



F3

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrotechnologie**

Bakalářská práce

Úložiště elektrické energie s využitím gravitační energie

František Šup

2023

Vedoucí práce: prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šup** Jméno: **František** Osobní číslo: **494712**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Úložiště elektrické energie s využitím gravitační energie

Název bakalářské práce anglicky:

Electrical Energy Storage Using Gravity Energy

Pokyny pro vypracování:

1. Shrňte poznatky z literatury o využití gravitační potenciální energie pro mechanická úložiště elektrické energie.
2. Navrhněte model úložiště elektrické energie s využitím gravitační potenciální energie. Model je vytvořený motor/generátorem, seismickou hmotou a mechanismem pro zvedání a spouštění této hmoty. Pro řízení motor/generátoru navrhněte jednoduchou elektroniku. Navržený model realizujte.
3. Změňte elektrické parametry realizovaného systému, navrhněte možná vylepšení pro zvýšení ukládané energie.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Nasrullah Khan, Saad Dilshad, Rashida Khalid, Ali Raza Kalair, Naeem Abas, Review of energy storage and transportation of energy, 18 March 2019
- [2] Akshat Rathi, Stacking concrete blocks is a surprisingly efficient way to store energy, <https://qz.com/1355672/stacking-concrete-blocks-is-a-surprisingly-efficient-way-to-store-energy/>
- [3] Michael Molitch-Hou, Are Gravitational Batteries the Solution to Grid Power Storage

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

prof. Ing. Miroslav Husák, CSc. katedra mikroelektroniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **03.02.2023** Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2024**

prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování / Prohlášení

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce, prof. Miroslavu Husákovi za jeho přístup a cenné rady.

Zároveň bych chtěl poděkovat i panu Miroslavu Horníkovi za výraznou pomoc při konstrukci modelu.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 26.5.2023

.....

Abstrakt / Abstract

Tato práce se věnuje úložištím elektrické energie s využitím gravitační energie.

V první části jsou popsány současně používané technologie a nové koncepty gravitačních úložišť. U každého typu jsou zmíněny jejich parametry a výhody/nevýhody.

V druhé části práce je navrhnout a zkonstruován jednoduchý model gravitačního úložiště. Jeho výsledky jsou porovnány s možnými dosažitelnými a je provedeno zhodnocení.

Klíčová slova: Úložiště energie, gravitační úložiště energie, návrh gravitačního úložiště, ČVUT FEL

This work focuses on electricity storage using gravitational energy.

In the first part, currently used technologies and new concepts of gravity storage are described. For each type their parameters and advantages/disadvantages are mentioned.

In the second part of the thesis, a simple gravity storage model is designed and constructed. Its results are compared with the possible achievable ones and an evaluation is made.

Keywords: Energy storage, gravity energy storage, gravity storage design, CTU FEE

Title translation: Electricity storage using gravitational energy

Obsah /

1 Úvod	1
2 Teoretický základ	2
2.1 Gravitační potenciální energie . . .	2
2.2 Přeměna potenciální energie na elektrickou a zpět	2
2.2.1 Stejnoseměrný stroj	2
2.2.2 Asynchronní stroj	3
2.2.3 Synchronní stroj	4
3 Dnešní využití gravitační potenciální energie pro úložiště elektrické energie	5
3.1 Přecherčpávací vodní elektrárny . . .	5
3.1.1 Princip	6
3.1.2 Konstrukce	6
3.1.3 PVE v ČR a ve světě	7
4 Koncepty budoucího využití gravitačních úložišť	9
4.1 Energy Vault	9
4.1.1 Koncept	9
4.1.2 Demonstrační projekt . . .	10
4.2 Gravitricity	11
4.2.1 Koncept	11
4.2.2 Demonstrační projekt . . .	12
4.3 Gravity Power	12
4.3.1 Koncept	12
4.3.2 Demonstrační projekt . . .	13
4.4 Gravity Storage	13
4.4.1 Koncept	13
4.4.2 Demonstrační projekt . . .	14
4.5 GravityLine	14
4.5.1 Koncept	14
4.5.2 Demonstrační projekt . . .	14
4.6 Srovnání	16
5 Simulace modelu úložiště	17
5.1 Popis simulace	17
5.2 Výsledek simulace	18
6 Konstrukce modelu úložiště	20
6.1 Motor	20
6.2 Převodovka	20
6.3 Naviják	21
6.4 Závaží	22
6.5 Řízení	22
7 Měření	24
8 Závěr	27

Literatura

28

Tabulky / Obrázky

3.1	Účinnost PVE	6
3.2	PVE v ČR	7
3.3	PVE ve světě	8
4.1	Srovnání gravitačních úložišť ..	15
6.1	Vlastnosti motoru PG520.....	20
7.1	Vypočtené hodnoty pro zvedání a spouštění závaží	26
3.1	Podíl jednotlivých typů úložišť energie	5
3.2	Uspořádání PVE	7
4.1	Princip úložiště Energy Vault .	10
4.2	Nový koncept úložiště Energy Vault	10
4.3	Princip úložiště Gravitricity ...	11
4.4	Princip úložiště Gravity Power	12
4.5	Úložiště Gravity Storage.....	13
4.6	Úložiště Gravity Line	14
5.1	Schéma simulace	18
5.2	Graf simulace.....	19
6.1	Charakteristiky motoru PG520	21
6.2	Realizovaný model – motor, převodovka a naviják	21
6.3	Schéma zapojení	23
6.4	Realizovaný model – elektrické zapojení	23
7.1	Průběh příkonu v režimu motoru	24
7.2	Průběh napětí v režimu generátoru	25
7.3	Průběh proudu v režimu generátoru	25
7.4	Průběh výkonu v režimu generátoru	26

Kapitola 1

Úvod

V elektrizační soustavě musí být neustále rovnováha mezi vyrobenou a spotřebovanou elektrickou energií. Kvůli proměnnému odběru spotřebiteli a nestálou dodávkou intermitentními obnovitelnými zdroji energie, které získávají stále větší podíl, je nutná neustálá regulace výkonu. Ta je v současné době uskutečňována především vodními akumulacími elektrárnami, přečerpávacími elektrárnami a plynovými elektrárnami. V blízké budoucnosti již ale nebudou současné možnosti akumulace dostačující a bude nutná výstavba nových. Stavby nových přečerpávacích elektráren jsou dnes téměř vyloučeny kvůli absenci míst s vhodným terénem a současnou nutností velkého zásahu do krajiny, a proto jsou vyvíjeny jiné způsoby akumulace, mezi které patří i gravitační úložiště, o kterých pojednává tato práce.

V první části této práce je shrnut současný stav technologie gravitačních úložišť. Pojednává se zde o již dlouholeté technologii přečerpávacích vodních elektráren, stejně tak i o nových konceptech, které jsou nyní ve fázi vývoje.

Druhá část práce se zabývá simulací, návrhem a konstrukcí vlastního modelu gravitačního úložiště. Na něm jsou testovány jeho parametry (především celková účinnost), a zda je tento koncept realizovatelný i mimo laboratoř.

Kapitola 2

Teoretický základ

2.1 Gravitační potenciální energie

Podstata gravitačních úložišť spočívá ve zvedání hmoty v tíhovém poli Země. Tudíž při ukládání energie dochází ke zvyšování potenciální energie E_p zvedaného materiálu a při spuštění hmoty dolů se potenciální energie snižuje a přeměňuje se na požadovanou jinou energii, v našem případě elektrickou.

Gravitační potenciální energie je jedním z druhů mechanické energie, tudíž vyjadřuje schopnost tělesa (v našem případě zvedané hmoty) konat práci. Obecně je potenciální energie E_p v gravitačním poli Země určena vztahem (2.1) [1].

$$E_p = -G \cdot \frac{m \cdot M_Z}{r} \text{ [J] , kde} \quad (2.1)$$

- G je gravitační konstanta [$\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$]
- m je hmotnost tělesa [kg]
- M_Z je hmotnost Země [kg]
- r je vzdálenost od středu gravitačního působení [m]

Jelikož uvažujeme probíhání celého děje na povrchu Země v nízké výšce, lze vztah (2.1) zjednodušit na (2.2) [1], přičemž tento vztah je praktičtější pro výpočty v blízkosti Zemského povrchu, a navíc respektuje odstředivou sílu vzniklou otáčením Země kolem své osy.

$$E_p = m \cdot g \cdot h \text{ [J] , kde} \quad (2.2)$$

- m je hmotnost tělesa [kg]
- g je tíhové zrychlení (v našich podmínkách uvažujeme $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$)
- h je výška nad nulovou hladinou (většinou povrch Země) [m]

2.2 Přeměna potenciální energie na elektrickou a zpět

K přeměně mechanické energie na energii elektrickou, popřípadě opačně se využívají točivé elektrické stroje. Jsou to stroje stejnosměrné, asynchronní a synchronní. V následujících sekcích jsou popsány jejich konstrukce, principy fungování, charakteristiky a také jejich výhody a nevýhody.

2.2.1 Stejnosměrný stroj

Stejnosměrný stroj je točivý elektrický stroj, který je napájený stejnosměrným zdrojem napětí, popřípadě, v režimu dynamo, se sám stává zdrojem stejnosměrného napětí. Skládá se z buzení (tvořeno buď budícím vinutím nebo permanentními magnety), rotoru (tvořeným rotorovým vinutím rozloženým po vnějším obvodu do uzavřeného vinutí a vyvedené na komutátor, rotor se zde nazývá i kotva) a komutátoru (zajišťuje plynulé

přepínání vodičů tak, aby byl při stejnosměrném napájení pod každým pólem stále stejný smysl proudu).

V režimu motoru působí na jednotlivé vodiče síla $F_m = B \cdot l \cdot i$, přičemž je díky komutátoru stále stejná polarita proudu, tudíž uvedená síla působí stále ve stejném smyslu a roztáčí motor. V režimu dynama se vlivem otáčení rotoru v jeho vodičích indukuje napětí $U_i = B \cdot l \cdot v$, které má díky komutaci stále stejnou polaritu a na výstupu je stejnosměrné napětí.

Pro popis stejnosměrného stroje jsou důležité rovnice (2.3), (2.4) a (2.5), které popisují vztahy mezi veličinami používanými pro tento typ elektrického stroje.

$$U = U_i \pm R \cdot I, \text{ kde} \quad (2.3)$$

- U je napětí na svorkách [V]
- U_i je indukované napětí [V]
- R je odpor kotvy [Ω]
- I je proud kotvou [A]
- pro motorový režim je znaménko +, pro režim dynama je znaménko -

$$U_i = k \cdot \Phi \cdot \Omega, \text{ kde} \quad (2.4)$$

- U_i je indukované napětí [V]
- k je konstanta stroje [-]
- Φ je budící magnetický tok [Wb]
- Ω je mechanická úhlová rychlost stroje [s^{-1}]

$$M = k \cdot \Phi \cdot I, \text{ kde} \quad (2.5)$$

- M je elektromagnetický moment [Nm]
- k je konstanta stroje [-]
- Φ je budící magnetický tok [Wb]
- I je proud protékající kotvou [A]

Mezi výhody stejnosměrných strojů patří relativní jednoduchost, univerzálnost, jednoduchá široká plynulá regulace rychlosti a dostupnost od nejmenších výkonů (zlomky Wattů) do řádově MW. Právě pro jednoduché ovládání použijeme stejnosměrný stroj v našem modelu.

Jedna z nevýhod stejnosměrných strojů je nižší účinnost, než mají stroje střídavé. Zdaleka největší nevýhodou je ale nutnost využívání komutátorů. Je to totiž nejvíce namáhaná a technologicky nejsložitější část stroje, která potřebuje pravidelnou údržbu [2].

■ 2.2.2 Asynchronní stroj

Asynchronní stroj patří k točivým strojům napájených ze střídavých zdrojů napětí, většinou rovnou ze sítě. Skládá se ze statorového vinutí, které při napájení harmonickým souměrným trojfázovým proudem vytváří točivé magnetické pole o synchronní úhlové rychlosti ω_1 podle vzorce (2.6). Rotor je tvořen vinutím (většinou klecovým), ve kterém se vlivem točivého magnetického pole indukují napětí a proudy, jejichž působením proti poli statoru vzniká moment, který točí rotorem. Jednou z nejdůležitějších veličin používaných při popisu asynchronního stroje je skluz s , který je definovaný vztahem (2.7).

$$\omega_1 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p_p} [s^{-1}], \text{ kde} \quad (2.6)$$

- f_1 je napájecí frekvence [s^{-1}]
- p_p je počet pólů stroje [-]

$$s = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} [-], \text{ kde} \quad (2.7)$$

- ω_1 je úhlová rychlost točivého pole, též synchronní rychlost [s^{-1}]
- ω je úhlová rychlost rotoru [s^{-1}]

Pro moment M asynchronního stroje platí vztah (2.8).

$$M = \frac{3}{\omega_1} \cdot \frac{R'_2}{s} \cdot \frac{U_1}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2} [\text{Nm}], \text{ kde} \quad (2.8)$$

- ω_1 je úhlová rychlost točivého pole [s^{-1}]
- s je skluz [-]
- U_1 je napájecí napětí [V]
- R_1 je odpor statoru [Ω]
- R'_2 je přepočtený odpor rotoru [Ω]
- X_1 je rozptylová reaktance statoru [Ω]
- X'_2 je přepočtená rozptylová reaktance rotoru [Ω]

Výhody asynchronních strojů jsou především levná výroba, spolehlivost a minimální údržba. Z těchto důvodů jsou nejrozšířenější elektrické motory v současnosti asynchronní. Používají se hlavně jako levné a jednoduché pohony zařízení, které nemají požadavek na výraznou regulaci rychlosti.

Mezi jejich nevýhody patří obtížná regulace rychlosti, velký proudový náraz při spouštění, příliš nízký induktivní účinník a obtížné fungování jako generátor v ostrovním režimu [2]. Nejen z těchto důvodů není tento typ stroje pro náš model příliš vhodný.

2.2.3 Synchronní stroj

Synchronní stroj je točivý elektrický stroj, který se nejčastěji používá jako trojfázový generátor, méně často jako motor, především pro velké výkony. Skládá se z rotoru, na kterém je navinuté budicí vinutí (pro malé výkony je možné nahradit budicí vinutí permanentními magnety), které je napájeno stejnosměrně. Na statoru se nachází statorové vinutí, tvořené třemi cívkami, které jsou vzájemně natočené o 120° . V motorovém i generátorovém režimu platí, že magnetické pole vytvořené proudem ve statoru má neustále stejnou rotor, proto se tento typ stroje nazývá synchronní. Pro frekvenci f napětí ve statoru platí vztah (2.9).

$$f = \frac{p_p \cdot n}{60} [s^{-1}], \text{ kde} \quad (2.9)$$

- p_p je počet pólů [-]
- n je rychlost rotoru [ot/min]

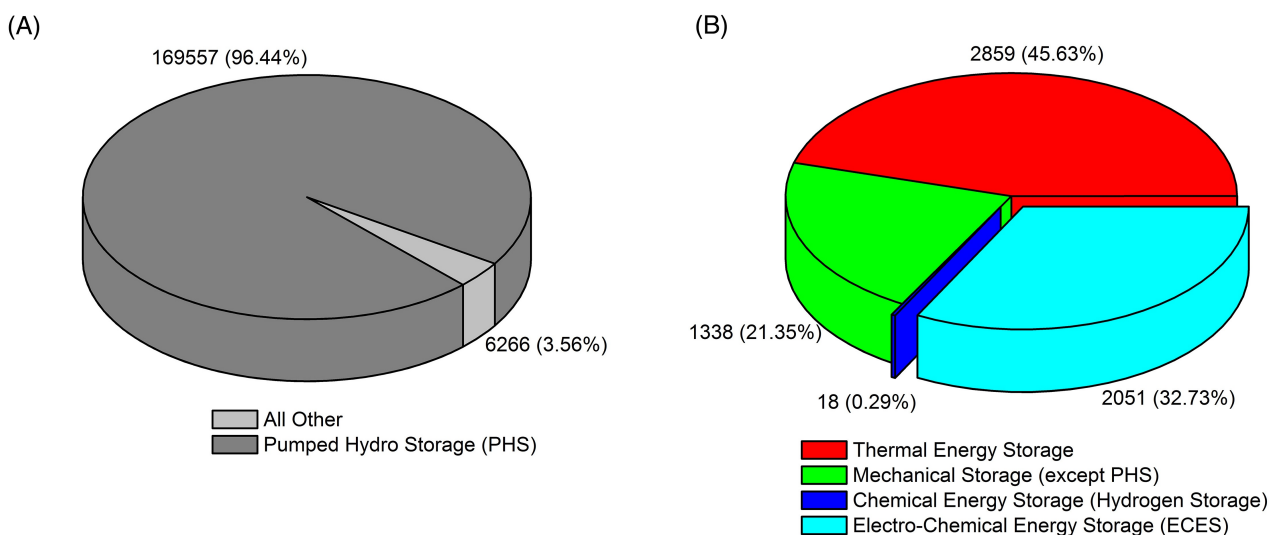
Hlavní výhodou synchronních strojů je možnost dosažení velkých výkonů až 1000 MW, kdy mají velmi vysokou účinnost (až 98,8 %) a nízké náklady. Další výhodou je možnost snadné regulace jalového výkonu pomocí změny budicího proudu. Díky těmto vlastnostem je drtivá většina elektrických generátorů synchronní.

Největší nevýhodou je obtížné spouštění, kdy je nutné stroj přifázovat k síti. Další nevýhody jsou potřeba zvláštního zdroje pro buzení a obtížné řízení rychlosti [2]. Kvůli těmto vlastnostem není tento typ stroje vhodný pro náš model.

Kapitola 3

Dnešní využití gravitační potenciální energie pro úložiště elektrické energie

Podle údajů z roku 2019 [3] je 96,44 % instalovaného výkonu úložišť energie tvořeno vodními přečerpávacími elektrárnami. Zbýlý podíl je zastoupen úložišti tepelnými, elektrochemickými (bateriová úložiště), mechanickými (zde v grafu jsou uvažovány pouze technologie ukládání energie pomocí stlačeného vzduchu a pomocí setrvačnicků) a chemickými (především vodík). Gravitační úložiště jsou dnes tudíž tvořeny výhradně vodními přečerpávacími elektrárnami. Existují již také dva k síti připojené prototypy nových technologií gravitačních úložišť (jeden od firmy Energy Vault, druhý od Gravitricity), ty ale slouží především k testovacím účelům a budeme se jim věnovat až v kapitole 4.



Obrázek 3.1. Instalovaný výkon v MW a podíl v % jednotlivých typů úložišť energie [3]

3.1 Přečerpávací vodní elektrárny

Přečerpávací vodní elektrárny (dále PVE) jsou nejstarší a v současnosti nejrozšířenější akumulární prvek v elektrizační soustavě. První zařízení tohoto typu bylo uvedeno do provozu v roce 1898 v železárnách Klus ve Švýcarsku. První PVE, která sloužila již k energetickému zásobování, byla postavená také ve Švýcarsku roku 1904 v Ruppoldingenu s turbínovým výkonem 1,3 MW [4], nicméně největší rozvoj PVE probíhal v druhé polovině minulého století, kdy bylo postaveno největší množství jaderných elektráren, a PVE sloužily k vyrovnávání poptávky po elektřině. V současnosti význam PVE stoupá, z důvodu připojování velkého množství intermitentních obnovitelných zdrojů energie (dále OZE) do sítě (především solární a větrné elektrárny), které mají vysoce nestabilní charakter výroby, který je silně závislý na počasí. Tudíž je nutno tímto způsobené výkyvy vyrovnávat, k čemuž jsou PVE ideální.

3.1.1 Princip

Princip PVE spočívá ve využití dvou nádrží (horní a dolní). V době, kdy je v elektrizační soustavě přebytek výkonu z OZE nebo nízká spotřeba (v noci) a cena elektřiny je tudíž nižší než obvykle, pracuje PVE v čerpadlovém režimu a plní horní nádrž. Tímto způsobem se uloží energie ve formě potenciální energie vody. V období špičkového zatížení elektrizační soustavy nebo při nedostatečné výrobě elektřiny z OZE, kdy je cena elektřiny nejvyšší, pracuje PVE v turbínovém režimu, kdy vyrábí elektrickou energii vypouštěním vody z horní nádrže přes turbínu. Účinnost celého procesu se pohybuje od 75 do 80 %, viz Tab. 3.1.

	minimální [%]	maximální [%]
<i>Generování</i>		
Přivaděče	97,40	85,50
Vodní turbína / Čerpadlo	91,50	92,00
Generátor / Motor	98,50	99,00
Transformátor	99,50	99,70
Mezisoučet	87,35	89,44
<i>Čerpání</i>		
Přivaděče	97,60	98,50
Vodní turbína / Čerpadlo	91,60	92,50
Generátor / Motor	98,70	99,00
Transformátor	99,50	99,80
Mezisoučet	87,80	90,02
Efektivita provozu	98,00	99,50
Celková účinnost	75,15	80,12

Tabulka 3.1. Minimální a maximální účinnost přečerpávací vodní elektrárny [5]

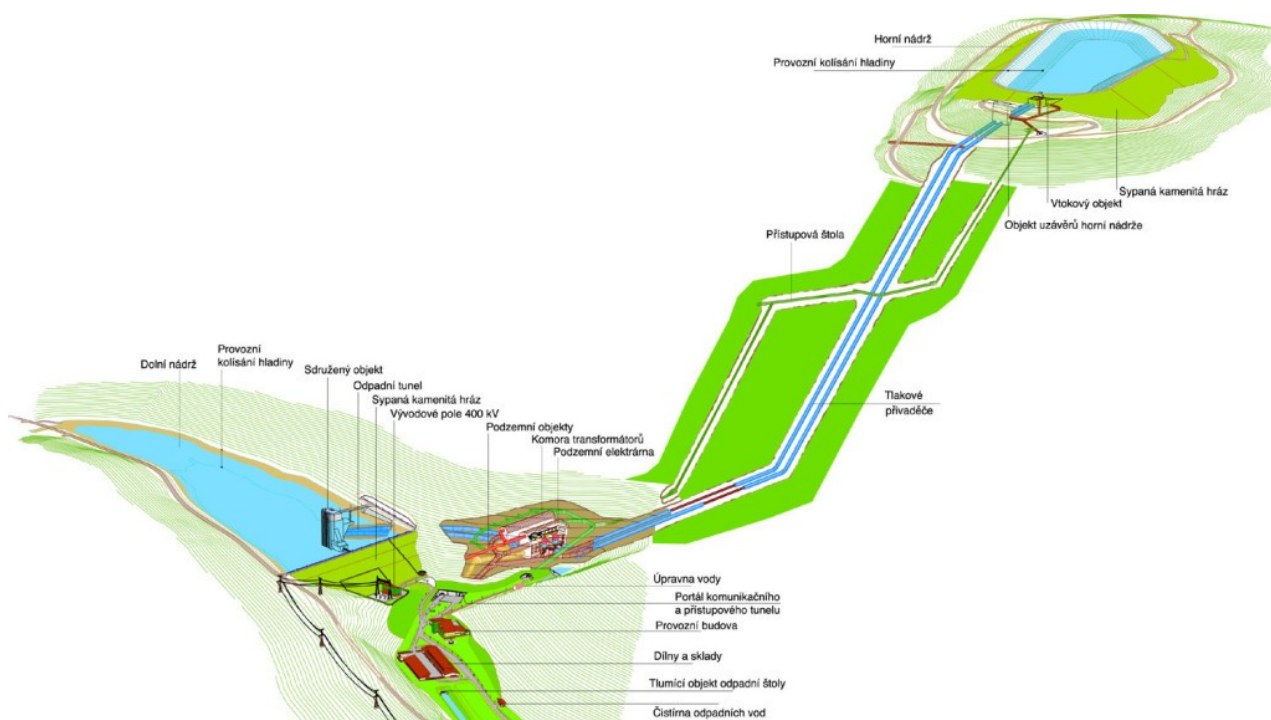
3.1.2 Konstrukce

Celá přečerpávací vodní elektrárna je tvořena několika hlavními částmi, jejichž uspořádání můžeme vidět na příkladu konkrétní PVE Dlouhé Stráně na Obr. 3.2.

Horní akumuláční nádrž může být buď umělá, vytvořená hloubením a přehrazením úžlabí, nebo přirozená. Dolní akumuláční nádrž může rovněž být buď umělá nebo vytvořená říčními zdržemi. Dle použitého materiálu lze nádrže rozdělit na zděné: z lomového zdiva, betonové gravitační nebo klenbové a železobetonové klenuté. Také mohou být zemní, a to buď hlinité nebo balvanité.

Tyto nádrže jsou mezi sebou spojeny přivaděči, které jsou většinou umístěné v podzemí ve formě tlakových šachet nebo vylámány ve skále. Ve zvláštních případech mohou být vedeny po povrchu jako ocelová potrubí.

Další částí PVE je turbína a čerpadlo (popřípadě turbínové čerpadlo u dvoustrojového provedení). Slouží pro přenos potenciální a kinetické energie vody do rotačního pohybu turbíny, která v turbínovém provozu pohání generátor. V případě čerpadlového provozu slouží k čerpání vody do horní nádrže, přičemž je motorgenerátorem v režimu motoru. Existuje několik typů turbín, přičemž každá je vhodná pro jiné spády. První skupinou jsou přetlakové turbíny, které využívají potenciální i kinetickou energii vody. Patří mezi ně Kaplanova turbína (spád 10 – 80 m) a Francisova turbína (spád



Obrázek 3.2. Uspořádání přečerpávací vodní elektrárny Dlouhé Stráně [6]

50 – 800 m). Pro tento typ se používá dvoustrojové uspořádání (motorgenerátor – turbínové čerpadlo). Do druhé skupiny patří rovnotlaké turbíny, mezi které patří Peltonova turbína (15 – 1800 m). V tomto případě se využívá uspořádání třístrojové (turbína – motorgenerátor – čerpadlo).

Motorgenerátor je synchronní stroj s vyniklými póly (hydrostroj), který dokáže pracovat v motorovém i generátorovém režimu. Jelikož je hodnota síťové frekvence 50 Hz, jsou synchronní otáčky dvoupólového stroje rovny 3000 ot/min, což je pro generování elektřiny z vodní energie příliš vysoká hodnota. Proto se podle vztahu (2.9) použije vyšší počet pólových dvojic, což umožní vhodné podmínky pro chod.

3.1.3 PVE v ČR a ve světě

V České republice bylo vybudováno celkem pět PVE (PVE Černé jezero, PVE Pastviny, PVE Štěchovice, PVE Dalešice a PVE Dlouhé stráně), nicméně první dvě z nich již v současnosti nejsou v provozu [7].

	Rok spuštění	Výkon [MW]	Turbínový spád [m]	Doba náběhu [s]
Dlouhé stráně	1996	650	534	100
Štěchovice	1947	45	219	100
Dalešice	1978	480	90	55

Tabulka 3.2. České přečerpávací vodní elektrárny [7]

V současnosti jsou v ČR v provozu tři PVE, viz 3.2, přičemž tyto elektrárny tvoří nezastupitelnou roli ve stabilizaci zdejší elektrizační soustavy.

Celosvětově je podle údajů z roku 2022 instalovaný výkon všech přečerpávacích vodních elektráren 165 GW (přičemž za poslední rok se připojily k síti nové PVE o výkonu 4,7 GW). Z toho je kupříkladu 55 GW tvořeno Evropou. Z jednotlivých států má

	Země	Výkon [MW]	Kapacita [MWh]
Fengning Pumped Storage Power Station	Čína	3600	40000
Bath County Pumped Storage Station	USA	3003	24000
Okutataragi Pumped Storage Power Station	Japonsko	1932	15546
Grand'Maison Dam	Francie	1800	34800

Tabulka 3.3. Nejvýznamnější přečerpávací vodní elektrárny [9]

největší zastoupení Čína s 36 GW, kde navíc plánují do roku 2030 zvýšit výkon PVE až na 120 GW [8]. Jedny z největších PVE jsou uvedeny v tab. 3.3.

Kapitola 4

Koncepty budoucího využití gravitačních úložišť

V současnosti je v různých fázích vývoje několik projektů, které se zabývají novými možnostmi využití gravitační energie jako formy energetického úložiště [10]. Využívají přitom výhody jednoduchého principu přeměny elektrické energie do potenciální energie, podobně jako přečerpávací vodní elektrárny, kdy pomocí motoru/generátoru zvedají/spouštějí různými způsoby velmi hmotné závaží. Tím jsou schopny uložit množství energie podle známého vztahu (2.2).

Díky svojí konstrukci by měly mít dobu životnosti podobnou jako současné PVE (tedy vyšší desítky let) na rozdíl od krátké životnosti jiných alternativ, jako například elektrochemické akumulátory (maximálně jednotky tisíc nabíjecích cyklů). Současně mají ale také nízkou energetickou hustotu, tudíž jsou vhodné pouze ve velkém měřítku, což je pravděpodobně jejich největší nevýhoda.

Jelikož je na jejich výstupu točivý stroj, mohou také poskytovat podpůrné služby, což by vedlo k vyšší stabilitě elektrizační sítě. Současně by mohly být schopné provést start za tmy v případě blackoutu.

V následujících sekcích jsou popsány projekty společností, které se těmito úložišti zabývají.

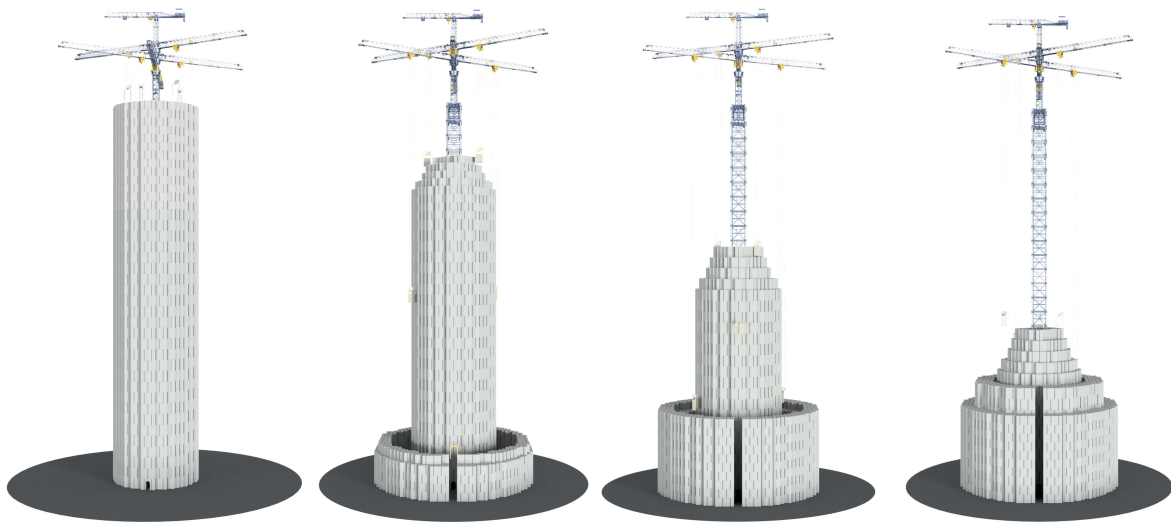
4.1 Energy Vault

Energy Vault je koncept stejnojmenné švýcarské firmy založené v roce 2017. Vytváří dlouhodobé i krátkodobé úložiště energie, nicméně na principu gravitačního úložiště funguje pouze to dlouhodobé, tudíž se budeme v následující části zabývat pouze ním.

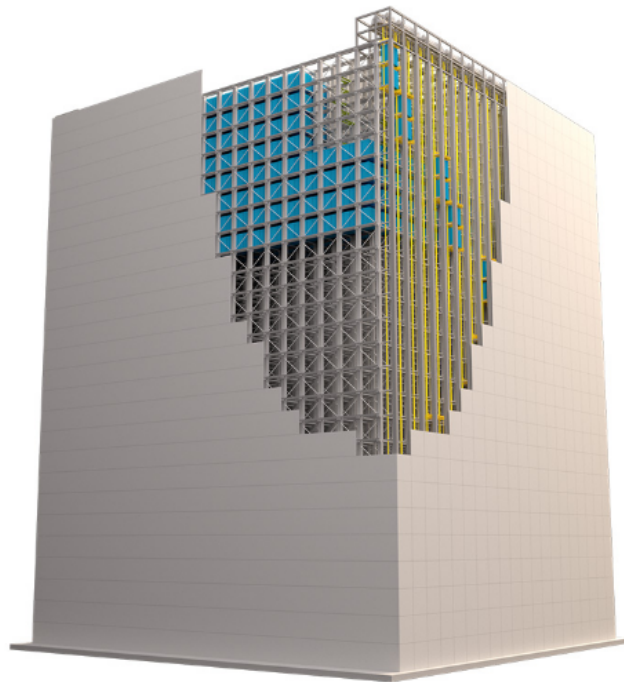
4.1.1 Koncept

Princip původního konceptu spočívá ve využití šestiramenného jeřábu, který při nabíjení zvedá nahoru, respektive při vybíjení spouští dolů betonové kvádry, přičemž je umísťuje do uspořádání zobrazeného na Obr. 4.1. Celá konstrukce měla být 120 m vysoká, jednotlivé betonové bloky měly vážit 35 t a celková kapacita úložiště měla dosahovat až 80 MWh [11]. V současnosti ne tomto konceptu již nepracují, především kvůli příliš velké výšce [12] a nejspíše i komplikovanému provozu.

V současnosti probíhá vývoj nového konceptu, ve kterém se betonové bloky zvedají a horizontálně přemísťují pomocí kolejnic uvnitř pevné konstrukce, viz Obr. 4.2. Tento systém je modulární a skládá se z částí o úložné kapacitě 10 MWh, která se dá po takto velkém kroku navyšovat až do omezení velikostí vhodné plochy pro stavbu. Momentálně je ve fázi konstrukce jedno úložiště tohoto typu stavěné v Číně, které bude dosahovat výkonu 25 MW a kapacity 100 MWh, přičemž je plánovaná stavba úložiště 2 GWh, taktéž v Číně [13].



Obrázek 4.1. Úložiště Energy Vault v různých fázích nabití [14]



Obrázek 4.2. Nový koncept úložiště Energy Vault [13]

■ 4.1.2 Demonstrační projekt

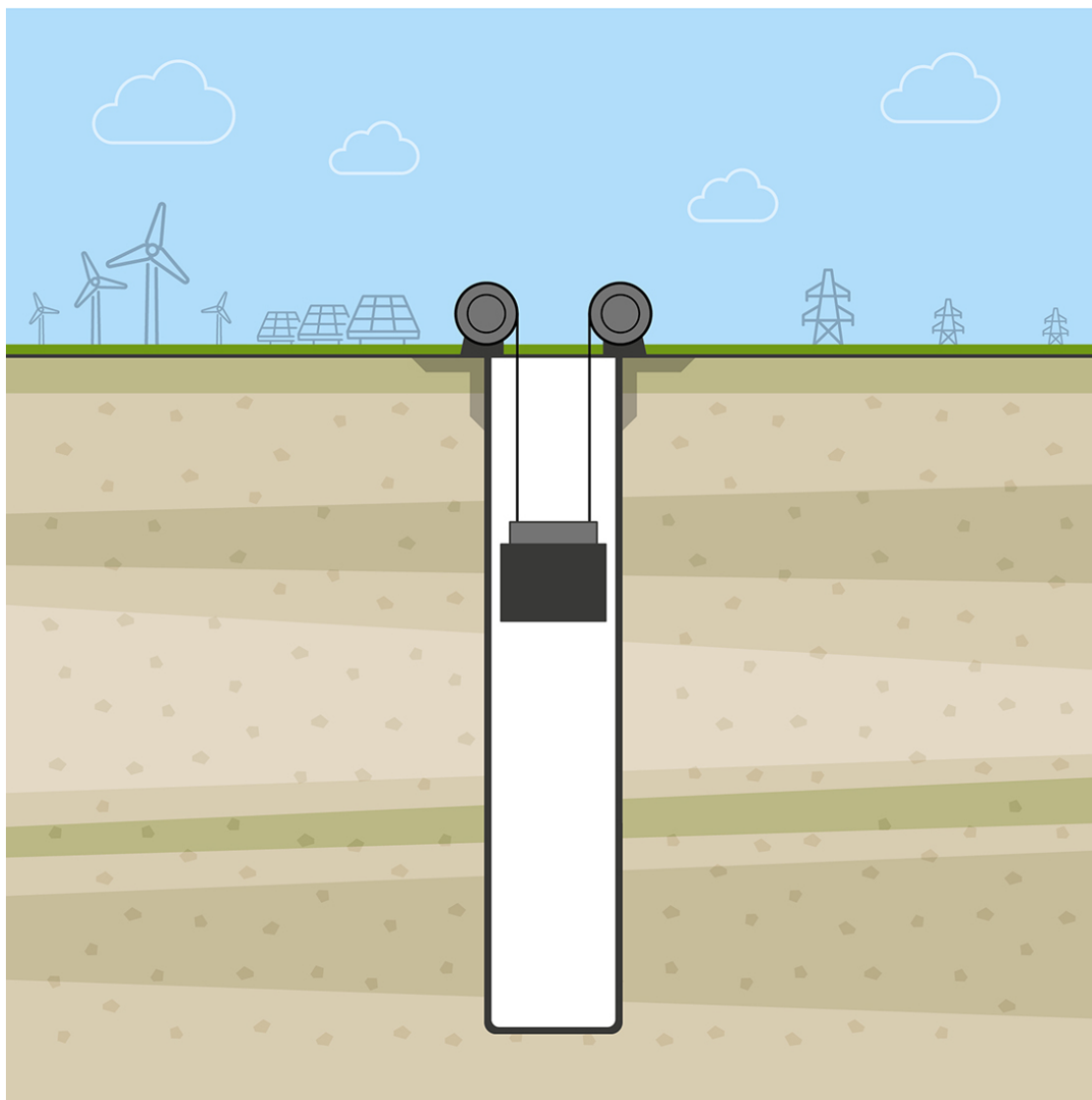
EV1 Commercial Demonstration Unit je demonstrační projekt postavený na původním konceptu, umístěný v Castione ve Švýcarsku [13]. Je postavený v měřítku 1:4 vzhledem k původní plánované velikosti. Zařízení je připojeno ke Švýcarské elektrizační soustavě a podílí se na jeho stabilizaci. Nicméně, jak je zmíněno výše, je to již opuštěný koncept a větší úsilí se věnuje novému systému, viz výše.

4.2 Gravitricity

Firma Gravitricity, založená roku 2011, se zabývá gravitačními úložišti, které využívají staré a nepoužívané hlubinné doly. Na rozdíl od ostatních se specializují spíše na úložiště o menších kapacitách a výkonech.

4.2.1 Koncept

Koncept spočívá ve využití velmi těžkých závaží (až 12000 t), které jsou zavěšeny na soustavě lan, viz Obr. 4.3. Jako maximální hloubka pro spouštění závaží se uvažuje až 750 m (v Africe se ovšem počítá s vybudováním vrtů sloužících přímo k tomuto účelu, které by mohly být hluboké až 2 km), z čehož plyne maximální kapacita přibližně 25 MWh. Současně by měl výkon dosahovat maximálně 20 MW a náběh na plný výkon by měl trvat méně než jednu sekundu [15]. Díky těmto vlastnostem se tento koncept hodí spíše na krátkodobé ukládání v rámci jednoho dne, popřípadě k poskytování služeb výkonové rovnováhy.



Obrázek 4.3. Princip úložiště Gravitricity [15]

4.2.2 Demonstrační projekt

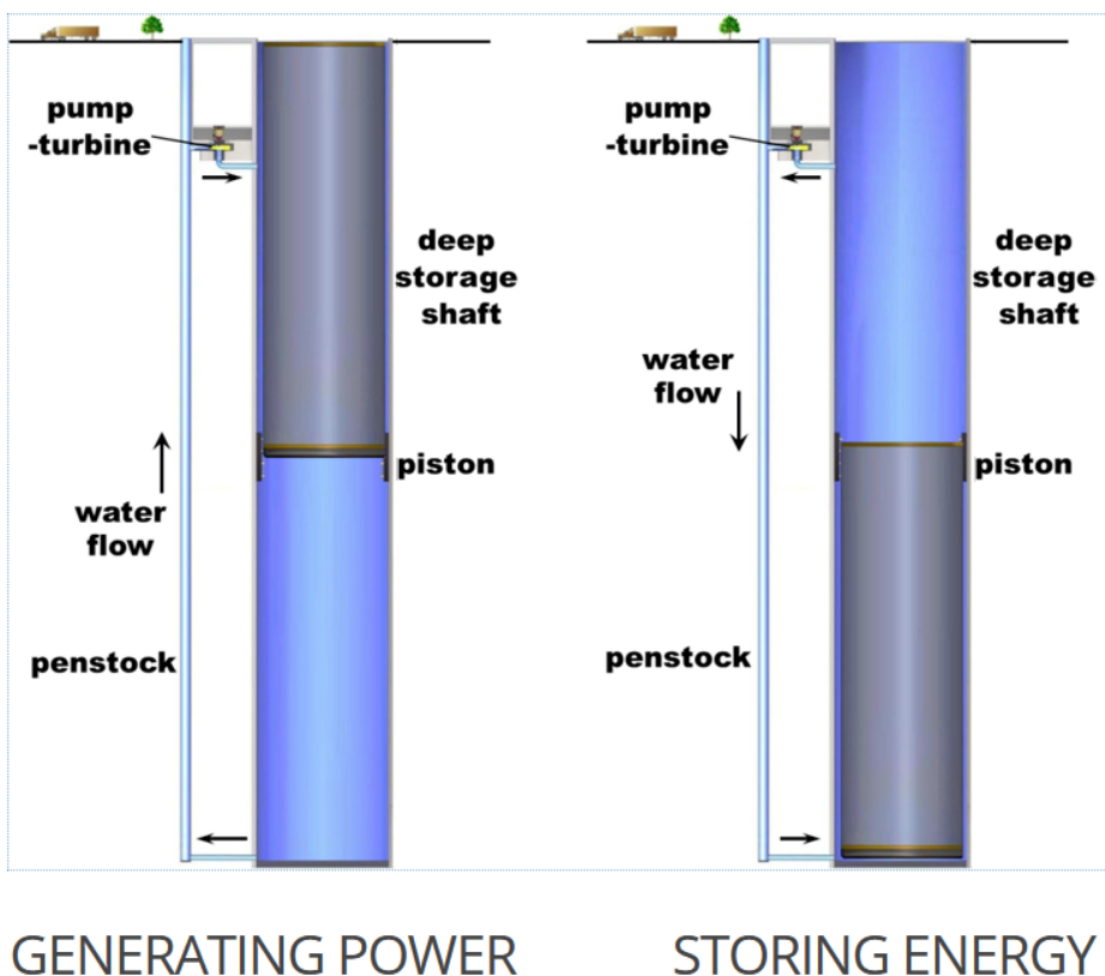
V roce 2021 byl v Edinburghu ve Skotsku postaven, uveden do provozu a připojen k síti první prototyp vysoký 15 m, o výkonu 250 kW a se dvěma závažími o hmotnostech 25 t. V současnosti již probíhají testy, během kterých se ověřuje funkčnost tohoto nového konceptu [16].

4.3 Gravity Power

Firma Gravity Power byla založena roku 2008 v Kalifornii. Specializuje se na vývoj stejnojmenného gravitačního úložiště.

4.3.1 Koncept

Koncept spočívá ve vyhloubení šachty, ve které bude umístěn píst ze zpevněné horniny. Horní a dolní část šachty je propojena potrubím s reverzní Francisovou turbínou a motorgenerátorem. Celé to bude napuštěné vodou a zakryté, aby vznikl uzavřený systém, viz Obr. 4.4. Díky vysoké hmotnosti pístu je možné takto uložit řádově jednotky GWh a dosáhnout výkonu až 800 MW [17].



Obrázek 4.4. Úložiště Gravity Power v různých fázích nabití [18]

Při výrobě elektřiny klesá píst šachtou směrem dolů a vytlačuje vodu potrubím skrz turbínu pohánějící generátor. Při opačném procesu se využívá elektrické energie k pohonu turbíny, ta pracuje v čerpadlovém režimu a tlakem vody vytlačí píst do horní části šachty [19].

4.3.2 Demonstrační projekt

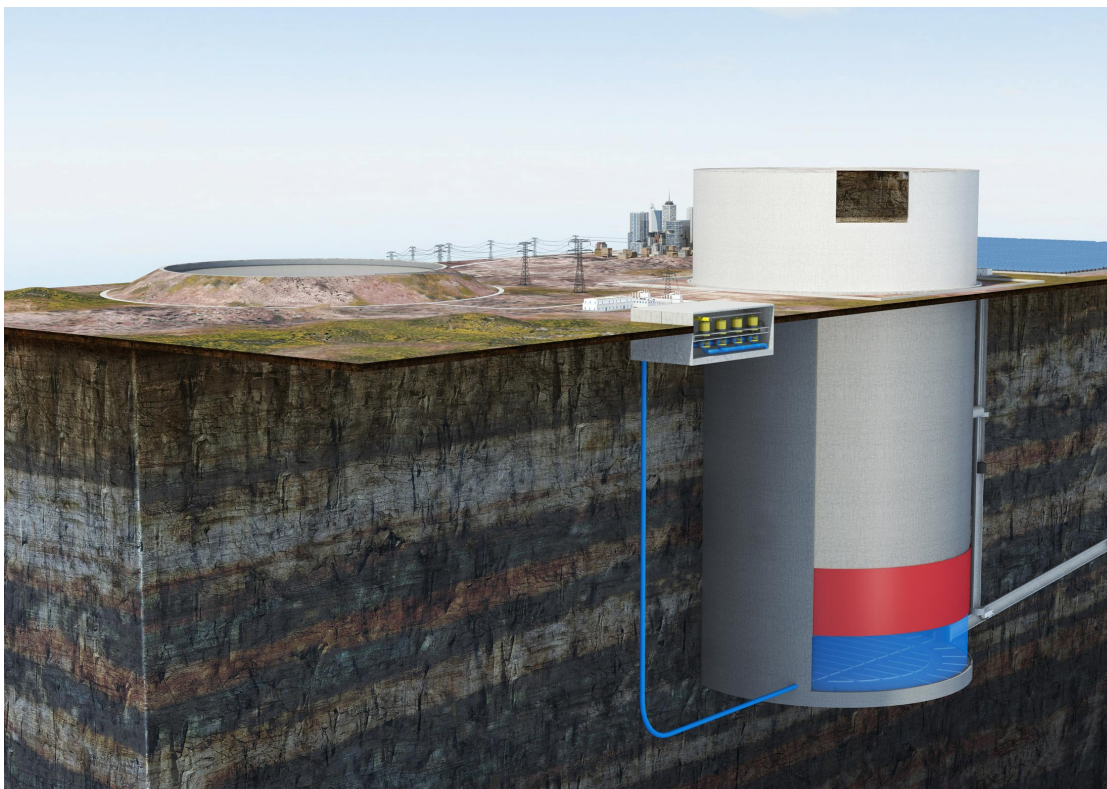
Od roku 2017 probíhá ve Weilheim v Bavorsku ve spolupráci s partnerskou firmou Gravity Energy AG výstavba úložiště o výkonu 1 MW [20]. Novější informace nebyly k nalezení, tudíž je pravděpodobné, že projekt nebude nejspíše dokončen, problémem bude nejspíše nedostatek financí nebo příliš velké komplikace při konstrukci.

4.4 Gravity Storage

Gravity Storage je koncept firmy Heindl Energy založené roku 2014, která byla v roce 2021 prodaná do vlastnictví New Energy Let's Go. Zabývá se vývojem gravitačního úložiště o velmi velkém měřítku.

4.4.1 Koncept

Koncept spočívá ve vytvoření pístu z horniny, který se oddělí od okolních stěn mezerou 2 až 3 metry, tak, aby se mohl pohybovat, viz Obr. 4.5. Mezera se ve vhodném místě vyplní těsněním. Pod takto vzniklý píst je při ukládání energie čerpána voda z horní nádrže, při výrobě elektřiny je voda vytlačována pístem přes turbínu zpět do horní nádrže. Díky velmi velké velikosti pístu (průměr až 250 m, výška je vždy dvojnásobek průměru, maximálně tedy 500 m) je možné dosáhnout úložné kapacity až 8 GWh, což je mnohem více než u ostatních konceptů [21].



Obrázek 4.5. Úložiště Gravity Storage [21]

4.4.2 Demonstrační projekt

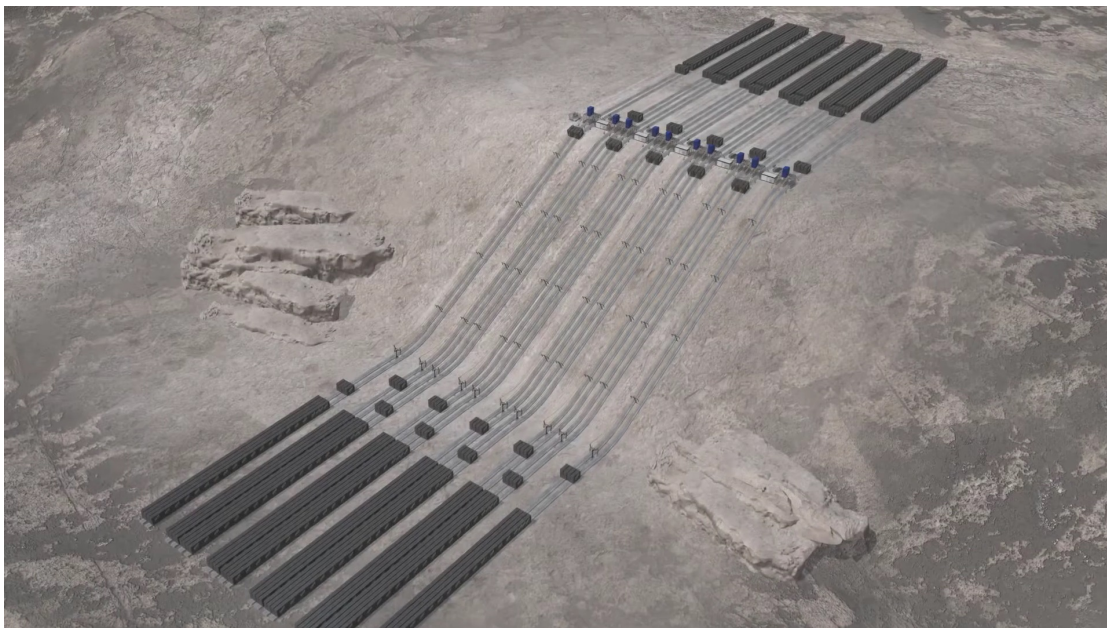
V současnosti žádný demonstrační projekt neprobíhá. Nicméně jistě probíhá výběr vhodné lokality a shánění kapitálu pro množnou výstavbu v následujících letech.

4.5 GravityLine

GravityLine je koncept firmy ARES, založené roku 2010, která se zabývá neobvyklou možností realizace gravitačního úložiště elektřiny.

4.5.1 Koncept

Tento koncept využívá vozy se závažím umístěné na speciální trati, které jsou připojeny k motorgenerátoru pomocí lana nebo řetězu, viz Obr. 4.6. Při ukládání energie jsou tyto vozy vytahovány nahoru, při výrobě elektřiny jsou spouštěny dolů [22]. Výhoda tohoto konceptu spočívá v konstrukční jednoduchosti a absenci potřeby vody. Největší nevýhoda je velmi nízká energetická hustota, a tudíž velká potřebná plocha.



Obrázek 4.6. Úložiště Gravity Line [22]

4.5.2 Demonstrační projekt

V současnosti stojí jeden demonstrační projekt v Tehachapi v Kalifornii. Skládá se z 5,6 tunového vagonu s vlastním pohonem, který je umístěný na 268 m dlouhé trati [23]. Při experimentech bylo mimo jiné zjištěno, že pro vagon s vlastním pohonem je možné použít svah s maximálním sklonem 10° [23]. Z tohoto důvodu by další projekt o výkonu 50 MW umístěný v Nevadě měl použít k manipulaci s vagony lana nebo řetězy [24]. Nicméně stavba projektu začala roku 2020 a v současnosti o něm nejsou žádné novější zprávy než z počátku roku 2021, tudíž nejspíše nebude vůbec dokončen.

	Energy Vault	Gravitricity	Gravity Power	Gravity Storage	GravityLine
Výkon [MW]	2,5 – 500	1 – 20	200 – 800	100 – 1000	5 – 1000
Kapacita [MWh]	10 – 2000	2 – 25	1600 – 3200	1000 – 10000	1 – 250
Umístění	kdekoliv, kde je volná plocha	kdekoliv, ideálně bývalé doly	potřeba pevného podloží, nízká geologická aktivita	potřeba pevného podloží, nízká geologická aktivita	potřeba přírodního svahu
Výhody	modulárnost	malá zastavěná plocha	velmi vysoká kapacita	velmi vysoká kapacita	jednoduchost
Nevýhody	složitá konstrukce, velké množství zvedaných bloků	malá kapacita	nutnost vhodného podloží	nutnost vhodného podloží	velká potřebná plocha

Tabulka 4.1. Srovnání gravitačních úložišť [13], [15], [17], [21], [22]

4.6 Srovnání

V tab. 4.1 vidíme nejdůležitější parametry úložišť zmíněných v této kapitole. Pokud přihlídneme ke skutečnosti, že koncepty Gravity Power, Gravity Storage a GravityLine se pravděpodobně neuskuteční, z důvodů které jsme nastínili výše, vychází jako nejlepší možnost pro dlouhodobé ukládání elektřiny koncept Energy Vault. S ohledem na skutečnost, že již staví komerční 100 MWh úložiště a plánují 2 GWh [13], stane se jistě firma Energy Vault leaderem ve svém oboru, kterému bude prozatím dominovat.

Pro krátkodobé ukládání je ovšem vhodnější koncept Gravitricity, který má výraznou výhodu především v jednoduché konstrukci. Kromě toho nabízí využití starých hlubinných dolů, což bude přínosem pro upadající uhelné regiony.

Kapitola 5

Simulace modelu úložiště

V následujících kapitolách se budeme zabývat simulací a konstrukcí modelu úložiště elektrické energie, na kterém si ověříme funkčnost tohoto konceptu. Důležitá pro nás bude především celková účinnost, jejíž co nejvyšší hodnota je zásadní pro využití úložiště v praxi.

Ještě před samotnou konstrukcí modelu musíme tento model převést do programu MATLAB Simulink, abychom byli schopní odhadnout jeho chování a předem zoptimalizovali jeho řízení. Pro tyto účely využijeme mimo jiné prvky z knihovny Simscape, která obsahuje reálné modely elektrotechnických součástek, díky čemuž bude model pro simulaci téměř shodný s konstruovaným modelem. O těchto odlišnostech se postupně budeme zmiňovat u jednotlivých částí.

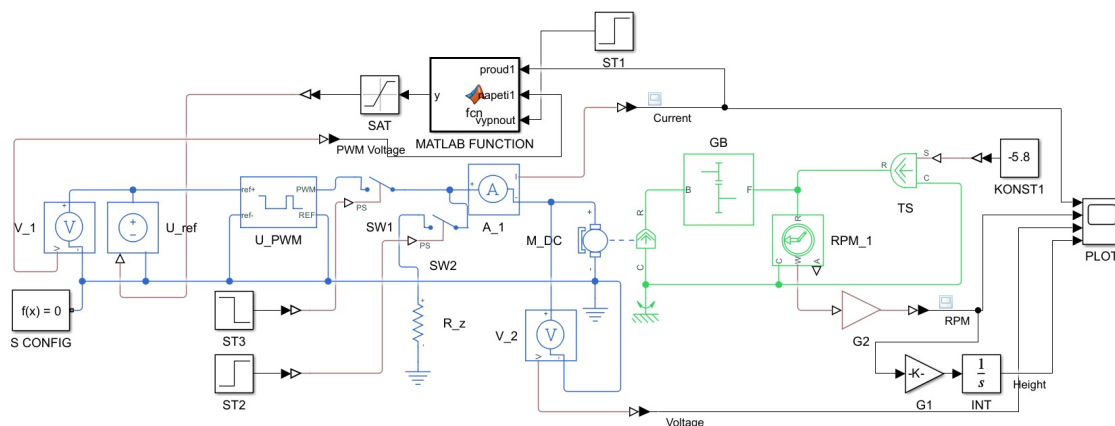
5.1 Popis simulace

Simulovaný model jehož schéma je na Obr. 5.1, se skládá z následujících prvků:

- Napěťové senzory V_1 a V_2 – První z nich slouží jako zdroj vstupní hodnoty napětí pro blok MATLAB FUNCTION, druhý slouží pro vykreslování napětí na motoru na výstup (v konstruovaném modelu tuto funkci zastává napěťová sonda osciloskopu).
- Proudový senzor A_1 – Slouží k získávání hodnoty proudu protékajícího motorem za účely výpočtů pro regulaci a vykreslování na výstup (v konstruovaném modelu tuto funkci zastává proudová sonda osciloskopu).
- Řízený zdroj napětí U_{ref} – Zdroj napětí o velikosti 0 V až 5 V. Jeho hodnota je nastavovaná pomocí pravidelně spouštěného kódu tak, aby nedocházelo k překročení maximálního proudu. V konstruovaném modelu tuto funkci zastává digitální pin 3 na mikrokontroleru Arduino UNO.
- Zdroj napětí s pulzně šířkovou modulací (dále PWM) U_{PWM} – V konstruovaném modelu nahrazen MOSFET modulem. Pomocí řízeného zdroje napětí je na něm nastavovaná požadovaná střída, čímž dosahujeme regulace proudu.
- Spínače SW1 a SW2 – Pomocí nich připojujeme motor ke zdroji napětí nebo k zátěži.
- DC motor M_{DC} – Jeho parametry jsou shodné s hodnotami v tab. 6.1. Je to reálný model stejnosměrného motoru s cizím buzením (dá se použít i pro buzení pomocí permanentních magnetů), který přesně popisuje chování skutečného motoru.
- Odporová zátěž R_z – Slouží jako zátěž při práci v režimu generátoru.
- Převodovka GB – Má totožné parametry s převodovkou v konstruovaném modelu (převodový poměr 324:1, účinnost 54 %).
- Senzor otáček RPM_1 – Slouží k získávání hodnoty otáček pro vykreslování do grafu a jako vstup pro výpočet výšky zvedaného závaží.
- Ideální zdroj točivého momentu TS – S konstantním vstupem značeným jako KONST1 o hodnotě -5,8 slouží k simulaci závaží, které působí na soustrojí momentem 5,8 N·m, který byl vypočítán z hmotnosti závaží $m = 14,8$ kg a poloměru navíjecího bubnu $r = 4$ cm podle následujícího výpočtu (5.1).

- Konfigurace solveru S CONFIG – Slouží k definici nastavení solveru pro řešení simulace.
- Jednotkové skoky ST1, ST2 a ST3 – Slouží pro načasování spouštění událostí. ST1 započne brzdění motoru, ST2 připojí na motor zátěž, ST3 odpojí motor od zdroje napětí. Tyto jednotkové skoky po sobě musí následovat v takovém pořadí, aby se minimalizovaly napěťové špičky. Při realizaci se místo nich použijí v kódu Arduina celočíselné proměnné navyšované při přerušení.
- Funkce MATLAB FUNCTION – Obsahuje v sobě kód, pomocí kterého se řídí velikost proudu tekoucího do motoru.
- Saturační blok SAT – Zajišťuje, aby výstupní napětí z funkce bylo vždy v rozmezí 0 V až 5 V.
- Proporcionální členy G1 a G2 – Slouží zde pro převod jednotek na vhodnější.
- Integrátor INT – Slouží zde k výpočtu výšky závaží, která bude dále zobrazována na výstupu, pomocí rychlosti otáček jako svého vstupu.
- Výstup pro zobrazování signálů SCOPE – Slouží pro zobrazení průběžných hodnot proudu motorem, napětí na motoru, otáček motoru a výšky závaží.

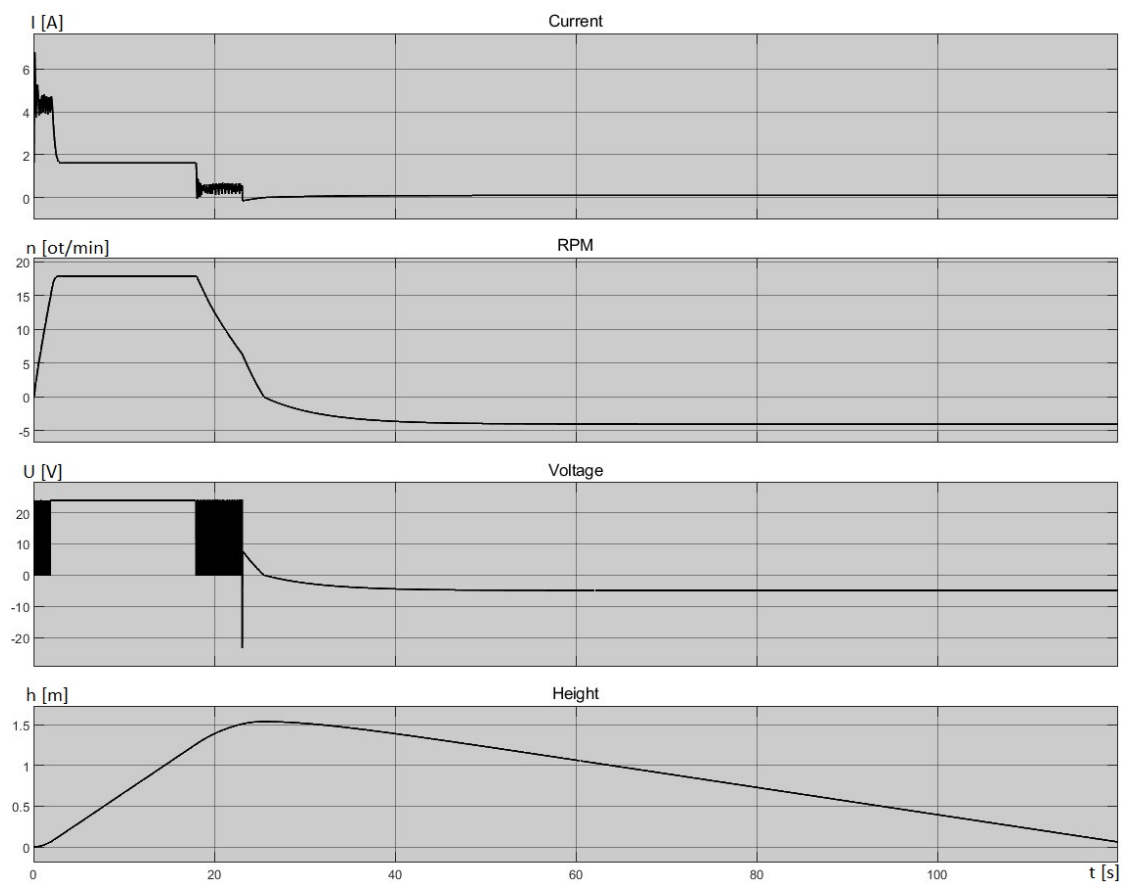
$$M = r \cdot m \cdot g = 0,04 \cdot 14,8 \cdot 9,81 \text{ Nm} = 5,8075 \text{ Nm} \approx 5,8 \text{ Nm} \quad (5.1)$$



Obrázek 5.1. Schéma simulace v programu MATLAB Simulink

5.2 Výsledek simulace

Provedením simulace, viz Obr. 5.2, jsme získali cenné informace pro realizaci reálného modelu. Pro periodu pro výpočty k regulaci proudu jsme určili optimální hodnotu 10 ms. Dále jsme určili optimální časové zpoždění od signálu přechodu do režimu generátoru a započítí brzdění do připojení rezistoru jako 5 s. Čas odpojení od zdroje jsme určili jako optimální 0,1 s po připojení rezistoru. Tyto časové prodlevy slouží především k minimalizaci napěťových špiček, které by negativně přispívaly k životnosti motoru.



Obrázek 5.2. Výsledek simulace pro zátěž o hodnotě 50Ω

Kapitola 6

Konstrukce modelu úložště

6.1 Motor

Jako motor, který slouží také i jako generátor byl použit stejnosměrný motor PG520. Základní informace o něm jsou uvedené v tab. 6.1 a na Obr. 6.1. Veškeré hodnoty jsou převzaté z webových stránek prodejce. Jelikož je motor stejnosměrný, platí pro něj rovnice (2.3), (2.4) a (2.5), uvedené v sekci 2.2.1. Z těchto rovnic vyplývá, že díky stále stejnému zátěžnému momentu, který je dán pouze hmotností závaží a poloměrem navíjecího bubnu, bude proud protékající motorem při vytahování závaží po dosažení ustáleného stavu konstantní. Totéž bude platit i při jeho spouštění dolů, tudíž napětí i výkon budou určovány pouze odporem rezistoru (který zde plní funkci zátěže), ve kterém bude výkon mařen na teplo. Případné fluktuace velikosti proudu by měly být způsobeny jen zvyšováním poloměru navíjení lana v důsledku nezanedbatelného průměru lana.

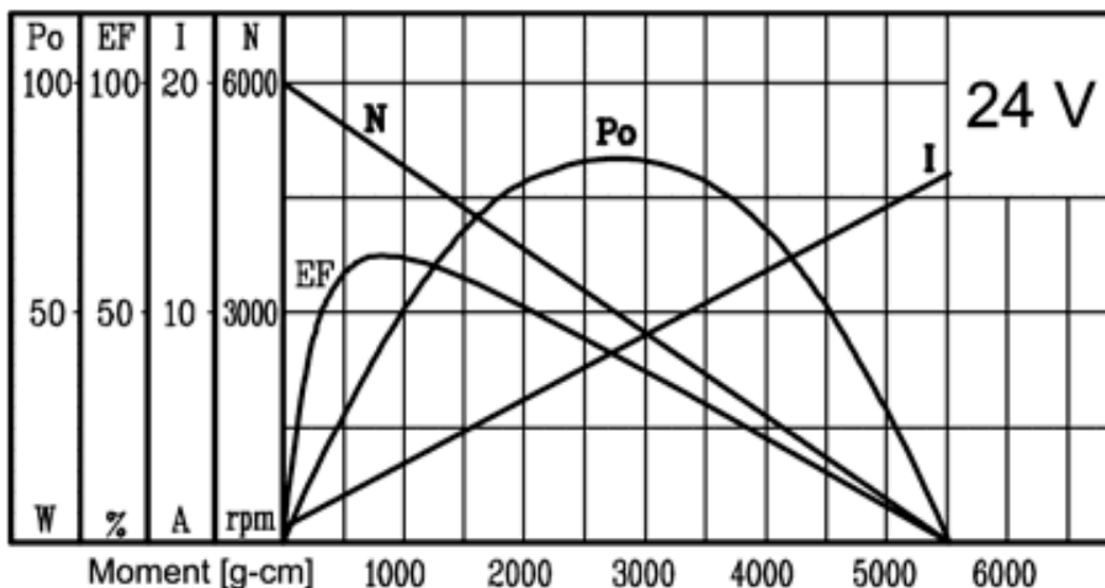
Jmenovité napětí [V]	24
Jmenovitý moment [kg cm]	0,65
Jmenovité otáčky [ot/min]	5450
Jmenovitý proud [A]	2,75
Otáčky naprázdno [ot/min]	6000
Proud naprázdno [A]	0,75
Jmenovitý výkon [W]	48,3
Průměr hřídele [mm]	12

Tabulka 6.1. Vlastnosti motoru PG520 [25]

6.2 Převodovka

Převodovka se zde skládá ze dvou částí. Tou první je planetová převodovka s převodovým poměrem 81:1, která je již součástí výše uvedeného motoru. Její účinnost je rovna 60 % a vydrží maximální trvalý moment 100 kg cm, což je pro naše potřeby dostačující. Na jejím výstupu dosáhneme jmenovitého momentu 31 kg cm a jmenovitých otáček 66,5 ot/min [25].

Druhá část převodovky je součástí navijáku, složená ze dvou obyčejných ozubených kol o převodu 4:1. Účinnost této části jsme odhadli na 90 %. Výsledný jmenovitý moment na výstupu převodovky bude tedy 111 kg cm, se jmenovitými otáčkami 16,5 ot/min. Výsledný převodový poměr je roven 324:1 s celkovou účinností 54 %.

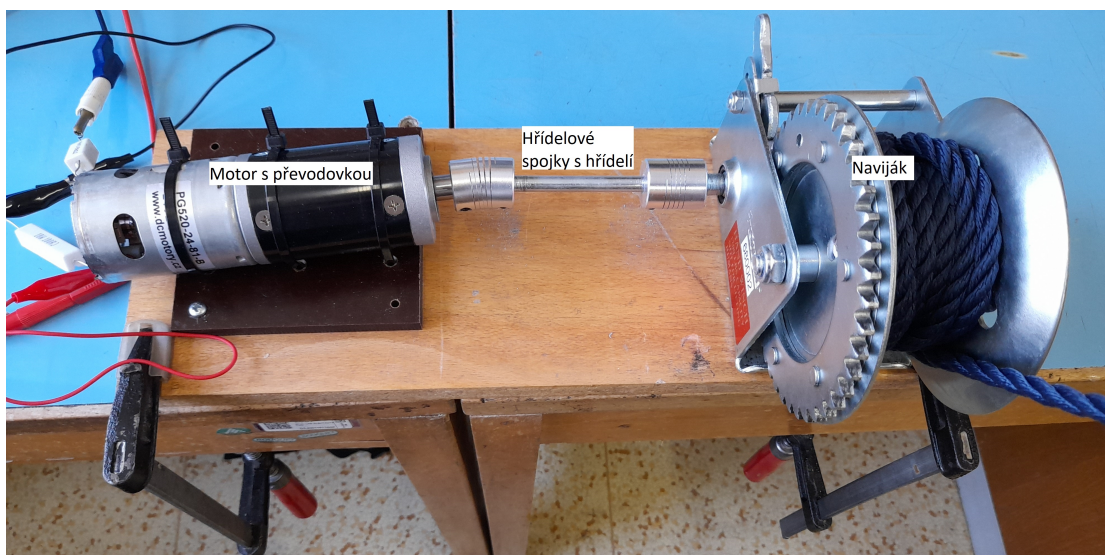


Obrázek 6.1. Charakteristiky motoru PG520 [25]

6.3 Naviják

Jako naviják jsme použili Hoteche Ruční lanový naviják 540 kg, ze kterého jsme odstranili kliku, a poloměr bubnu jsme zvýšili na 4 cm přidáním napěchovaného kartonu. Jako navíjecí lano jsme použili polypropylenové lano o průměru 8 mm s maximální nosností 85 kg, což je pro naše potřeby více než 5× předimenzované.

Hřídel navijáku o průměru 12 mm je spojena s hřídelí motoru pomocí šroubu o průměru 8 mm (který zde plní funkci spojovací hřídele) a dvou pružných hřídelových spojek. Tyto spojky spojují šroub na jedné straně s hřídelí motoru a na druhé straně s hřídelí převodovky. Pomocí tohoto uspořádání zajistíme spolehlivý přenos momentu i v případě, kdy nejsou hřídele motoru a navijáku dokonale v jedné ose.



Obrázek 6.2. Realizovaný model – motor, převodovka a naviják

Na Obr. 6.2 je vyfocena výsledná konstrukce sestávající z motoru s převodovkou, hřídelových spojek a šroubu a navijáku. Díky využití dvou hřídelových spojek místo

jedné dosahujeme výrazně vyšší flexibility, která je zde dobře pozorovatelná, jelikož z obrázku je zřejmé, že hřídele motoru a navijáku nejsou sousedé.

6.4 Závaží

Závaží je realizováno pomocí dvou kusů betonové dlažby. Rozměry jednoho kusu jsou $30 \times 30 \times 4$ cm, hmotnost je rovna 7,4 kg. Celkové rozměry závaží jsou tedy $30 \times 30 \times 8$ cm a celková hmotnost dosahuje 14,8 kg. Závaží je spojeno do jednoho celku pomocí polypropylenového lana o průměru 8 mm, které je navinuto na buben navijáku.

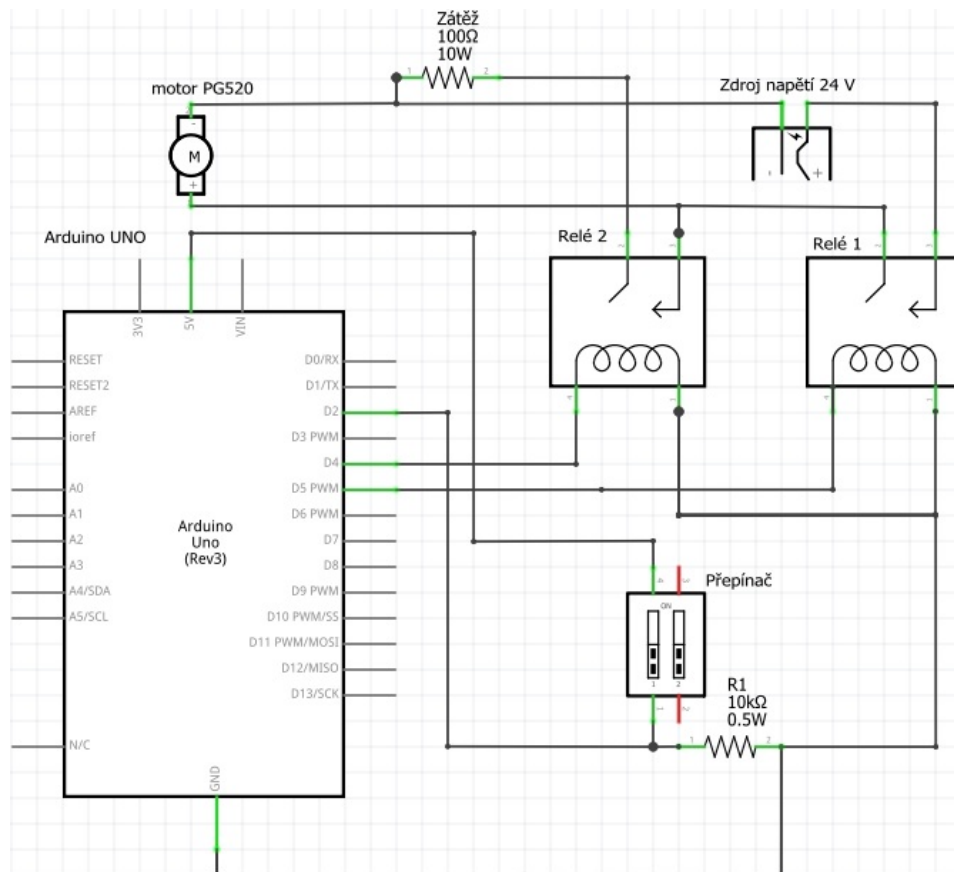
6.5 Řízení

Pro řízení je zde použita vývojová deska Arduino UNO založená na ATmega328. Velikost napětí na motoru je nastaveno pevně pomocí napěťového zdroje na 24 V, pro omezení nárazového proudu je na tomtéž zdroji omezen proud na 2,5 A. Původně měl být pro omezení nárazového proudu použit modul PWM 15A 400W MOSFET, ten byl však nevratně poškozen, a z časových důvodů bylo zvoleno výše uvedené řešení.

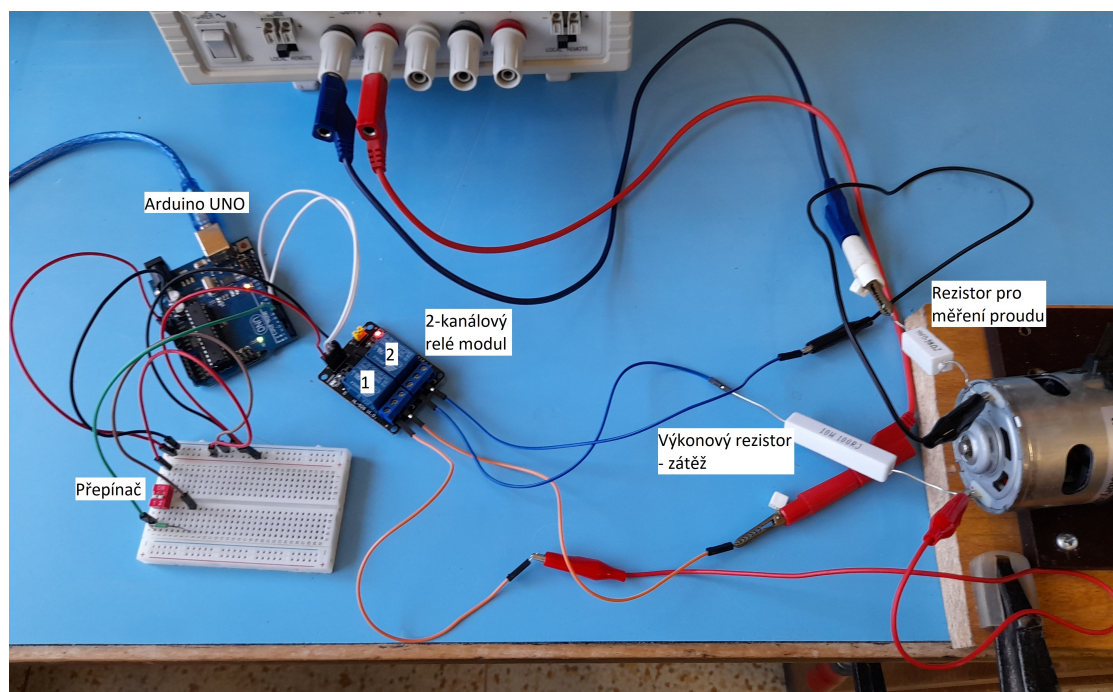
Pro přechod z režimu motoru do režimu generátoru a zpět slouží přepínač, který je na počátku v poloze OFF. Přepnutím do polohy ON přejdeme do režimu motoru, přičemž do režimu generátoru přejdeme pomocí přepnutí do polohy OFF. Zpět do režimu motoru přejdeme pomocí přepnutí do polohy ON.

Pro spínání relé platí následující pravidla. Pro režim motoru je relé 1 sepnuto a relé 2 je rozepnuto. Při přechodu do režimu generátoru se nejprve sepne relé 2 a po 0,1 s se rozepne relé 1. Pro přechod zpět do režimu motoru dochází ke spínání současně.

Celé schéma elektrického zapojení je uvedeno na Obr. 6.3. Podle něj byl realizován elektrický obvod vyfocený na Obr. 6.4. Jediný rozdíl mezi nimi spočívá ve využití 2-kanálového relé modulu místo dvou samostatných relé. Výstupy kanálů 1 a 2 mají stejné zapojení jako výstupy relé 1 a 2. Rozdíl je v jejich vstupech, kdy je relé 1 připojeno jedním kontaktem na pin D5 a druhým na GND a relé 2 je připojeno jedním kontaktem na pin D4 a druhým na GND. Naproti tomu použitý relé modul má 4 vstupní piny, jeden připojený na 5V, druhý na GND, třetí je vstup pro relé 1 a je připojený na D5 a čtvrtý je vstup pro relé 2 a je připojený na D4.



Obrázek 6.3. Schéma elektrického zapojení modelu



Obrázek 6.4. Realizovaný model – elektrické zapojení

Kapitola 7

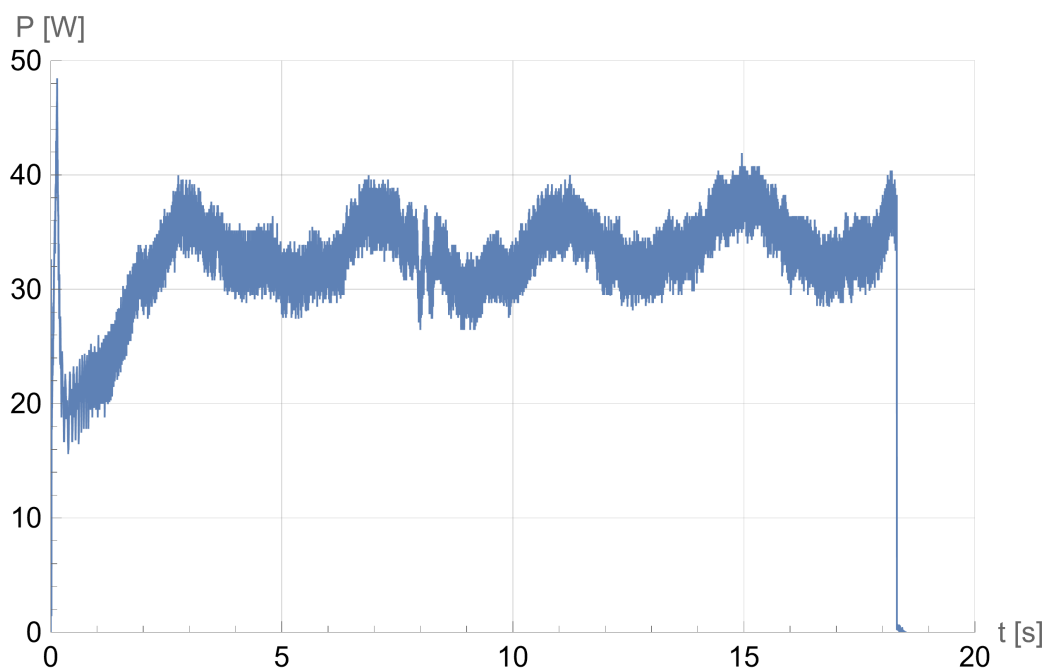
Měření

Během testování bylo závaží vážící 14,8 kg zvedáno do výšky 1,5 m a následně spouštěno na zem. Napětí na motoru a proud jím tekoucí v režimu motoru byly měřeny pomocí osciloskopu RIGOL DS1204B, data byla vyexportována ve formátu csv, další zpracování a vykreslení grafů bylo provedeno pomocí programu Wolfram Mathematica. Napětí bylo měřeno přímo na svorkách motoru, proud byl měřen nepřímo pomocí měření napětí na rezistoru pro měření proudu. Hodnoty proudu byly následně vypočítány podle vzorce (7.1). Proud v režimu generátoru byl vypočítán obdobně pomocí vydělení napětí na výkonovém rezistoru (stejně jako napětí na motoru) velikostí jeho odporu. Výkon P [W] byl získán jako součin okamžitého napětí U [V] a okamžitého proudu I [A]: $P = U \cdot I$.

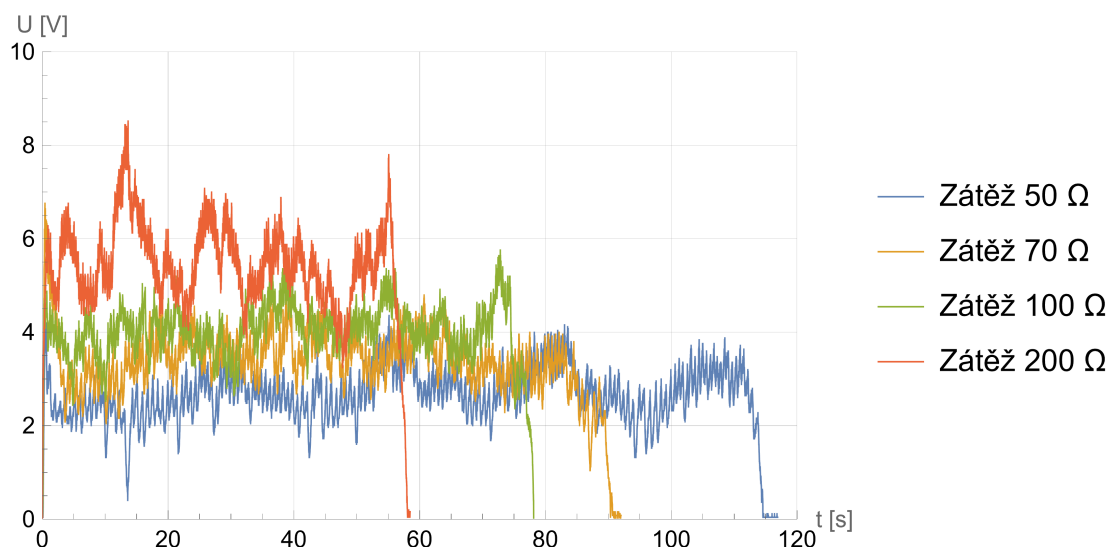
$$I = \frac{U_R}{R}, \text{ kde} \quad (7.1)$$

- I je výsledný proud [A]
- U_R je napětí na rezistoru [V]
- $R = 0,56 \Omega$ je odpor rezistoru pro měření proudu

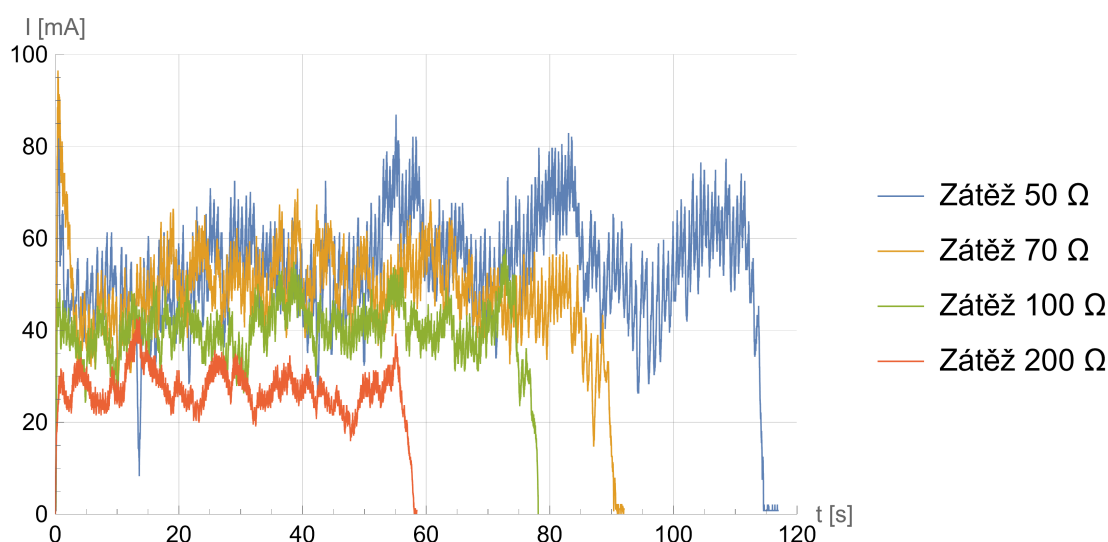
Tímto postupem jsme získali následující grafy na Obr. 7.1, 7.2, 7.3 a 7.4. Nestálá velikost příkonu v režimu motoru i výkonu v režimu generátoru je způsobena především nepravidelnostmi ve velikosti poloměru navijáku, což je zapříčiněno nezanedbatelným průměrem použitého lana. Použitím lana menšího průměru by se tomuto dalo zabránit.



Obrázek 7.1. Průběh příkonu v režimu motoru



Obrázek 7.2. Průběh napětí v režimu generátoru



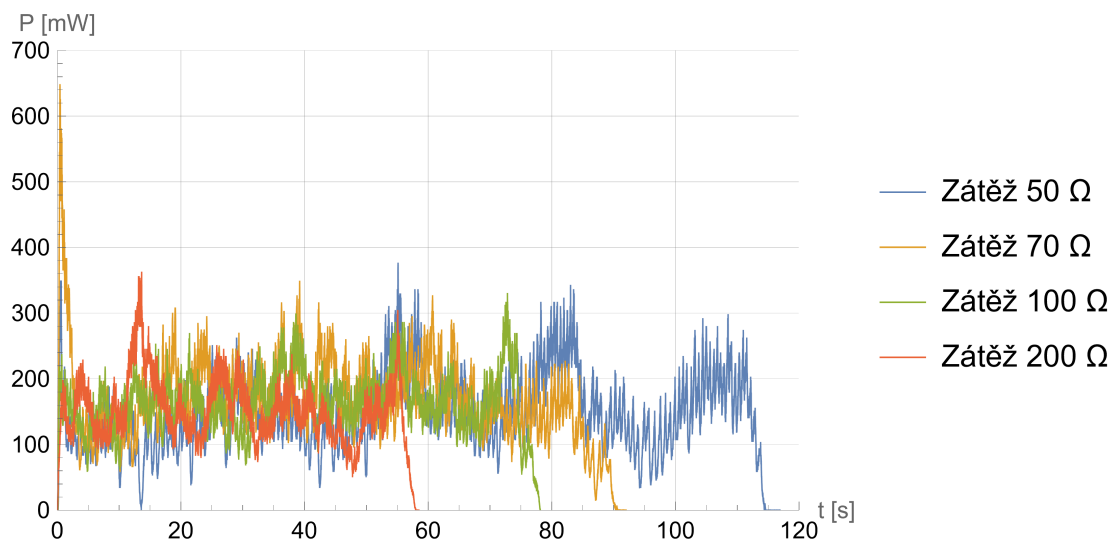
Obrázek 7.3. Průběh proudu v režimu generátoru

Pro výpočet účinnosti potřebujeme ještě znát potenciální energii uloženou pomocí vytážení závaží. Tu vypočítáme podle vzorce (2.2) pomocí známých hodnot $m = 14,8 \text{ kg}$ a $h = 1,5 \text{ m}$ jako $E_p = 217,78 \text{ J}$. Následně pomocí numerické integrace výkonu získáme pro každý z uvažovaných dějů energii během tohoto děje využitou nebo dodanou.

Účinnosti uvažujeme následovně:

- Účinnost zvedání definujeme jako poměr získané potenciální energie ku elektrické energii spotřebované motorem v režimu motoru.
- Účinnost spouštění definujeme jako poměr elektrické energie dodané motorem v režimu generátoru do zátěže ku využitě potenciální energii.
- Celkovou účinnost definujeme jako poměr elektrické energie dodané motorem v režimu generátoru do zátěže ku elektrické energii spotřebované motorem v režimu motoru.

Tyto vypočtené účinnosti jsou uvedeny v tab. 7.1. Tyto hodnoty jsou výrazně nižší (s výjimkou samotné účinnosti zvedání) než teoretické maximum, které můžeme vypočítat.



Obrázek 7.4. Průběh výkonu v režimu generátoru

tat podle vzorce (7.2). Účinnost v každém z režimů by měla mít vyjádřená v procentech hodnotu 33,48 %, celková účinnost by měla činit 11,2 %. Nízká celková účinnost je pravděpodobně způsobená příliš velkým třením uvnitř převodovky, neoptimálním zatížením motoru a málo plynulým chodem části převodovky, která je součástí navijáku.

$$\eta_{celk} = \eta_m \cdot \eta_p, \text{ kde} \quad (7.2)$$

- η_{celk} je celková účinnost [-]
- η_m je účinnost motoru (zhruba 0,62) [-]
- η_p je účinnost převodovky (zhruba 0,54) [-]

	Energie [J]	Účinnost [%]	Celková účinnost [%]
Zvedání	599,18	36,35	
Zátěž 50 Ω	16,97	7,79	2,83
Zátěž 70 Ω	15,22	6,99	2,54
Zátěž 100 Ω	12,68	5,82	2,12
Zátěž 200 Ω	8,66	3,98	1,45

Tabulka 7.1. Vypočtené hodnoty pro zvedání a spouštění závaží

Kapitola 8

Závěr

V první části práce jsou popsány současné i budoucí možnosti využívání gravitačních úložišť energie. Ze současného využití se zabýváme pouze PVE, v budoucích možnostech rozebíráme několik možných řešení.

V kapitole 3 se věnujeme přečerpávacím vodním elektrárnám, které v současné době naprosto dominují odvětví akumulace energie, a to především díky velmi vysokým úložným kapacitám, které kompenzují drahou a náročnou výstavbu.

V kapitole 4 je uvedeno pět nejdůležitějších firem, které se zabývají novými koncepty gravitačních úložišť. Z nich je nejperspektivnější firma Energy Vault, která jako jedna z mála již postavila funkční prototyp. Kromě toho v současné době staví první komerční gravitační úložiště, které není stavěno na principu PVE. Druhá perspektivní firma je Gravitricity, která také již zkonstruovala prototyp. Její první komerční úložiště by se mělo stavět v nejbližších letech v ČR. Tento koncept je sice menšího měřítka než ostatní, ale má výraznou výhodu díky své jednoduchosti (manipuluje se zde pouze s jedním trvale zavěšeným závažím).

V druhé části práce jsme na malém demonstračním modelu testovali jeho vlastnosti. Model disponuje jednoduchým ovládáním pomocí přepínače, jehož nastavením do polohy ON dojde k vytahování závaží a přepnutím do polohy OFF dojde k jeho spouštění. Z důvodu nedostatku času zde nebyla použita brzda k zafixování závaží v určité výšce.

Celková účinnost dosahuje hodnot 1,45 % až 2,83 %, přičemž nejvyšší hodnoty dosahujeme při nejnižší hodnotě odporu (50Ω). Takto nízké hodnoty jsou způsobeny následujícími faktory: příliš velké tření uvnitř převodovky, neoptimální zatížení motoru, málo plynulý chod části převodovky, která je součástí navijáku. Toto jsme se pokoušeli částečně vyřešit pomocí použití závaží o vyšší hmotnosti, pak ale začaly selhávat hřídelové spojky. Také navzdory předpokladům neměl proud pro všechny zátěže stejnou velikost, ale byl nejvyšší pro nejnižší hodnotu odporu, což byl následek nízké efektivity.

Účinnost by bylo možné zvýšit pomocí zoptimalizování zatížení motoru pomocí těžšího závaží za současného použití kvalitnějších hřídelových spojek. Ke zvýšení účinnosti by také vedlo použití navijáku s plynulejším chodem. Pomocí těchto opatření by bylo možné zvýšit účinnost až na 11,2 %. Pro další zvyšování účinnosti by bylo nutné použít asynchronní nebo synchronní stroj místo stejnosměrného. Tímto by bylo možné dosáhnout účinnosti až 80 %, což by dokázalo konkurovat ostatním možnostem akumulace.

Literatura

- [1] Pavel Kubeš a Zdeněk Kyncl. *Fyzika I*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-010-1487-8.
- [2] Petr Voženílek a Vladimír Novotný. *Elektromechanické měniče*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-010-3137-3.
- [3] Nasrullah Khan, Saad Dilshad, Rashida Khalid, Ali Raza Kalair a Naeem Abas. Review of energy storage and transportation of energy. *Energy Storage*. 2019, 1 (3), e49. DOI <https://doi.org/10.1002/est2.49>. ONLINE; cit. 21.3.2023.
- [4] Josef Hušek. *Přečerpávací vodní elektrárny*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963.
- [5] Frank S. Barnes a Jonah G. Levine. *Large energy storage systems handbook*. Boca Raton: CRC Press, 2011. ISBN 978-1-4200-8600-3.
- [6] *Přečerpávací vodní elektrárna - princip a uspořádání*. <https://oenergetice.cz/elektrina/precerpavaci-vodni-elektrarna-princip-usporadani-2>. ONLINE; cit. 22.3.2023.
- [7] *Přečerpávací vodní elektrárny v České republice*. <https://oenergetice.cz/elektrina/precerpavaci-vodni-elektrarny-v-ceske-republice>. ONLINE; cit. 28.3.2023.
- [8] *2022 Hydropower Status Report*. <https://www.hydropower.org/publications/2022-hydropower-status-report>. ONLINE; cit. 28.3.2023.
- [9] Wikipedia contributors. *List of pumped-storage hydroelectric power stations — Wikipedia, The Free Encyclopedia*. 2023. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=List_of_pumped-storage_hydroelectric_power_stations&oldid=1146139813. Online; cit. 28.3.2023.
- [10] Michael Molitch-Hou. *Are Gravitational Batteries the Solution to Grid Power Storage?* <https://www.engineering.com/story/are-gravitational-batteries-the-solution-to-grid-power-storage>. ONLINE; cit. 21.3.2023.
- [11] Akshat Rathi. *Swiss startup Energy Vault is stacking concrete blocks to store energy*. <https://qz.com/1355672/stacking-concrete-blocks-is-a-surprisingly-efficient-way-to-store-energy>. ONLINE; cit. 21.3.2023.
- [12] *Gravity could solve renewable energy's biggest problem*. <https://edition.cnn.com/2022/03/14/energy/energy-vault-renewable-storage-spc-intl/index.html>. ONLINE; cit. 4.4.2023.
- [13] *Energy Vault*. <https://www.energyvault.com/>. ONLINE; cit. 28.2.2023.
- [14] *Massive, Gravity-Based Battery Towers Could Solve Renewable Energy's Storage Problem*.

<https://insights.globalspec.com/article/10784/massive-gravity-based-battery-towers-could-solve-renewable-energy-s-storage-problem>. ONLINE; cit. 26.3.2023.

- [15] *Gravitricity*.
<https://gravitricity.com/>. ONLINE; cit. 28.2.2023.
- [16] *Gravitricity battery generates first power at Edinburgh site*.
<https://www.bbc.com/news/uk-scotland-56819798>. ONLINE; cit. 4.4.2023.
- [17] *Gravity Power*.
<https://www.gravitypower.net/>. ONLINE; cit. 28.2.2023.
- [18] *Using gravity for energy storage: viable idea or impractical?*
<https://www.edn.com/using-gravity-for-energy-storage-viable-idea-or-impractical/>. ONLINE; cit. 5.4.2023.
- [19] *Gravity Power Module. Budoucnost akumulace energie?*
<https://oenergetice.cz/elektrina/gravity-power-module>. ONLINE; cit. 5.4.2023.
- [20] *Research and Demonstration Plant Weilheim (upper Bavaria, Germany)*.
<https://gravityenergyag.com/research-and-demonstration-plant-weilheim-upper-bavaria-germany/?lang=en>. ONLINE; cit. 5.4.2023.
- [21] *Heindl Energy*.
<https://heindl-energy.com/>. ONLINE; cit. 28.2.2023.
- [22] *ARES North America*.
<https://aresnorthamerica.com/>. ONLINE; cit. 28.2.2023.
- [23] *Storing Energy on Rail Tracks*.
<http://www.greenwellfuture.com/ares/>. ONLINE; cit. 14.4.2023.
- [24] *ARES Gravity Trains May Solve the Energy Storage Problem*.
<https://www.railway.supply/en/ares-gravity-trains-may-solve-the-energy-storage-problem/>. ONLINE; cit. 12.4.2023.
- [25] *DC motor série PG520 s planetovou převodovkou*.
<https://www.dcmotory.cz/dc-motory-planetova-prevodovka/serie-pg520.html>. ONLINE; cit. 19.4.2023.