periódu vzorkovania  $T_s = 15$  min, t. j. 15-minútové intervaly ako najkratší časový úsek. Zmluvné aj technické obmedzenia sú pre každý druh zdroja rozličné, ale dajú sa zaradiť do niekoľkých typov.

## 4.1 Maximálny čas zapnutia/vypnutia

Ak celý časový horizont rozdelíme na 15-minútové intervaly a úlohou je určiť, kedy je zariadenie zapnuté, treba zaručiť aby to nebolo dlhšie ako je povolená doba. Doba závisí nielen od typu zdroja, ale aj od konkrétneho zariadenia  $z$  a označujeme ju parametrom  $U_z^{\max}$ . Podmienka je splnená ak platí nerovnostné ohraničenie

$$\sum_{j=t-U_z^{\max}+1}^{t+1} \delta_z(j) \leq U_z^{\max}, \quad \forall t \in \{U_z^{\max}, \dots, N-1\}, \quad (4.1)$$

kde  $\delta_z$  je binárna optimalizovaná premenná vyjadrujúca zapnutý/vypnutý stav  $z$ -tého zariadenia a  $N$  je počet 15-minútových okien v časovom horizonte  $T$ .

Toto ohraňenie zabezpečí, že v celom časovom horizonte,  $\delta_z$  nenadobudne hodnotu 1 viac ako  $U_z^{\max}$ -krát po sebe. Ak  $\delta_z$  bola od času  $t - U_z^{\max} + 1$  po čas  $t$  rovná 1, v nasledujúcom čase  $t + 1$  určite bude  $\delta_z = 0$ .

Analogické ohraňenie napíšeme, ak chceme obmedziť maximálnu dĺžku, koľko môže byť zariadenie  $z$  vypnuté, vyjadrenú parametrom  $D_z^{\max}$

$$\sum_{j=t-D_z^{\max}+1}^{t+1} \delta_z(j) \geq 1, \quad \forall t \in \{D_z^{\max}, \dots, N-1\}. \quad (4.2)$$

Ak je ohraňenie splnené, na intervale od  $t$  po  $t + D_z^{\max}$  bude  $\delta_z$  aspoň raz rovná 1.

## 4.2 Minimálny čas zapnutia/vypnutia

Často potrebujeme vyjadriť podmienku, aká najkratšia prestávka musí byť medzi po sebe idúcimi zapnutiami. Parameter udávajúci počet intervalov ako dlho nesmie dôjsť k opätovnému zapnutiu zariadenia  $z$  je  $D_z^{\min}$ . Pre formulovanie ohraňenia vyjadrujúceho minimálny čas musíme zaviesť indikátor vypnutia

$$V_z(t) = \delta_z(t-1) - \delta_z(t), \quad \forall t \in \{2, \dots, N\}. \quad (4.3)$$

Indikátor  $V_z(t)$  je rovný 1, iba ak sa v čase  $t$  zariadenie vypne, inak je = 0. Nerovnostné ohraňenie je potom

$$\sum_{j=t}^{\min\{t+D_z^{\min}-1, N\}} \delta_z(j) \leq 1 - V_z(j), \quad \forall t \in \{2, \dots, N\}. \quad (4.4)$$

Ohraňenie je aktívne iba ak indikátor je 1. Ohraňenie zaručuje, že keď sa stav zariadenia zmení v čase  $t$  z 1 na 0, nasledujúcich  $D_z^{\min}$  intervalov  $\delta_z$  bude rovná 0, čiže zariadenie vypnuté.

Analogicky formulujeme indikátor zapnutia a príslušné nerovnostné ohraňenia ak chceme zariadeniu  $z$  prikázať minimálnu dobu aktivácie  $U_z^{\min}$

$$\left. \begin{aligned} O_z(t) &= \delta_z(t) - \delta_z(t-1), \\ \sum_{j=t}^{\min\{t+U_z^{\min}-1, N\}} \delta_z(j) &\geq O_z(j), \end{aligned} \right\} \forall t \in \{2, \dots, N\}. \quad (4.5)$$

### 4.3 Maximálny čas v danom intervale

Toto ohraňenie má zabezpečiť splnenie podmienky, ktorá obmedzuje maximálnu dobu zapnutia v určitom časovom intervale. Ak je požiadavka na istý počet hodín v nejakom intervale, napr. v mesiaci, použije sa toto ohraňenie. Následne nezáleží ako budú hodiny v mesiaci rozložené a koľkokrát dôjde k zapnutiu/vypnutiu zariadenia, ale nedôjde k prekročeniu daného času.

Zariadenie  $z$ , ktoré musí spĺňať toto ohraňenie je charakterizované parametrami  $M_z$  a  $I_z$ . Oba zaznamenávajú časový údaj ako počet 15-minútových okien.  $M_z$  označuje maximálny povolený čas v intervale  $I_z$ .

Časový horizont  $T$  s  $N$  15-minútovými oknami sa rozdelí na  $N_z^I$  úsekov s dĺžkou  $I_z$

$$N_z^I = \frac{N}{I_z}, \quad \forall z \in \mathcal{Z}_m, \quad (4.6)$$

kde  $\mathcal{Z}_m$  je množina zariadení s ohraňením maximálny čas v danom intervale.

Nerovnostné ohraňenie pre všetky intervaly sa matematicky zapíše

$$\sum_{j=1+(k-1)I_z}^{kI_z} \delta_z(j) \leq M_z, \quad \forall k \in \{1, \dots, N_z^I\}. \quad (4.7)$$

Ohraňenie zaručí, že zariadenie v súčte nebude zapnuté viac ako  $M_z$  15-minútových okien v každom intervale  $I_z$ .

Príklad: zariadenie má povolenú disponibilitu maximálne 4 hodiny denne. Ak je časový horizont optimalizácie 1 týždeň, rozdelí sa na  $N_z^I = 7$  úsekov, a pre každý sa vytvorí ohraňenie (4.7), kde  $M_z = 16$  a  $I_z = 96$ . Neberie sa ohľad na to v ktorej časti dňa dôjde k zapnutiu a či išlo o súvislú alebo prerušovanú prevádzku.

### 4.4 Stav nabitia

V prípade nabíjateľných batérií treba brať do úvahy aj ich SoC. Po celú dobu horizontu optimalizácie je monitorovaný ich stav. V prípade zápornej regulácie (znižovanie

spotreby odberného miesta), batériu je možné aktivovať iba ak má dostatočnú zostávajúcu kapacitu a naopak, pri kladnej regulácii musí mať dostatočnú rezervu pred úplným dobitím. Kladná a záporná regulácia sa optimalizujú zvlášť.

Počas jednej aktivácie stav batérie klesne (v prípade kladnej regulácie stúpne) o určitú hodnotu. Hodnota sa vypočíta z parametra batérie  $E$ , označujúceho výdrž v hodinách pri danom výkone. Parameter sa prepočíta na hodnotu  $\alpha$ , ktorá vyjadruje podiel o koľko percent sa zmení stav nabitia batérie.

Druhým parametrom charakterizujúcim danú batériu je  $R$ , za koľko sa dobije. Prepočítaním na hodnotu  $\beta$  sa vyjadří miera obnovenia stavu nabitia počas neaktívneho intervalu.

Optimalizovaná premenná  $SoC$  sa v prvom intervale  $t$  inicializuje na určitú hodnotu a v ďalších sa vypočíta podľa zjednodušeného modelu (všetky premenné sú uvedené s vynechaným indexom  $z$ ):

$$SoC(t+1) = SoC(t) - \alpha\delta(t) + \beta(1 - \delta(t)) - \gamma(t). \quad (4.8)$$

Pre kladnú reguláciu sa v rovnici zmenia znamienka:

$$SoC(t+1) = SoC(t) + \alpha\delta(t) - \beta(1 - \delta(t)) + \gamma(t). \quad (4.9)$$

Obe rovnice sú platné pre všetky  $t \in \{1, \dots, N-1\}$ .  $\gamma(t)$  je pomocná optimalizovaná premenná na zabezpečenie stavu nabitia aby nepresiahol povolené hodnoty 0 – 100 %. Hodnota  $\gamma(t)$  sa môže pohybovať len v intervale  $[0, \beta]$ .

Pre premennú  $SoC$  musí existovať nasledujúce ohraničenie, aby nadobúdala len povolené hodnoty:

$$0 \leq SoC(t) \leq 1, \quad \forall t \in \{1, \dots, N\}. \quad (4.10)$$

Uvedené rovnice zabezpečia, že batérie budú pre agregátor disponibilné len ak majú dostatočnú voľnú kapacitu.

## Súbor zdrojov

---

Súbor zdrojov je združenie všetkých distribuovaných zdrojov flexibility pripojených do virtuálnej elektrárne. Súbor je vytvorený na základe realistických predpokladov a možností na Slovensku.

Súbor, ktorý máme k dispozícii je zložený z 305 zariadení, ktoré je možné združiť do deviatich rozličných kategórií. Každá kategória má svoje špecifické správanie. Rozloženie podľa nich je nasledovné:

- 17 veľkých batérií,
- 250 malých batérií,
- 13 dieselagregátov,
- 9 kogeneračných jednotiek,
- 7 bioplynových staníc,
- 3 vzduchotechnické jednotky,
- 1 výroba stlačeného vzduchu,
- 1 výroba chladiacej vody,
- 4 výroby chladu.

Každý zo zdrojov v súbore má opisné parametre. Udáva sa výška disponibilného výkonu pre agregátor. Podľa toho či dokáže aktiváciou znížiť alebo zvýšiť spotrebu odberného miesta má zdroj priradený druh regulácie. Regulácia môže byť kladná, záporná alebo obidva druhy. Zariadenie sa líšia aj svojou prevádzkovou dobou počas dňa a či sú dostupné aj cez víkend alebo len pracovné dni. Všetky údaje sú uvedené v tabuľke č. 5.1.

**Tabuľka 5.1:** Zoznam zdrojov a ich základných parametrov.

Ozn.	Typ	Počet	Druh	Výkon [MW]	Prevádz. doba	Prevádz. dni
1a	veľká batéria	1	+/-	0,250	0-24 h	Po-Pi
1b	veľká batéria	1	+/-	0,250	16-8 h	každý deň
1c	veľká batéria	1	+/-	0,250	0-24 h	každý deň
1d	veľká batéria	1	+/-	0,250	0-24 h	každý deň
1e	veľká batéria	3	+/-	0,150	0-24 h	každý deň
1f	veľká batéria	10	+/-	0,050	22-6 h	každý deň
2a	malá batéria	250	+/-	0,003	0-24 h	každý deň
3a	dieselagregát	1	-	0,250	8-20 h	Po-Pi
3b	dieselagregát	1	-	1,250	6-22 h	Po-Pi
3c	dieselagregát	1	-	1,000	6-22 h	Po-Pi
3d	dieselagregát	10	-	0,250	0-24 h	každý deň
4a	kogeneračná jednotka	1	+	0,500	0-24 h	každý deň
4b	kogeneračná jednotka	1	+	0,500	0-24 h	každý deň
4c	kogeneračná jednotka	2	+	0,250	0-24 h	každý deň
4d	kogeneračná jednotka	5	+	0,250	0-24 h	každý deň
5a	bioplynová stanica	7	+	0,390	0-24 h	každý deň
6a	vzduchotechnika	1	+/-	0,200	8-20 h	Po-Pi
6b	vzduchotechnika	1	-	0,400	6-22 h	Po-Pi
6c	vzduchotechnika	1	+	0,200	22-6 h	Po-Pi
7a	stlačený vzduch	1	-	0,500	6-22 h	Po-Pi
8a	výroba chladiacej vody	1	-	0,500	6-22 h	Po-Pi
9a	výroba chladu	4	+	0,250	6-20 h	každý deň



## 5.1 Individuálne obmedzenia zdrojov

S každým zariadením sú okrem prevádzkových obmedzení spojené aj vlastné technické a kontraktuálne obmedzenia. Tie sú zvyčajne spoločné pre každú kategóriu zariadení. Ohraničujúce funkcie sa dajú vytvoriť na základe rovníc a nerovníc uvedených v kapitole 4.

### Veľké a malé batérie

Všetky batérie musia mať monitorovaný stav nabitia a podľa neho môže dôjsť k aktivácii. Na výpočet SoC sa používajú rovnice 4.8 a 4.9. Pri všetkých veľkých aj malých batériách uvažujeme výdrž aktivácie do jednej hodiny ( $E = 4$ ) a čas potrebný na úplnú obnovu SoC dve hodiny ( $R = 8$ ). Vypočítajú sa koeficienty  $\alpha = 0,25$  a  $\beta = 0,125$ . Ohraničenia sú nasledovné (pre zápornú reguláciu):

$$SoC(t+1) = SoC(t) - 0,25\delta(t) + 0,125(1 - \delta(t)) - \gamma(t), \quad \forall t \in \{1, \dots, N-1\}, \quad (5.1)$$

doplňkové ohraničenia určujúce hranice:

$$\left. \begin{array}{l} 0 \leq SoC(t) \leq 1, \\ 0 \leq \gamma(t) \leq \beta, \end{array} \right\} \forall t \in \{1, \dots, N\} \quad (5.2)$$

a inicializácia počiatočného stavu

$$SoC(1) = 0,5. \quad (5.3)$$

Uvedené rovnice sú platné pre každú batériu samostatne.

### Dieselagregáty

Pre dieselagregáty platí kvôli emisnému limitu podmienka maximálna doba prevádzky 500 hodín ročne. Z 500 h je potrebné odpočítať dobu, kedy je dieselagregát zapnutý pre svoju bežnú prevádzku. Dieselagregáty zaradené v súbore slúžia primárne ako

záložné zdroje, ktoré mimo toho musia jedenkrát týždenne podstupovať testovacie štarty. Po nadhodnotenom odhade bežnej prevádzky zostane pre potreby agregátora 370 hodín/rok.

Pre všetky dieselaagregáty sa použije ohraničenie maximálny čas v danom intervale, kde parametre majú hodnotu  $M = 1\,480$  (370 hodín) a  $I = 35\,040$  (1 rok). Nerovnostné ohraničenie (4.7) má zjednodušený tvar

$$\sum_{j=1}^{35\,040} \delta(j) \leq 1\,480, \quad (5.4)$$

kde sa zároveň  $I = T = 35\,040$ . Ak je časový horizont  $T$  menší ako jeden rok, parametre je nutné proporcionálne prepočítať na daný interval.

### Kogeneračné jednotky

Kogeneračné jednotky sú štandardne v prevádzke nepretržite a okrem elektriny vyrábajú aj teplo. Počas roka dochádza k niekoľkým odstávkam, najmä v letných mesiacoch keď teplo nie je možné nikam odvieť. Keď je jednotka vypnutá, nie je dostupná pre agregátor. Možnosti agregátora sú riadenie výkonu počas prevádzky, zo 100 % na 50 % môže znížiť bez časového obmedzenia a vypnúť úplne môže kogeneračnú jednotku na maximálne 3 hodiny, nasledované tromi hodinami štandardnej prevádzky.

Kvôli dvom rozdielnym režimom fungovania a to s obmedzením a bez obmedzenia, sú všetky kogeneračné jednotky modelované ako 2 virtuálne zariadenia (ozn. 'A' a 'B'), z ktorých môže byť aktívne najviac jedno

$$\delta_A(t) + \delta_B(t) \leq 1, \quad \forall t \in \{1, \dots, N\}. \quad (5.5)$$

V bežnej prevádzke je jedna kogeneračná jednotka cca 80 % roku a nie je presne dané kedy. Model pracuje s náhodne vygenerovanými intervalmi nedostupnosti. Zavádza parameter  $S_z$ , ktorý vyjadruje podiel doby, kedy je zariadenie z nedostupné. Pre všetky kogeneračné jednotky platí  $S_z = 0,2$ .

Pri modelovaní má prvé virtuálne zariadenie bez obmedzenia ('B') len polovičný disponibilný výkon, zatiaľ čo druhé virtuálne zariadenie ('A') má celý výkon a dané parametre  $U_A^{\max} = D_A^{\min} = 3 h = 12$  periód vzorkovania (15-minútových intervalov).

Ohraničenie maximálny čas zapnutia (4.1) pre jednu kogeneračnú jednotku je nasledovné:

$$\sum_{j=t-12+1}^{t+1} \delta_A(j) \leq 12, \quad \forall t \in \{12, \dots, N-1\}, \quad (5.6)$$

platíť musí aj ohraničenie minimálny čas vypnutia (4.4):

$$\left. \begin{array}{l} V_A(t) = \delta_A(t) - \delta_A(t-1), \\ \sum_{j=t}^{\min\{t+12-1, N\}} \delta_A(j) \geq V_A(j), \end{array} \right\} \quad \forall t \in \{2, \dots, N\}. \quad (5.7)$$

### Bioplynové stanice

Bioplynové stanice sa modelujú podobným spôsobom ako kogeneračné jednotky so zmenou parametrov  $U_z^{\max}$ ,  $D_z^{\min}$  a  $S_z$ . Tiež platí rozdelenie na 2 virtuálne zariadenia a ohraničenie (5.5).

Rozdiel je, že bioplynová stanica narozdiel od kogeneračnej jednotky nemá kontinuálny prísun paliva, ale nepravidelný, palivo sa zbiera v zásobníku s kapacitou na 2 hodiny prevádzky. Pri polovičnom výkone sú to 4 hodiny prevádzky. Odhadom 40 % času nie je v prevádzke a tým nedostupná pre agregátor.

Parameter  $S_z = 0,4$  a parametre pre ohraničenia (4.1) a (4.4) sú  $U_A^{\max} = D_A^{\min} = D_B^{\min} = 2 h$  a  $U_B^{\max} = 4 h$ .

### Vzduchotechnické jednotky, výroby stlačeného vzduchu a chladiacej vody

Pre tieto zariadenia platí jednoduché pravidlo, po každej aktivácii musí nasledovať pauza minimálne trikrát tak dlhá. Dĺžka aktivácie je najviac 15 minút pre vzduchotechnické jednotky a 30 minút pre výroby stlačeného vzduchu a chladiacej vody. Vo

všetkých prípadoch sa použijú ohraničenia maximálny čas zapnutia (4.1) a minimálny čas vypnutia (4.4) s parametrami uvedenými v tabuľke č. 5.2.

**Tabuľka 5.2:** Zoznam zdrojov a ich parametrov ohraničení.\*

Ozn.	Typ	$D^{\min}$	$U^{\max}$	$M$	$I$	$E$	$R$	$S$
1a	veľká batéria	–	–	–	–	4	8	–
1b	veľká batéria	–	–	–	–	4	8	–
1c	veľká batéria	–	–	–	–	4	8	–
1d	veľká batéria	–	–	–	–	4	8	–
1e	veľká batéria	–	–	–	–	4	8	–
1f	veľká batéria	–	–	–	–	4	8	–
2a	malá batéria	–	–	–	–	4	8	–
3a	dieselagregát	–	–	1 480	35 040	–	–	–
3b	dieselagregát	–	–	1 480	35 040	–	–	–
3c	dieselagregát	–	–	1 480	35 040	–	–	–
3d	dieselagregát	–	–	1 480	35 040	–	–	–
4a	kogeneračná j. A	12	12	–	–	–	–	0,2
4b	kogeneračná j. A	12	12	–	–	–	–	0,2
4c	kogeneračná j. A	12	12	–	–	–	–	0,2
4d	kogeneračná j. A	12	12	–	–	–	–	0,2
4a	kogeneračná j. B	–	–	–	–	–	–	0,2
4b	kogeneračná j. B	–	–	–	–	–	–	0,2
4c	kogeneračná j. B	–	–	–	–	–	–	0,2
4d	kogeneračná j. B	–	–	–	–	–	–	0,2
5a	bioplynová st. A	8	8	–	–	–	–	0,4
5a	bioplynová st. B	8	16	–	–	–	–	0,4
6a	vzduchotechnika	3	1	–	–	–	–	–
6b	vzduchotechnika	3	1	–	–	–	–	–
6c	vzduchotechnika	3	1	–	–	–	–	–
7a	stlačený vzduch	6	2	–	–	–	–	–
8a	chladiaca voda	6	2	–	–	–	–	–
9a	výroba chladu	–	–	–	–	–	–	–

\* Parametre:  $D^{\min}$  je minimálny čas vypnutia;  $U^{\max}$  je maximálny čas zapnutia;  $M$  označuje povolený čas zapnutia (v súčte) počas intervalu  $I$ ;  $E$  je parameter batérie pre jej výdrž a  $R$  je doba obnovenia;  $S$  je tzv. shutdown, podiel (neznámej) nedostupnosti.

Zoznam zhrňa všetky parametre ohraňujúce. V zozname každé zariadenie kogeneračnej jednotky a bioplynovej stanice je uvedené dvakrát v oboch verziách kvôli odlišným parametrom.



# Optimalizácia súboru

---

Optimalizácia súboru je rozdelená na 2 časti. Najprv sa pomocou statickej optimalizácie zistí hodnota výkonu, ktorú je možné použiť pri simulácii dynamickej optimalizácie.

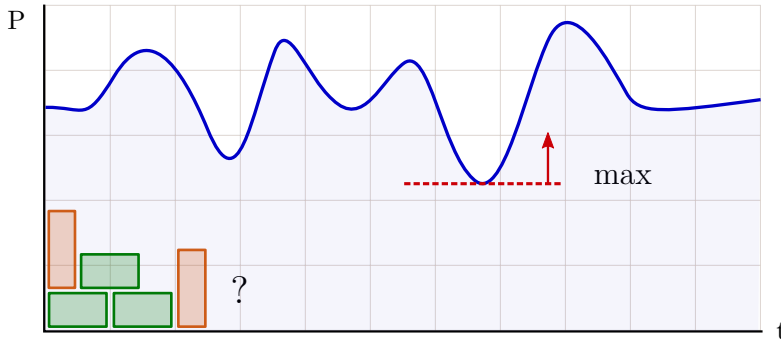
Úloha bola formulovaná v prostredí MATLAB R2019b s použitím modelovacieho toolboxu YALMIP [12] verzia R20200116. Na riešenie sa použil solver GUROBI<sup>7</sup> vo verzii v8.1.1. Výpočty prebiehali na počítači s procesorom Intel Core i5 o frekvencii 2,5 GHz a operačnou pamäťou 8 GB.

## 6.1 Statická optimalizácia

Cielom statickej optimalizácie je nájsť maximálnu hodnotu výkonu  $P$ , ktorú dokáže súbor splniť v akomkoľvek čase (obr. 6.1). Optimalizácia sa vykonáva zvlášť pre kladnú a zvlášť pre zápornú reguláciu. Zdroje, ktoré dokážu poskytovať kladnú aj zápornú reguláciu sa môžu nachádzať v oboch optimalizáciách, pretože nikdy nepríde naraz kladná aj záporná aktivácia.

---

<sup>7</sup> <https://www.gurobi.com/products/gurobi-optimizer/>



Obr. 6.1: Chceme maximalizovať dosiahnuté minimum.

### 6.1.1 Matematická formulácia statickej optimalizácie

Optimalizovanou premennou je okrem  $\delta_z$  (on/off stav) maximálny výkon  $P$ , ktorý chceme zistiť. Účelová funkcia má jednoduchý lineárny tvar

$$\max_{P, \delta} P. \quad (6.1)$$

Pri použití optimalizačného solveru, ktorý minimalizuje účelovú funkciu, musíme zmeniť znamienko,  $-P$ . Účelovú funkciu optimalizujeme vzhľadom na uvedené ohraňovania v kapitole 5, ku ktorým sa pridajú ohraňovania vzťahujúce sa na výkon  $P$ .

Hodnota  $P$  nemôže byť menšia ako 0 a zhora ju ohraňujú možnosti súboru zdrojov

$$0 \leq P \leq p(t), \quad \forall t \in \mathcal{T}, \quad (6.2)$$

kde  $p(t)$  je hodnota výkonu v každom čase a  $\mathcal{T} = \{1, \dots, N\}$ .

Výkon  $P$  sa rovná najmenšiemu dosiahnutému výkonu  $p(t)$  počas celého časového horizontu. Výška  $p(t)$  je súčet jednotkových výkonov  $P_z^{\text{unit}}$  zapnutých zariadení v čase  $t$ .

$$p(t) \leq \sum_{z \in \mathcal{Z}} P_z^{\text{unit}} \delta_z(t) a_z(t), \quad \forall t \in \mathcal{T}, \quad (6.3)$$

kde  $\mathcal{Z}$  je množina všetkých zariadení a parameter  $a_z(t)$  vyjadruje binárnu dostupnosť zariadenia  $z$  v čase  $t$  podľa údajov o prevádzke z tabuľky 5.1 v kapitole 5. Vždy musí



platí obmedzenie

$$\delta_z(t) \leq a_z(t), \quad \forall t \in \mathcal{T}, \quad (6.4)$$

a tým optimalizovaná premenná  $\delta_z(t)$  nemôže byť 1 a zariadenie  $z$  aktivované ak v čase  $t$  nie je v prevádzke.

K uvedeným ohraňčeniam 6.2 – 6.4 a účelovej funkcii 6.1 pridáme individuálne ohraňčenia zdrojov opisované v predchádzajúcich kapitolách a môžeme formulovať úplné znenie optimalizačného problému:

$$\min_{P, \delta} -P \quad (6.5a)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq P \leq p(t), \quad \forall t \in \mathcal{T}, \quad (6.5b)$$

$$p(t) \leq \sum_{z \in \mathcal{Z}} P_z^{\text{unit}} \delta_z(t) a_z(t), \quad \forall t \in \mathcal{T}, \quad (6.5c)$$

$$\delta_z(t) \leq a_z(t), \quad \forall t \in \mathcal{T}, \forall z \in \mathcal{Z}, \quad (6.5d)$$

$$\sum_{j=t-U_z^{\text{max}}+1}^{t+1} \delta_z(j) \leq U_z^{\text{max}}, \quad \forall t \in \{U_z^{\text{max}}, \dots, N-1\}, \forall z \in \mathcal{Z}_u, \quad (6.5e)$$

$$V_z(t) = \delta_z(t-1) - \delta_z(t), \quad \forall t \in \{2, \dots, N\}, \forall z \in \mathcal{Z}_d, \quad (6.5f)$$

$$\sum_{j=t}^{\min\{t+D_z^{\text{min}}-1, N\}} \delta_z(j) \leq 1 - V_z(j), \quad \forall t \in \{2, \dots, N\}, \forall z \in \mathcal{Z}_d, \quad (6.5g)$$

$$N_z^{\text{I}} = \frac{N}{I_z}, \quad \forall z \in \mathcal{Z}_m, \quad (6.5h)$$

$$\sum_{j=1+(k-1)I_z}^{kI_z} \delta_z(j) \leq M_z, \quad \forall k \in \{1, \dots, N_z^{\text{I}}\}, \forall z \in \mathcal{Z}_m, \quad (6.5i)$$

$$\text{SoC}_z(t+1) = \text{SoC}_z(t) - \alpha_z \delta_z(t) + \beta_z(1 - \delta_z(t)) - \gamma_z(t), \quad \forall t \in \{1, \dots, N-1\}, \forall z \in \mathcal{Z}_s, \quad (6.5j)$$

$$0 \leq \text{SoC}_z(t) \leq 1, \quad \forall t \in \mathcal{T}, \forall z \in \mathcal{Z}_s, \quad (6.5k)$$

$$0 \leq \gamma_z(t) \leq \beta_z, \quad \forall t \in \mathcal{T}, \forall z \in \mathcal{Z}_s, \quad (6.5l)$$

$$\text{SoC}_z(1) = 0.5, \quad \forall z \in \mathcal{Z}_s, \quad (6.5m)$$

$$\delta_{zA}(t) + \delta_{zB}(t) \leq 1, \quad \forall t \in \mathcal{T}, \forall z \in \mathcal{Z}_c. \quad (6.5n)$$

$\mathcal{Z}$  je množina všetkých zariadení a množiny  $\mathcal{Z}_x$  sú vždy podmnožiny v ktorých sa nachádzajú zariadenia s príslušnými typmi ohraňení. Uvedené podmienky sú platné pre zápornú reguláciu, pre kladnú sa v rovnici 6.5j zmenia znamienka.

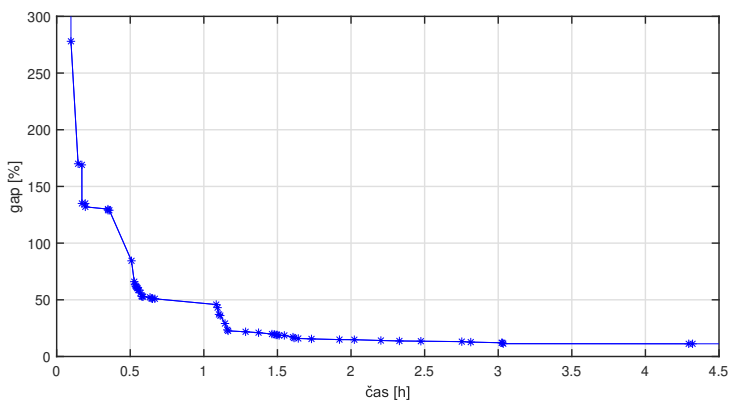
Pretože bola daná optimalizačná úloha modelovaná v prostredí MATLAB s použitím toolboxu YALMIP a vzhľadom na rozsiahlosť problému, všetky ohraňenia boli napísané vo vektorizovanom tvare s využitím matíc.

### 6.1.2 Riešenie statickej optimalizácie

Z dôvodu výpočtovej zložitosti sme zvolili dĺžku časového horizontu  $T$  jeden týždeň ( $N = 672$ ). Ide o najkratší, periodicky sa opakujúci úsek. Počet spojitých a binárnych optimalizovaných premenných sa v tomto prípade pohybuje rádovo v státisícoch, pri kladnej regulácii ich je vyše pol milióna.

#### Záporná regulácia

Dostatočne dobrý výsledok pri počítaní zápornej regulácie sme dosiahli po cca 2 hodinách. Na obrázku č. 6.2 je vidno priebeh optimalizácie a znižovanie suboptimality, čiže rozdielu medzi aktuálne najlepším riešením a potenciálnym globálnym optimom.



**Obr. 6.2:** Vývoj suboptimality v priebehu optimalizácie, hviezdičky označujú nájdenie nového lepšieho riešenia.

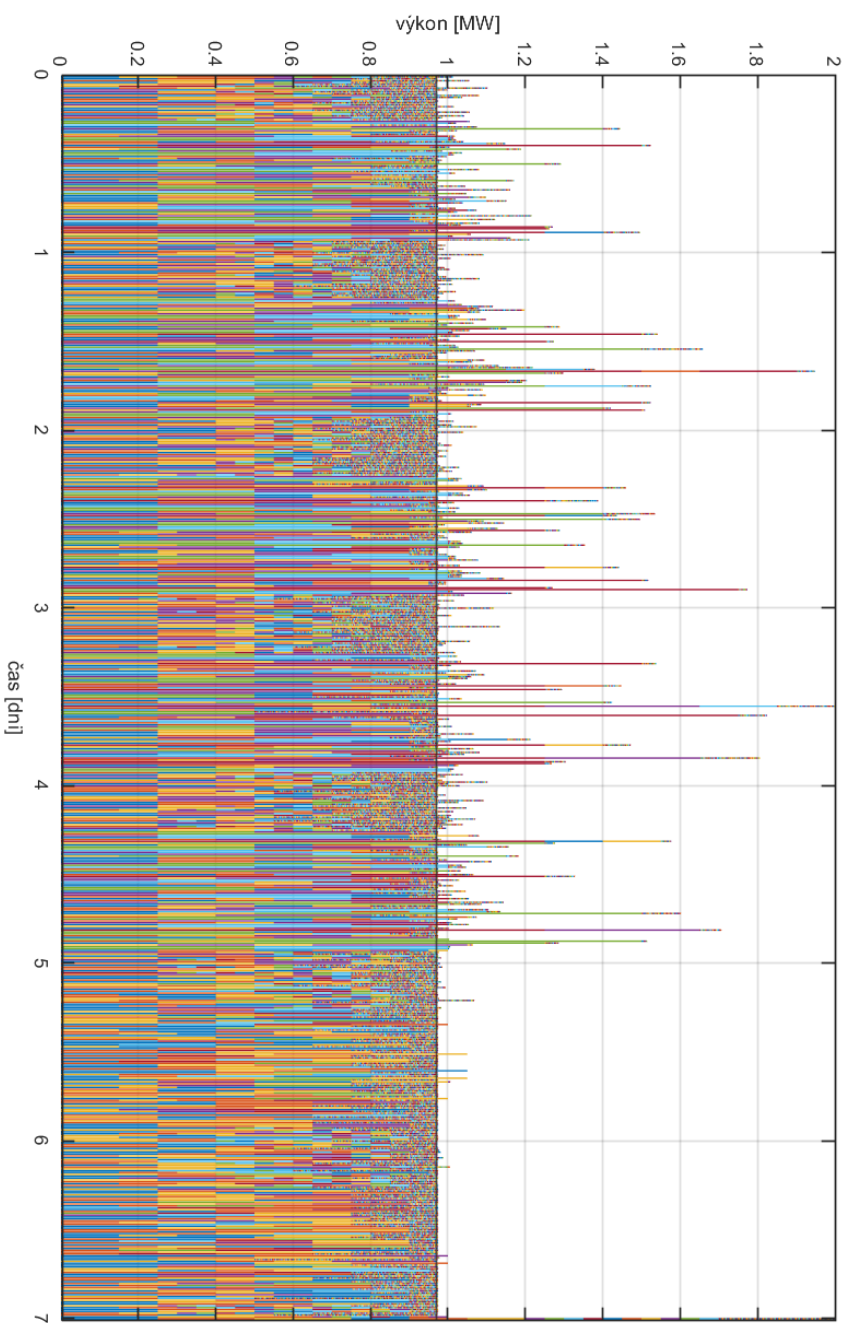
Vypočítaná hodnota výkonu bola 0,971 MW pri veľkosti suboptimality 11,2 percenta, takže horná hranica teoreticky najlepšieho riešenia je 1,08 MW. Optimalizácia bola spustená viackrát a po dobu dlhšiu ako 12 hodín, nedošlo však k ďalšiemu zlepšovaniu riešenia.

Na obrázku č. 6.3 sú zobrazené jednotlivé zariadenia ako stĺpce, ktoré sú v danom čase zapnuté. Na obrázku č. 6.4 je rovnaké riešenie so zariadeniami združenými podľa ich typov.

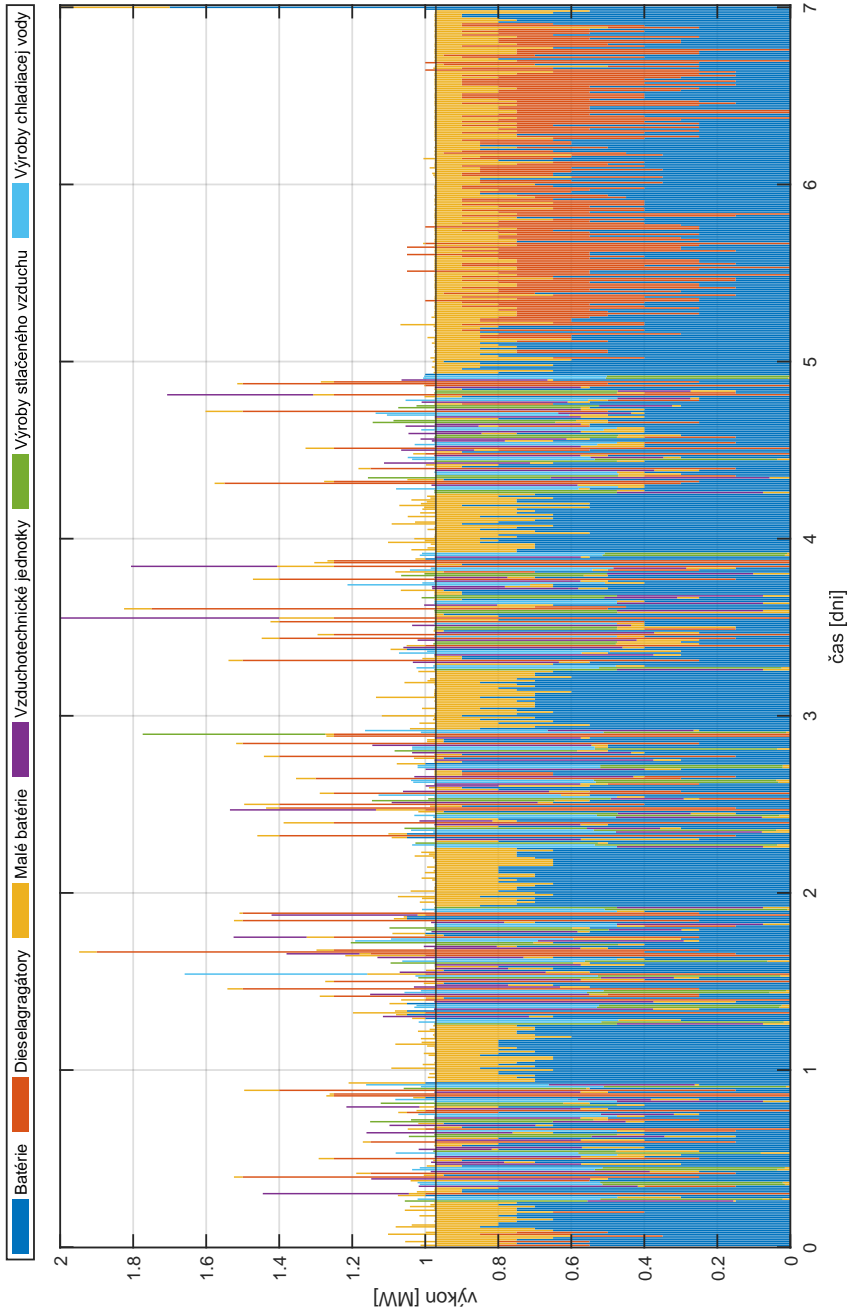
Na záver, po dosiahnutí akéhokoľvek riešenia nasledovala kontrola výsledku, či spĺňa zadané ohraničenia. Iba tak môže byť riešenie považované za platné.

### **Kladná regulácia**

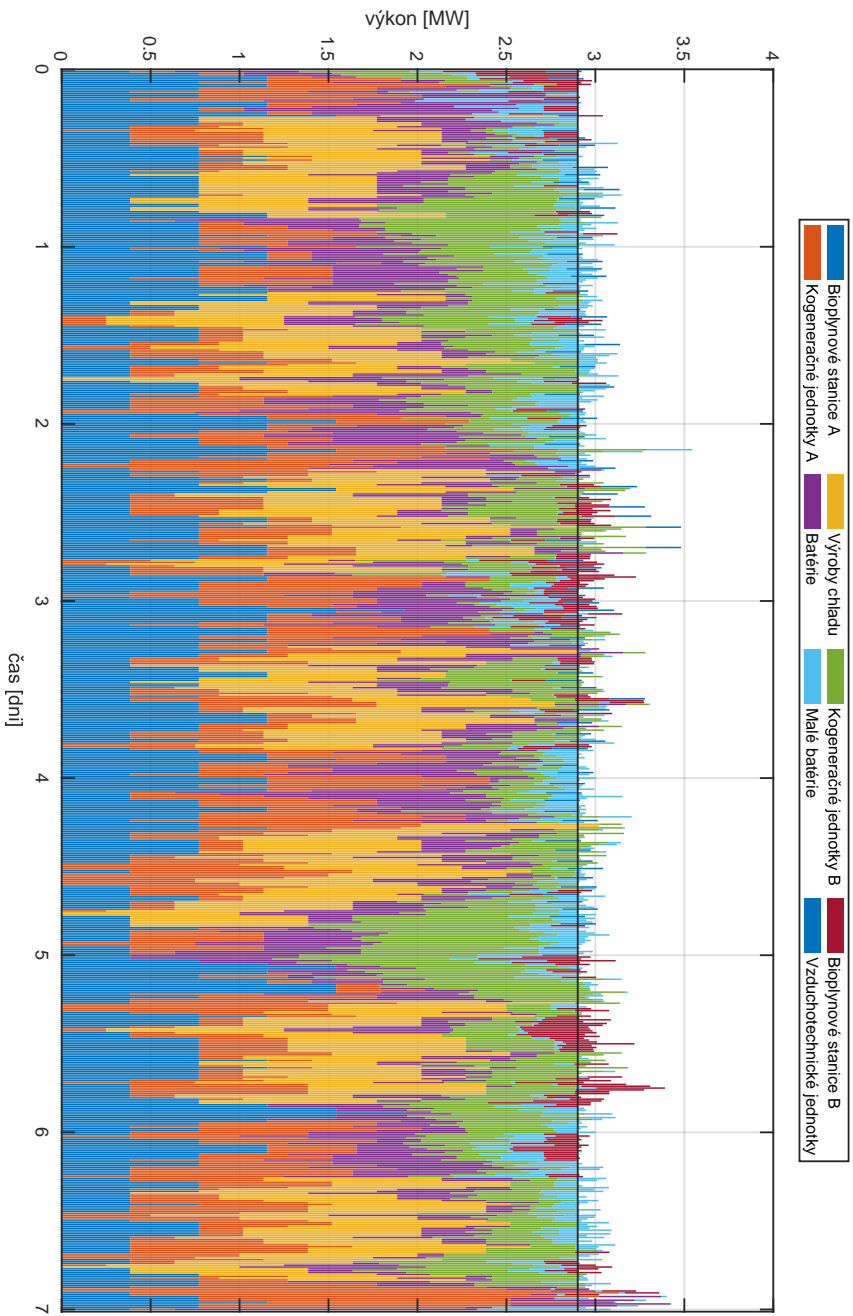
Hľadanie riešenia kladnej regulácie trvalo dlhšie ako zápornej, pretože v kladnom súbore sa nachádza viac zdrojov viacerých typov. Výslednú hodnotu výkonu 2,901 MW sme získali po 4,5 hodinách. Horný limit sa zastavil na hodnote 3,729 MW, čo vytvára suboptimalitu 28,5 %. Výsledné usporiadanie zoskupených zdrojov je v stĺpcovom grafe zobrazené na obrázku č. 6.5.



**Obr. 6.3:** Riešenie zápornej regulácie, čierna čiara označuje nepretržite dosiahnuteľný výkon, zapnuté zdroje v danom čase sú znázornené ako stĺpce so šírkou 15 minút a výškou je výkon jednotlivého zariadenia.



Obr. 6.4: Záporná regulácia, zdroje sú združené podľa typu.



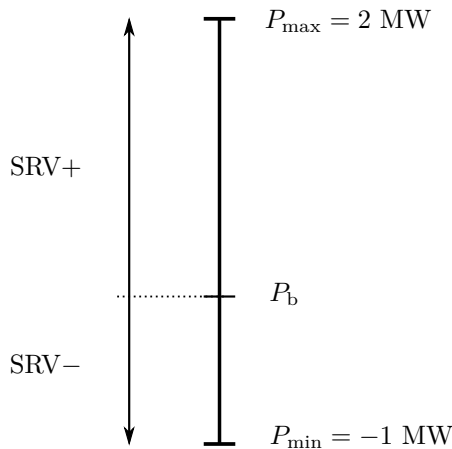
Obr. 6.5: Riešenie kladnej regulácie.

## 6.2 Dynamická optimalizácia

Cieľom dynamickej optimalizácie je rozhodovať o zapínaní zariadení v reálnom čase podľa aktuálneho aktivačného signálu. Agregátor má 15 minút na to aby rozhodol, ktoré zariadenia sa musia zapnúť, aby bola splnená požiadavka. Ak by sme mali určené náklady na jednotlivé zdroje, bolo by možné minimalizovať celkové náklady a tým preferovať lacnejšie zariadenia.

Agregátor ako poskytovateľ flexibility má možnosť poskytovať túto flexibilitu komukoľvek. V prípade, že poskytuje podporné služby Slovenskej elektrizačnej prenosovej sústave typu sekundárna regulácia činného výkonu, musí spĺňať dané technické podmienky [18]. Podmienky určujú dobu reakcie (do 30 sekúnd) a dobu plnej aktivácie (do 15 minút), tolerančné pásmo, v ktorom sa musí zmena výkonu pohybovať (udávané v percentách), minimálnu hodnotu disponibility činného výkonu ( $\pm 2$  MW, od 1.1.2022 bude stanovená na  $\pm 1$  MW), minimálnu veľkosť kroku regulácie (0,1 MW) a iné. Okrem toho sekundárna regulácia je kontinuálna a symetrická (od 1.10.2020 bude môcť byť aj nesymetrická).

Ak by sme dovolili nesymetrickú sekundárnu reguláciu, podľa výsledkov statickej optimalizácie by sme zvolili ponúkanú hodnotu činného výkonu vo výške  $+2$  MW a  $-1$  MW, viď obr. 6.6.



**Obr. 6.6:** Znázornenie asymetrickej SRV,  $P_b$  je pracovný bod.

### 6.2.1 Matematická formulácia dynamickej optimalizácie

Pri dynamickej optimalizácii nás nezaujíma celý časový horizont, ale iba aktuálny 15-minútový interval. V každom kroku sa optimalizácia opakuje. Oproti statickej optimalizácii dochádza k zmene účelovej funkcie, už nás nezaujíma maximálny výkon, ale splnenie žiadaného výkonu, takže minimalizujeme absolútnu veľkosť rozdielu medzi žiadanou a skutočnou hodnotou výkonu:

$$\min_{p, \delta} |p(t) - p_{\text{ref}}(t)|. \quad (6.6)$$

Všetky ohraničenia zo statickej optimalizácie ostávajú v platnosti. Musí sa zaviesť história predošlých stavov zariadení. Výsledkom dynamickej optimalizácie je vektor optimálnych stavov  $\delta_z$ , ktorý sa v každom ďalšom kroku pridá k histórii.

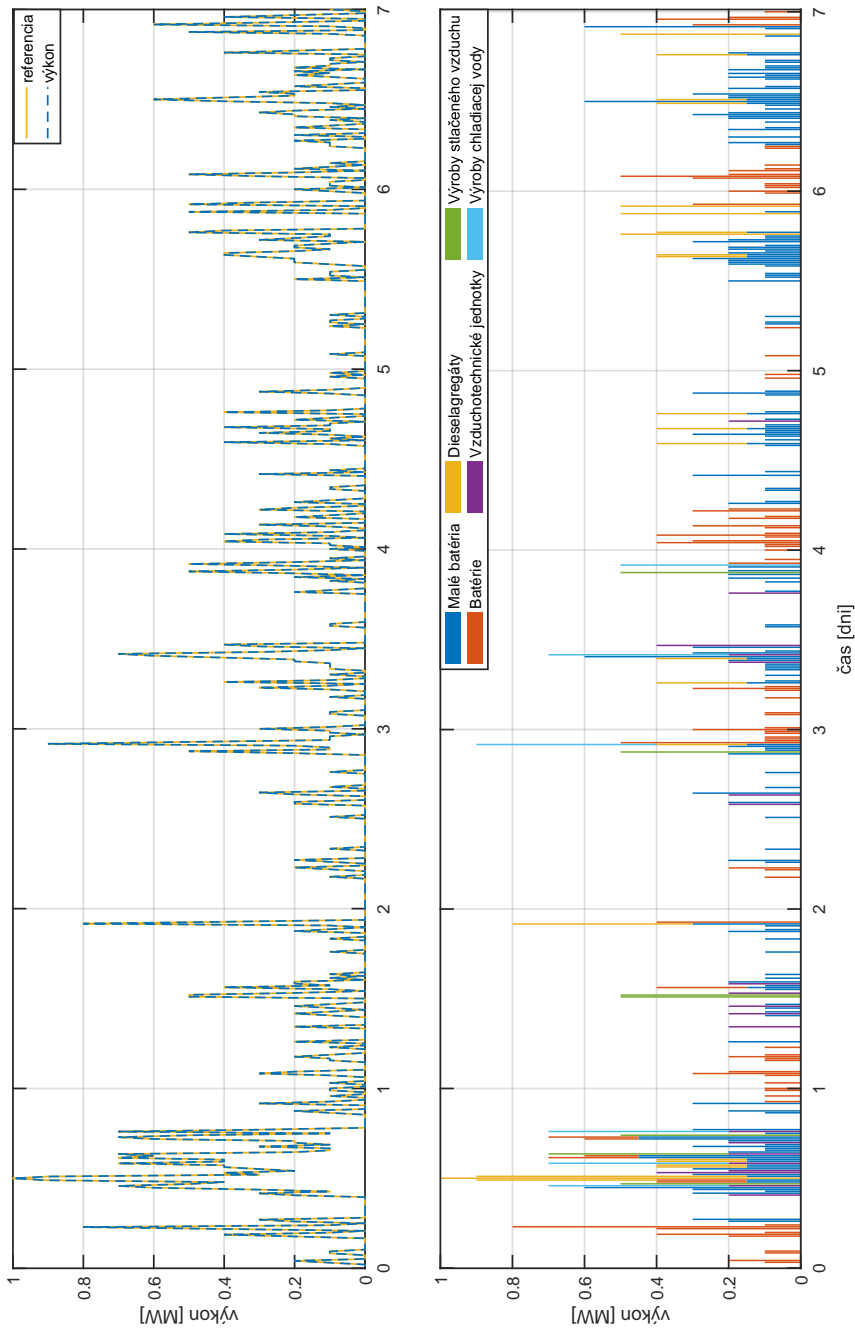
### 6.2.2 Riešenie dynamickej optimalizácie

Pre potreby simulácie sme použili dáta reálnej aktívácie **SRV** z inej prevádzky počas jedného týždňa, zdroj dát je firma ProGridTech, a. s. Tieto dáta približujú čo môžeme očakávať a poslúžia ako referencia na žiadaný výkon. Podľa údajov, aktivácia 100 % z ponúkaného činného výkonu nastáva málokedy.

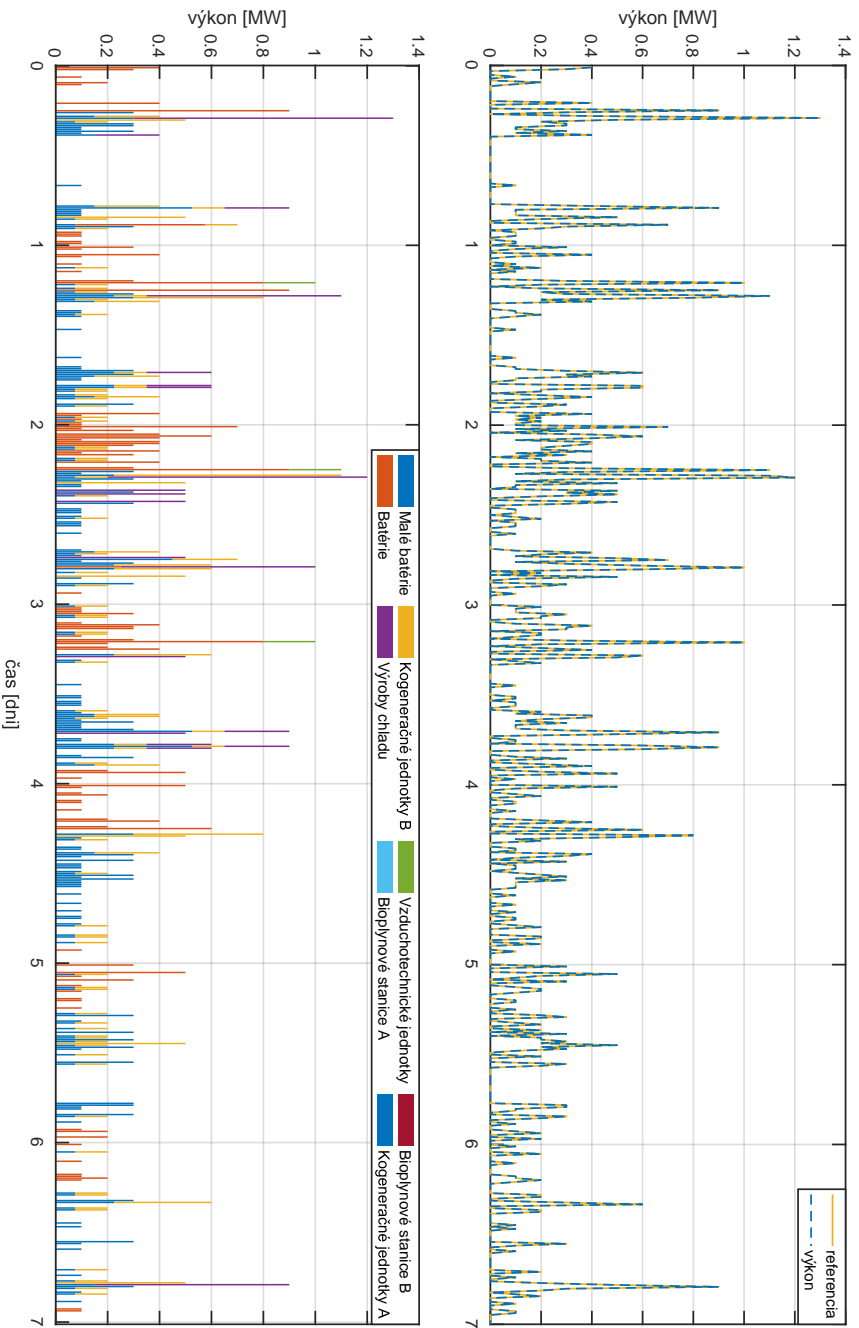
Nutnosťou pri dynamickej optimalizácii, ktorá by mala prebiehať v reálnom čase, je rýchlosť jej vyriešenia. Počas simulácie sa riešenie v každom kroku podarilo nájsť do 0,5 sekundy.

Na obrázku č. 6.7 je výsledok zápornej regulácie, na hornom grafe je porovnanie s referenciou a na dolnom je skladba zariadení akými sa dosiahol požadovaný výkon. Nulová referencia znamená, že nenastala žiadna aktivácia alebo bola aktivácia v opačnom smere. Na obrázku č. 6.8 je zobrazenie kladnej regulácie.





**Obr. 6.7:** Záporná regulácia v reálnom čase; hore je znázornené porovnanie s referenciou a dolu je zloženie zariadení akými sa dosiahol požadovaný výkon.



Obr. 6.8: Kladná regulácia v reálnom čase.

## 6.3 Diskusia

Ide o rozsiahlu optimalizáciu. Nájdenie vôbec nejakého riešenia do pár hodín môže byť z istého uhla pohľadu považované za úspech. Použitý bol MILP solver, ktorý z porovnania vyšiel najlepšie a na trhu sa nenachádza žiadny iný porovnateľnej kvality, zmenou by sme nedostali lepší výsledok. Možnosti ako dosahovať lepšie výsledky sme museli hľadať inde. Pri modelovaní problému sme vyskúšali viacero prístupov ako pomôcť solvru pri prehľadávaní priestoru všetkých možností. Zmena formulácie ohraničení, presun niektorých z nich do účelovej funkcie alebo znižovanie množiny prípustných riešení pridaním ďalších obmedzení sú niektoré z trikov. Použitie dvoj- alebo troj-binárnej formulácie [11] pri ohraničení „minimálny čas zapnutia/vypnutia“ sa neukázalo ako efektívnejšie. Vystačili sme si s pôvodnou formuláciou.

Pri zápornej regulácii nám zloženie súboru zdrojov nedovolilo dosiahnuť ani 1 MW, čo je minimálna požadovaná hodnota pre podpornú službu typu SRV, nezabúdajúc, že treba mať rezervu a počítat s redundanciou. V realite žiadne zariadenie nebude dostupné 100 % času, výpadky sa stávajú. Výsledok napovedá, že súbor je malý a mali by pribudnúť ďalšie zdroje schopné zápornej regulácie výkonu.

V prípade kladnej regulácie bola zvolená poskytovaná hodnota výkonu +2 MW aj keď sme našli lepšie riešenie, práve kvôli bezpečnosti a redundantnosti. Okrem toho chcem upozorniť na fakt, že pri kladnej regulácii sme počítali s náhodnosťou (kogeneračné jednotky a bioplynové stanice poskytujúce len kladnú reguláciu majú parameter  $S$ , ktorý má vplyv na dostupnosť  $a_z$ ), takže po každom modelovaní sme do optimalizácie vstupovali s inou množinou dát. Nie je garantované, že vždy vieme dosiahnuť výsledok aspoň 2,9 MW.

Pri pohľade na stĺpcový graf 6.4 je vidno, že pri zápornej regulácii najpoužívanejším zariadením sú batérie. Často je to aj kvôli ich 24/7 dostupnosti. V realite by však trebalo rátať aj s tým, že plnia aj iné funkcie ako príspevok do agregátora, a tak nie vždy môžu byť k dispozícii. Model je však vždy len priblížením reality a komplexnosť ide na úkor jednoduchosti. Najmä v prípade, keď ide o ťažko predvídateľné správanie môžeme počítať len s pravdepodobnosťami. K tomu mal však tento model málo dostupných dát.

V prípade kladnej regulácie (viď obr. 6.5) najviac prispievajú bioplynové a kogeneračné jednotky, pretože aj tvoria najväčší podiel súboru vzhľadom na disponibilný výkon. Z pohľadu agregátora je ideálnym zariadením v súbore výroba chladu, pretože nemá žiadne obmedzenia a dopredu vieme kedy je k dispozícii podľa konštantných prevádzkových hodín.

Napriek tomu, že pri dynamickej optimalizácii nevidíme dopredu na celý časový horizont ako pri statickej, nezaznamenali sme žiadny problém spôsobený skorým „minutím zdrojov“, ktoré by neostali na neskôr. Môže to byť aj celkovo nízkym objemom reálnej aktivácie. V simulácii je riešenie pekné, ale pri pohľade na grafy 6.7 a 6.8 vidíme prílišné preferovanie malých batérií, čo by v realite nebolo až také žiaduce. Je to spôsobené schopnosťou veľkého množstva malých batérií splniť takmer akúkoľvek požiadavku s veľkou presnosťou. Mnoho zdrojov v súbore má disponibilný výkon väčší ako je minimálny krok regulácie 0,1 MW, a tým sa s nimi nepočíta.

S tým súvisí ďalšie možné vylepšenie modelu. V prípade statickej optimalizácie nám nevedí počítať s maximálnym výkonom, ale pri dynamickej, keď chceme presne splniť požiadavku na výkon by sme mohli uvažovať so spojeným rozsahom a nie len vypnutý/zapnutý. Samozrejme to závisí od každého zariadenia, či je možné regulovať jeho výkon spojitě alebo na diskretných úrovniach a v akom intervale.

Do dokonalosti chýba spojiť kladnú so zápornou reguláciou a neoptimalizovať ich oddelene. Aktivačný signál sa pohybuje medzi minimálnou a maximálnou hodnotou so stredom v pracovnom bode (viď obr. 6.6) a týka sa to najmä zariadení schopných + aj – zároveň. Okrem toho zmena signálu je spojitá, takže by sme mali uvažovať s kratšou periódou vzorkovania ako 15 minút, pre potreby demonštrácie dynamickej optimalizácie v tejto práci to však bolo dostatočné.

# Záver

---

V tejto práci sme predstavili pomerne nový koncept agregátora a uviedli ho do prostredia energetiky. Vysvetlili sme princípy fungovania energetického sektora, možnosti vstupu nekonvenčných prístupov a možné smerovanie do budúcnosti, ktoré bude ovplyvnené najmä rastúcim záujmom o obnoviteľné zdroje a zvýšený dopyt po flexibilitate.

Venovali sme sa aj optimalizačnej teórii, pretože tá je kľúčom k riadeniu veľkého množstva distribuovaných zdrojov flexibility. V praktickej časti sme modelovali rozličné typy obmedzení podľa individuálnych požiadaviek reálnych zariadení zaradených do súboru zdrojov. Sformulovali sme problém zmiešaného celočíselného programovania a riešenie nechali na príslušný solver.

Samotná optimalizácia bola rozdelená na dve časti, statická predchádza dynamickej. V statickej optimalizácii nás viac ako konkrétne riešenie usporiadania zaujímala hodnota výkonu, ktorú dokáže nesúrodá zmes zariadení poskytnúť. Konkrétne usporiadanie a výber zariadení je úloha dynamickej optimalizácie, ktorá sa prispôbuje premenlivej aktuálnej požiadavke.

Ciele sme naplnili, výsledky sú vzhľadom na rozsiahlosť problému uspokojivé a v diskusii sme vysvetlili, prečo je model dobrý a ako by mohol byť ešte presnejší. Zohľadňuje všetky vytýčené obmedzenia a napriek výpočtovej zložitosti sme dospeli k riešeniu, ktoré je rozobrané v poslednej kapitole.

Optimalizácia súboru je jedným z mnohých nevyhnutných krokov k prevádzke agregátora alebo virtuálnej elektrárne. Verím, že aj táto práca bude prínosná v procese realizácie takéhoto konceptu a prispeje k modernizácii v energetickom priemysle.



# Literatúra

---

- [1] Smernica Európskeho parlamentu a Rady (EÚ) 2019/944 z 5. júna 2019 o spoločných pravidlách pre vnútorný trh s elektrinou a o zmene smernice 2012/27/EÚ. *Úradný vestník*.
- [2] Vyhláška Ministerstva životného prostredia Slovenskej republiky č. 411/2012 Z.z. o monitorovaní emisií zo stacionárnych zdrojov znečisťovania ovzdušia a kvality ovzdušia v ich okolí. *Zbierka zákonov Slovenskej republiky*.
- [3] A. Beltramin. Modern branch-and-cut solvers for mixed-integer linear programming: a computational comparison. 2015.
- [4] F. Birol. Key world energy statistics. *International Energy Agency*, 2017.
- [5] S. Boyd and L. Vandenberghe. *Convex Optimization*. Cambridge University Press, New York, USA, 7th edition, 2009.
- [6] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, and Y. Ding. Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in natural science*, 19(3):291–312, 2009.
- [7] N. Damsgaard, G. Papaefthymiou, K. Grave, J. Helbrink, V. Giordano, and P. Gentili. Study on the effective integration of distributed energy resources for providing flexibility to the electricity system. *Tech. Rep. 54697590000*, 2015.
- [8] B. Dunn, H. Kamath, and J.M. Tarascon. Electrical energy storage for the grid: a battery of choices. *Science*, 334(6058):928–935, 2011.
- [9] D. Hlubeň, R. Stolárik, and Š. Vaško. Kvalita elektrickej energie podľa platných STN. *Elektroenergetika*, 5(2), 2012.
- [10] M. Jünger, G. Reinelt, and G. Rinaldi. The traveling salesman problem. *Handbooks in operations research and management science*, 7:225–330, 1995.

- 
- [11] B. Knueven, J. Ostrowski, and J.P. Watson. On mixed integer programming formulations for the unit commitment problem. Technical report, Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 2018.
- [12] J. Löfberg. YALMIP : A toolbox for modeling and optimization in MATLAB. In *In Proceedings of the CACSD Conference*, Taipei, Taiwan, 2004.
- [13] B. Meindl and M. Templ. Analysis of commercial and free and open source solvers for linear optimization problems. *Eurostat and Statistics Netherlands within the project ESSnet on common tools and harmonised methodology for SDC in the ESS*, 20, 2012.
- [14] J. Nocedal and S. Wright. *Numerical optimization*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [15] E. Regula. Pumped storage hydro power plant Cierny Vah. *Vodne elektrarne Trencin*, 1998.
- [16] SEPS, a.s. *Individuálna a konsolidovaná výročná správa 2018*.
- [17] SEPS, a.s. *Technické podmienky prístupu a pripojenia, pravidlá prevádzkovania prenosovej sústavy – Dokument A*, 13 edition, 2020.
- [18] SEPS, a.s. *Technické podmienky prístupu a pripojenia, pravidlá prevádzkovania prenosovej sústavy – Dokument B*, 17 edition, 2020.
- [19] D. A. Spielman and S.H. Teng. Smoothed analysis of algorithms: Why the simplex algorithm usually takes polynomial time. *Journal of the ACM (JACM)*, 51(3):385–463, 2004.
- [20] L. A. Wolsey and G. L. Nemhauser. *Integer and combinatorial optimization*, volume 55. John Wiley & Sons, 1999.