

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGIE



MECHANICKÉ ÚLOŽIŠTĚ ELEKTRICKÉ ENERGIE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Autor práce: Adam Pešek

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

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a
management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

PRAHA 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pešek** Jméno: **Adam** Osobní číslo: **475377**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Mechanické úložiště elektrické energie

Název bakalářské práce anglicky:

Mechanical Storage of Electricity

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši a porovnání současného stavu řešení úložišť elektrické energie včetně mechanických s gravitační potenciální energií.
2. Navrhněte a realizujte hardware model mechanického úložiště elektrické energie, kde základním elementem je motor/generátor, seismická hmota a výšková konstrukce ke zvedání a spouštění seismické hmoty. Celý proces je řízený elektronikou s mikroprocesorem. Výška konstrukce bude cca 2 m a hmotnost seismické hmoty uvažujte cca 20 kg.
3. Zjistěte dosažené elektrické parametry realizovaného modelu, navrhněte vylepšení pro zvýšení energie.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Are Gravitational Batteries the Solution to Grid Power Storage?
<https://www.engineering.com/story/are-gravitational-batteries-the-solution-to-grid-power-storage>
- [2] The 5 Most Promising Long-Duration Storage Technologies Left Standing,
<https://www.greentechmedia.com/articles/read/most-promising-long-duration-storage-technologies-left-standing>
- [3] Stacking concrete blocks is a surprisingly efficient way to store energy, <https://qz.com/1355672>

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: **12.02.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **21.05.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2022**

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

Rád bych poděkoval všem, kteří si na mě udělali čas a byli ochotní se mnou práci konzultovat.

Poděkování patří zejména panu doktorovi Petru Kočárníkovi, který mi pomohl především s praktickou částí této práce. Dále bych chtěl poděkovat panu doktorovi Pavlovi Koblému, se kterým jsem mohl konzultovat možné způsoby řešení.

Poděkování patří i vedoucímu této práce, prof. Miroslavovi Husákovi, který mi pomohl zařídit součástky potřebné k realizaci praktické části.

Na závěr bych rád poděkoval své přítelkyni a mé rodině, bez jejíž podpory bych tuto práci jen stěží dokončil.

PROHLÁŠENÍ

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 20. května 2021

.....

ABSTRAKT

Tento dokument se věnuje úložištím energie využívající energii tíhového pole.

V teoretické části jsou popsány nejpoužívanější technologie úložišť elektrické energie. Dále se text zaměřuje otázkou dalšího vývoje úložišť. Jsou nastíněny nejnámější projekty/koncepty úložišť využívající energii tíhového pole, jejich parametry a zhodnocení možných výhod a nevýhod.

V praktické části je sestaven matematický model jednoduchého gravitačního úložiště, který je následně realizován v podobě experimentálního modelu.

Výsledky matematického a experimentálního modelu jsou porovnány a na závěr je provedeno zhodnocení této technologie.

Klíčová slova: ČVUT FEL, úložiště energie, mechanické úložiště energie, bakalářská práce, Gravitricity, Energy Vault, ARES, Simulink, Arduino

ABSTRACT

This document focuses on gravity energy storages.

In the theoretical part there are discussed commonly used technologies regarding storing of electrical energy. Furthermore, the issue of further development of energy storages is outlined. The gravity energy storage is introduced with its most known actual projects and concepts. Their parameters and the pros and cons are discussed.

In the practical part of this work there is introduced mathematical model of a simple gravity energy storage. With knowledge from the mathematical model the experimental model was built afterwards.

The results are discussed, and models are compared. In the end, an evaluation of potential of this technology is performed.

Keywords: CTU FEE, energy storage, gravity storage, Gravitricity, Energy Vault, ARES, Simulink, Arduino

OBSAH

ÚVOD	1
KAPITOLA 1: ÚVOD DO PROBLEMATIKY ÚLOŽIŠŤ ENERGIE	2
1.1 AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE	2
1.1.1 Dělení	2
1.2 VÝVOJ A SOUČASNÝ STAV ÚLOŽIŠŤ ENERGIE	2
1.2.1 Přečerpávací elektrárny.....	3
1.2.2 Lithium-iontové baterie	4
1.2.3 Průtokové baterie	4
1.2.4 Vodík	4
1.2.5 Alternativní metody.....	5
KAPITOLA 2: MECHANICKÁ ÚLOŽIŠŤE VYUŽÍVAJÍCÍ POTENCIÁLNÍ ENERGII TÍHOVÉHO POLE	6
2.1 PRINCIP	6
2.2 SOUČASNÉ PROJEKTY	6
2.2.1 Gravitricity.....	6
2.2.1.1 Parametry.....	8
2.2.1.2 Výhody a nevýhody	8
2.2.2 Energy Vault.....	8
2.2.2.1 Parametry.....	9
2.2.2.2 Výhody a nevýhody	9
2.2.3 Gravity Storage/Gravity Power.....	9
2.2.3.1 Parametry.....	10
2.2.3.2 Výhody a nevýhody	10
2.2.4 ARES	11
2.2.4.1 Parametry.....	12
2.2.4.2 Výhody a nevýhody	12
2.3 SHRUTÍ	13
KAPITOLA 3: NÁVRH MECHANICKÉHO ÚLOŽIŠŤE VYUŽÍVAJÍCÍ POTENCIÁLNÍ ENERGII TÍHOVÉHO POLE	14
3.1 ODVOZENÍ MATEMATICKÉHO MODELU	14
3.1.1 Mechanická část matematického modelu.....	14
3.1.2 Elektrická část matematického modelu.....	15
3.1.3 Výsledný matematický model.....	16
3.2 POPIS REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍHO MODELU	18
3.2.1 Konstrukce.....	18
3.2.2 Naviják.....	18
3.2.3 Závaží	18
3.2.4 Realizovaný obvod	18
3.2.5 Popis řídicí části	21
KAPITOLA 4: VÝSLEDKY	24
4.1 VÝSLEDKY SIMULACE	24
4.1.1 Režim PWM	24
4.1.2 Režim výkonové špičky	25
4.2 VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNÍHO MODELU	26

4.2.1	Režim PWM.....	26
4.2.2	Režim výkonové špičky.....	28
4.3	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ A ZHODNOCENÍ	29
	KAPITOLA 5: ZÁVĚR.....	30
	LITERATURA.....	31
	SEZNAM SYMBOLŮ.....	34

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1-1 Podíl jednotlivých technologií úložišť na celkovém světovém instalovaném výkonu (MW) v roce 2010 [2].....	3
Obrázek 1-2 Vývoj technologií zabývajících se skladováním energie (2013) [2].....	3
Obrázek 2-1 Pilotní projekt Gravitricity [14].....	7
Obrázek 2-2 Přechod ze stavu s nejvyšší energií (nalevo) do stavu s nejnižší energií (napravo) [19].....	9
Obrázek 2-3 Koncept technologie Gravity Power [21].....	10
Obrázek 2-4 První prototyp spol. ARES [25].....	11
Obrázek 2-5 Koncept nového prototypu vznikající poblíž města Pahrump v Nevadě [25].....	12
Obrázek 3-1 Elektrické schéma simulovaného obvodu.....	15
Obrázek 3-2 Simulační model motoru v programu MATLAB-Simulink.....	17
Obrázek 3-3 Pohled na celkový model gravitačního úložiště v programu MATLAB-Simulink.....	17
Obrázek 3-4 Realizovaný experimentální model (1 – zdroj, 2 – výkonový rezistor, 3 – kondenzátor, 4 – nepájivé pole s tranzistorem, diodou a odporovými můstky, 5 – přepínací relé, 6 – Arduino Mega, 7 – měřicí modul proudu, 8 – motor s enkodérem, 9 – navíjecí buben, 10 – ocelové lanko se závažím).....	19
Obrázek 3-5 Schéma elektrické části experimentálního modelu.....	19
Obrázek 3-6 Řídící struktura experimentálního modelu – režim výkonové špičky.....	21
Obrázek 3-7 Řídící struktura experimentálního modelu – režim PWM.....	22
Obrázek 4-1 Výsledek simulace - režim PWM, část 1.	24
Obrázek 4-2 Výsledek simulace - režim PWM, část 2.	25
Obrázek 4-3 Výsledek simulace - režim výkonové špičky, část 1.....	25
Obrázek 4-4 Výsledek simulace - režim výkonové špičky, část 2.....	26
Obrázek 4-5 Výsledek měření - režim PWM, část 1.	27
Obrázek 4-6 Výsledek měření - režim PWM, část 2.	27

SEZNAM TABULEK

Tabulka 3-1. Seznam použitých součástek a modulů.....	20
Tabulka 3-2 Parametry použitého motoru.....	20
Tabulka 3-3 Parametry převodovky motoru.....	21
Tabulka 4-1 Výsledky pro různé otáčky generátoru.....	27

Obrázek 4-7 Výsledek měření - režim výkonové špičky, část 1.....	28
Obrázek 4-8 Výsledek měření - režim výkonové špičky, část 2.....	28
Obrázek 4-9 Průběh otáček po vyladění PI regulátoru.....	29

ÚVOD

Na konci roku 2019 Evropská rada schválila tzv. Zelenou dohodu (v originálním znění Green Deal), jenž zavazuje členské země Evropské Unie, mimo jiné, k postupnému snižování emisí skleníkových plynů a následné klimatické neutralitě do roku 2050 prostřednictvím postupné dekarbonizace všech sektorů hospodářství.

Z pohledu energetiky to znamená ústup od tzv. emisních zdrojů elektrické energie, především hnědého a černého uhlí a přechod na zdroje bezemisní. Do těchto zdrojů se řadí v současné době jednak zemní plyn a jaderná energie, tak především obnovitelné zdroje. Současný výhled energetiky u nás do roku 2030 představuje nejistou budoucnost jaderné energetiky, odstavení uhelných elektráren a jejich přeměna na paroplynové a postupný rozmach obnovitelných zdrojů.

Českou republiku a země Evropské unie tedy čeká v následujících letech transformace průmyslu a zejména energetiky, a to především k čím dál většímu poměru obnovitelných zdrojů na celkovém energetickém mixu.

Problém současných největších zdrojů obnovitelné energie – fotovoltaiky a větrných turbín je, že nedokážou poskytnout stabilní dodávku elektrické energie v rámci dne i celého roku. Druhým problémem energie z obnovitelných zdrojů, konkrétně větrných turbín, je, že se dají postavit pouze na určitých místech, které mají predispozice vhodné k produkci dostatku energie, jako jsou např. břehy moří. Tím vzniká nerovnoměrnost pokrytí zdrojů elektrické energie v rámci rozmístění spotřeby, což může být problematické z hlediska přenosu na velké vzdálenosti.

S větším zastoupením obnovitelných zdrojů elektrické energie se tedy naskytuje otázka, jak řešit tuto nepravidelnost v dodávce elektrické energie. Výroba elektrické energie z těchto zdrojů je přímo závislá na klimatických podmínkách a množství vyrobené energie se dá regulovat velice omezeně, je nutné, aby byla zajištěna základní podmínka elektrické bilance výkonů, tedy rovnost mezi množstvím spotřebované a vyrobené elektrické energie a nedošlo k ohrožení stability přenosové a distribuční sítě.

První možností je přebytečné množství energie prodávat do zahraničí a v případě nedostatku naopak nakupovat drahou energii, ale toto řešení je krátkozraké a velice riskantní z pohledu energetické bezpečnosti.

Druhá možnost je tuto levnou energii využít v technologiích a výrobních procesech mající velkou spotřebu, nebo v technologiích, kde dochází k přímé akumulaci energie, a to v různých formách. Akumulace energie, společně s ostatními novými technologiemi v energetice je navíc součástí strategie evropské unie pro energetickou integraci. Téměř s jistotou tedy můžeme říct, že v budoucnu budeme muset být schopni akumulovat čím dál větší množství elektrické energie.

Tato práce zvažuje možnost použití tzv. gravitačních úložišť, které by mohly tvořit součást nově vznikajících a čím dál víc potřebných úložišť elektrické energie.

V Praze dne 21.5.2021

Adam Pešek, autor práce

KAPITOLA 1: ÚVOD DO PROBLEMATIKY ÚLOŽIŠŤ ENERGIE

V této kapitole je popsán princip úložiště elektrické energie, jakým způsobem fungují a jak můžeme tato úložiště dělit.

1.1 Akumulace elektrické energie

Systém pro ukládání elektrické energie obsahuje prostředky, kterými je energie z elektrizační soustavy převedena do formy, která může být ukládána v době přebytku energie, kdy je elektrická energie na trhu s energiemi nejlevnější. V době špiček poptávky je akumulovaná energie dodávána zpět do sítě. Akumulace energie ovšem umožňuje i několik dalších neméně podstatných funkcí jako např.

- vykrývat krátkodobé náhodné výkyvy v poptávce energie a vyhýbat se tak potřebě regulovat frekvenci na straně výroby,
- zároveň regulovat jalový výkon v síti, snižovat harmonické zkreslení a eliminovat poklesy napětí a přepětí,
- v případě výpadku napájení sítě poskytnout dostatek energie na opětovné rozběhnutí elektráren,
- skladovat energii pro odběr v době spotřeby v případě ostrovních režimů,
- v případě lokální sítě např. výrobních továren vykrývat krátkodobé špičky pro rozběh výroby,
- a na závěr ukládat elektřinou vyrobenou z obnovitelných zdrojů tak, aby odpovídala fluktuující nabídka měnící se poptávce [1].

Pro každé zařízení schopné uschovávat energii by mělo platit, že ztráty dané přeměnou energie a její akumulace v rámci zařízení, by měly být minimální. To je jedno z kritérií, podle kterých můžeme hodnotit, jak efektivní daná technologie je.

1.1.1 Dělení

Funkce konkrétního akumulátoru energie je závislá na použité technologii, které by ale měla odpovídat dané aplikaci. V případě návrhu takového úložiště je vždy třeba znát kapacitu takového úložiště, účinnost, potřebný výkon a čas, za který je tento výkon schopno dosáhnout.

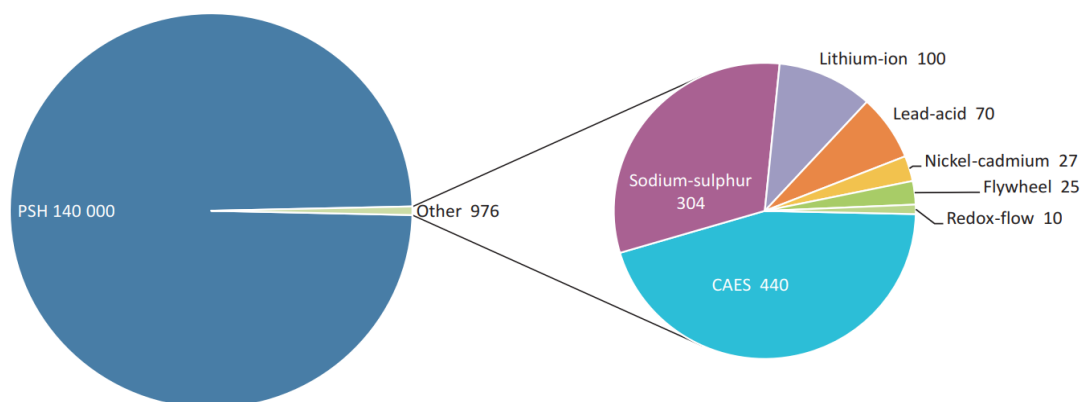
Jelikož aplikací, kde lze použít úložiště energie, je mnoho, existuje podle toho i několik různých technologií. Systém úložišť energie lze obecně rozdělit podle formy energie, ve které je energie uchována, a to na úložiště využívající:

- elektrochemickou energii – lithium-iontové, sodíko-sírové, nebo redoxní baterie, nebo v rámci výroby vodíku, zemního plynu, dusíku a dalších plynů
- tepelnou energii – podzemní tepelné úložiště v různých podobách, úložiště využívající latentního tepla, tepelné akumulace
- kinetickou energii – rotační setrvačníky
- elektromagnetickou energii – superkapacity, úložiště využívající supravodivých prvků
- potenciální energii – přečerpávací elektrárny
- kombinaci předchozích – baterie na bázi tavných solí, nádoby se stlačeným vzduchem (CAES) [1].

1.2 Vývoj a současný stav úložišť energie

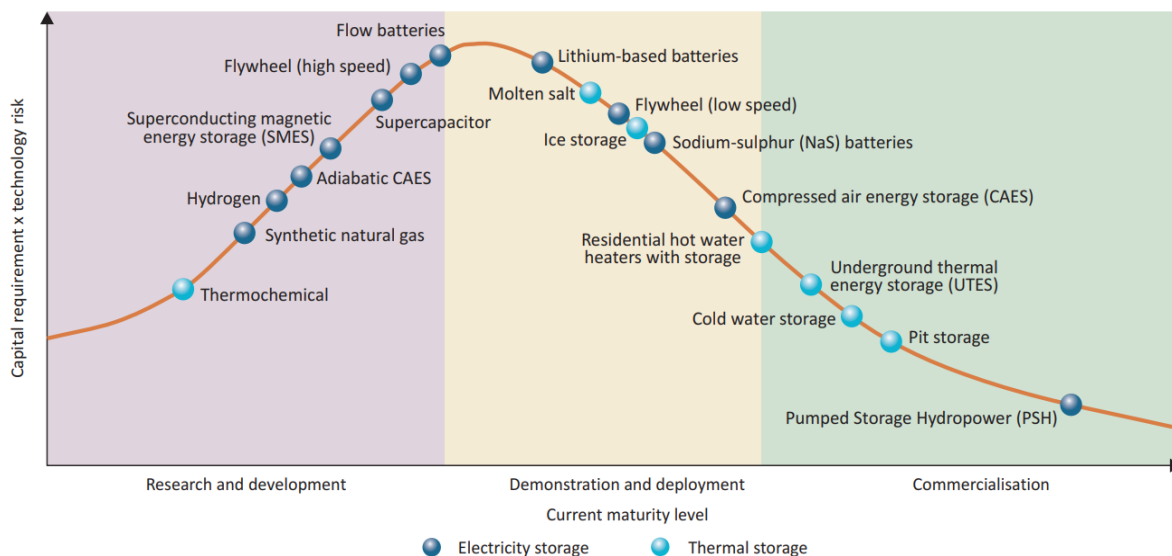
V roce 2014 vyšla pod Mezinárodní energetickou agenturou (IEA) studie mapující existující technologie týkající se akumulace energie s cílem určit potenciál nových technologií v tomto oboru. Výsledkem této práce bylo určení celkového instalovaného výkonu úložišť, který činil v době, kdy probíhalo toto mapování (2011-2013), kolem 140 GW. Podíváme-li se na zastoupení jednotlivých technologií na celkovém výkonu (Obrázek 1-1), ne zcela překvapivě zjistíme, že

dominující technologií jsou přečerpávací elektrárny. Z celkového světového instalovaného výkonu úložišť elektrické energie, které jsou připojeny na síť, zastupují přečerpávací elektrárny 99,3 % [2].



Obrázek 1-1 Podíl jednotlivých technologií úložišť na celkovém světovém instalovaném výkonu (MW) v roce 2010 [2]

Zároveň zde nalezneme porovnání některých technologií, které byly zmapovány, z hlediska investičního. Např. graf níže (Obrázek 1-2) porovnává tyto nejběžnější technologie s ohledem na jejich požadavky na počáteční kapitálové investice a technologická rizika ve srovnání s jejich současnou fází vývoje (tj. fáze výzkumu a vývoje, demonstrace a nasazení, nebo fáze běžného komerčního použití).



Obrázek 1-2 Vývoj technologií zabývajících se skladováním energie (2013) [2]

V závěru této práce nalezneme obecné doporučení pro průmysl a vlády zemí, jak postupovat v případě rozšíření infrastruktury úložišť.

1.2.1 Přečerpávací elektrárny

Přečerpávací vodní elektrárny (dále PVE) vychází v tomto srovnání nejlépe. Disponují především dlouhou životností, jednoduchou technologií, nízkými nároky na údržbu a vysokou účinností – účinnost přečerpávacího cyklu přečerpávací elektrárny Dlouhé stráně činí 76,5 % [3].

I když v ČR je potenciál pro postavení nových PVE, v roce 2011 ministerstvo průmyslu a obchodu vytipovalo dokonce 6 dalších lokalit vhodných pro stavbu nových přečerpávacích elektráren, realizace nových projektů ale závisí na tom, zda se najdou soukromí investoři, kteří

budou stavbu platit. Náklady na výstavbu nové PVE se v těchto lokalitách se pohybují mezi 20 až 30 miliardami Kč a zároveň se jedná o nelehký úkol z hlediska developmentu – pro srovnání při výstavbě PVE Dlouhé Stráně pracovalo naráz na staveništi až 1600 dělníků [4] [5].

Další problém, který se pojí s výstavbou nové PVE, je ohlas místních obyvatel a sporný vliv na životní prostředí. Všechny vytipované lokality pro výstavbu nových PVE na území ČR se nacházejí v horských oblastech, které jsou často součástí nebo v blízkosti chráněných krajinných oblastí jako např. Spálená, Slavíč, nebo Šumný důl.

1.2.2 Lithium-iontové baterie

V současné době probíhá velký rozmach lithium-iontových baterií, a to nejen v souvislosti s narůstající elektromobilitou. Staví se velkokapacitní bateriová úložiště, a to především v Číně, která je v tomto směru zemí s vůbec největším podílem elektro-chemických úložišť, nebo ve Spojených státech, kde se v současnosti staví největší bateriové úložiště na světě [6].

Rozvoj lithium-iontových baterií v ČR se zaměřuje především na užití kontejnerových úložišť, které se využívají především v průmyslovém sektoru. Slouží k pokrytí výkonových špiček a zajišťují bezpečnost dodávek elektřiny v případě výpadků [7].

Největší výhodou technologie lithium-iontových baterií je velká hustota energie – 200 Wh/kg. Zároveň se jedná o úložiště, které dokáže najet na plný výkon během pár minut, což je srovnatelné s přečerpávacími elektrárnami [8].

Nevýhodou je ale stále poměrně dost. Životnost baterie je několik let a klesá s větším vybíjecím proudem, s větším napětím, na které je nabíjena, a je závislá na okolní teplotě – s rostoucí teplotou se zmenšuje její maximální kapacita. Při nesprávném použití, či mechanickém poškození hrozí nebezpečí vznícení a výbuchu. Lithium-iontový článek se skládá většinou z LiCoO₂ katody, grafitové anody a tekutého elektrolytu. Kobalt je vzácný a strategický prvek (současná ložiska těžby kobaltu se nachází Rusku, Číně, Austrálii, Demokratické republice Kongo a Zambii), a proto je i poměrně drahý. Zároveň recyklace těchto baterií je poměrně obtížná a nákladná [8] [9].

1.2.3 Průtokové baterie

Problém s životností a recyklací částečně řeší technologie průtokových baterií, kde elektrolyt se skládá z anolytu a katolytu, které jsou od sebe vždy odděleny membránou zabráňující promíchání roztoků, ale umožňující výměnu určitých iontů mezi anodou a katodou. Díky tomu nedochází k degradaci aktivních materiálů v baterii.

Výrobce těchto baterií udává, že po dvaceti let provozu nezpozorovali žádnou degradaci. Po skončení činnosti se průtoková baterie i jednoduše recykluje [10].

Nevýhodou těchto baterií je ale nízká hustota energie, která nepřevyšuje 20 Wh na litr elektrolytu. Na druhou stranu u těchto baterií lze kapacitu lehce navýšit zvětšením objemu nádob s elektrolyty [10].

1.2.4 Vodík

Evropská komise vydala 8.7.2020 dokument nazvaný Vodíková strategie pro klimaticky neutrální Evropu, který je součástí strategie Evropské unie pro hlubší energetickou integraci [11].

Píše se zde o rostoucí pozornosti vodíku v Evropě i ve světě a o jeho roli jakožto vstupní surovině, paliva, nebo právě jakožto nosiče a úložiště energie. Uvažuje se zde o vodíku jako o palivu pro městskou, leteckou i lodní dopravu, zároveň by měl nahradit fosilní paliva v některých uhlíkově náročných průmyslových procesech.

Nalezneme zde několik tvrzení o tom, že Evropská unie se hodlá vydat cestou podpory výroby tzv. čistého vodíku, tj. vodíku, který je vyroben elektrolýzou vody za použití elektřiny pocházející z obnovitelných zdrojů, což je energeticky nejnáročnější metoda výroby vodíku.

„V první fázi od roku 2020 do roku 2024 je strategickým cílem instalovat v EU elektrolyzéry pro výrobu vodíku z obnovitelných zdrojů o výkonu alespoň 6 GW a zahájit výrobu až do výše 1 milionu tun vodíku z obnovitelných zdrojů. V druhé fázi od roku 2025 do roku 2030 se vodík musí stát

neodmyslitelnou součástí integrovaného energetického systému se strategickým cílem instalovat v EU do roku 2030 elektrolyzéry pro výrobu vodíku z obnovitelných zdrojů o výkonu alespoň 40 GW a zahájit výrobu až do výše 10 milionů tun vodíku z obnovitelných zdrojů [12].“

Dá se tedy počítat s tím, že problematika výroby, transportu a skladování vodíku bude čím dál větší téma v následujících letech. Nicméně vodík jako úložiště energie není příliš ideální z hlediska účinnosti.

Účinnost výroby čistého vodíku, o kterém se v dokumentu píše, tedy vodíku vyráběného pomocí elektrolyzy vody se pohybuje okolo 55-60 %, vysokotlaká elektrolyza dosahuje až 85 %. Další energie je potřebná ke stlačení, popř. zkapalnění paliva, kde ztráty dosahují až 35 %. Dále bychom měli uvažovat i ztráty způsobené transportem [13].

Existují dvě metody, jak z vodíku dostat elektrickou energii zpět. Prvním je spalování vodíku ve spalovacím motoru, případně turbíně. Druhou metodou je přeměnit jej přímo na elektrickou energii v palivových článcích. Účinnost palivového článku je obecně v rozmezí 40-60 %, tedy celková účinnost přeměny el. energie na vodík a vodíku zpět na el. energii je pouze okolo 30-40 %, neuvažujeme-li ztráty dané transportem a skladováním [13].

Vodík tedy bude zřejmě hrát velkou roli v logistice a průmyslu a pro jeho výrobu mohou být využity přebytky energie v síti, nicméně jako úložiště energie schopné dodávat výkon do sítě a vykrývat tak denní špičky, regulovat jalovou složku výkonu v síti a poskytovat co nejefektivnější uschování elektrické energie, příliš efektivní není.

1.2.5 Alternativní metody

Vzhledem k problémům, které se pojí s dosavadními řešeními ukládání energie, se nabízí možnost poohlédnout se po jiných, alternativních řešeních.

V továrnách, loděnicích, nebo různých výrobnách, se používají např. rotační setrvačníky, které minimalizují nárazový výkon, který se normálně čerpal přímo ze sítě.

Kapitola sama pro sebe jsou tepelná úložiště, která se mohou používat jednak k dodávce tepla, tak ale i k transformaci energie tepelné na elektrickou. Toto téma ale přesahuje rozsah této práce, a proto se jimi nebudeme dále zabývat.

KAPITOLA 2: MECHANICKÁ ÚLOŽIŠTĚ VYUŽÍVAJÍCÍ POTENCIÁLNÍ ENERGIÍ TÍHOVÉHO POLE

V této kapitole se zaměřím na mechanické úložiště, které využívá potenciální energii tíhového pole. Někdy se tato technologie nazývá i jednoduše jako gravitační úložiště. Nejedná se ovšem o přečerpávací elektrárny, i když princip této technologie je stejný.

2.1 Princip

Stejnak jako u přečerpávací elektrárny nositelem energie je zde hmota. Vodu zde nahrazuje závaží, které získává energii, je-li zvednuto do určité výšky. Samovolným klesáním závaží je energie uvolňována.

Změnu potenciální energii tělesa v tíhovém poli Země můžeme vyjádřit pomocí známého vzorce:

$$\Delta E_p = m \cdot g \cdot \Delta h, \quad (2-1)$$

kde m je hmotnost tělesa, g reprezentuje tíhové zrychlení, Δh je změna výšky tělesa v tíhovém poli.

Princip zní tedy velice jednoduše, ale realizace takového úložiště, aby měla dostatečně velkou kapacitu uschované energie, je složitější. S tíhovým zrychlením nic neuděláme, tedy nezbývá než maximalizovat hmotnost a výšku.

Pro orientaci by bylo vhodné uvést, v jakých měřítkách se pohybujeme. Vezmeme-li v úvahu rozměry mechanického úložiště, které bude mít kapacitu odpovídající 60Ah baterii používané v automobilech (60 Ah při napětí 12 V odpovídá 720 Wh, tedy 2,6 MJ uložené energie) a určíme-li si limitní výšku takového úložiště jako 10 m, dostaneme při zanedbání ztrát, tedy při 100% účinnosti hmotnost zvedaného závaží:

$$m = \frac{E_p}{g \cdot h} = \frac{2,6 \cdot 10^6}{9,81 \cdot 10} = 26\,5003 \text{ kg}. \quad (2-2)$$

Abychom obdrželi ekvivalent 60Ah baterie, museli bychom sestavit soustrojí o velikosti 10 m a hmotnosti závaží 26,5 t, a to neuvažujeme ztráty.

Je otázkou, zda limity dané mechanickou pevností konstrukce, maximálním výkonem výkonových měničů a motorů a dalších technologických problémech, se kterým se tato úložiště potýkají, dovolí, aby mohlo vzniknout účinné a ekonomicky výhodné řešení, které by řešilo problémy uskladňování energie.

2.2 Současné projekty

V této sekci jsou popsány 4 pravděpodobně nejznámější projekty/koncepty v oblasti gravitačních úložišť. Popis je zaměřen spíše na vysvětlení samotné technologie než na ekonomické zhodnocení těchto možných řešení. V závěru u každého projektu naleznete zhodnocení výhod a nevýhod daného řešení. Jedná se o tyto projekty:

- Gravitricity
- Energy Vault
- Gravity Storage/ Gravity Power
- ARES.

2.2.1 Gravitricity

Jedná se o projekt britské společnosti Gravitricity ltd. Koncept jejich řešení spočívá v obsazení již nevyužívaných důlních šachet.

V současnosti realizuje tato společnost demonstrační pilotní projekt (Obrázek 2-1) o výkonu 250 kW. Jedná se o 14,5 m vysokou konstrukci a zvedána jsou zde dvě 25 tunové závaží. Závaží

jsou navíjena uprostřed ocelové konstrukce a navíjecí lano je přivedeno přes kladky na převodovku, která je spojena s motorem/generátorem [14].



Obrázek 2-1 Pilotní project Gravitrlicity [14]

Jedná se o testovací prototyp, který by měl poskytnout data pro realizaci prvního komerčního projektu o výkonu 4 MW, který by měl být už zasazen do bývalé důlní šachty. 25. dubna 2021 společnost ohlásila první úspěšnou dodávku energie do sítě v rámci testování tohoto prototypu [15].

Uložení podobného systému do již existující šachty by znamenalo odstranění problémů výškové konstrukce a navýšení celkové kapacity, neboť vertikální důlní šachty bývají hluboké i stovky metrů.

V roce 2019 vyšla studie [16] zabývající se využití této technologie v případě instalace zařízení do opuštěných, vertikálních důlních šachet, kterých je ve Východních a Západních Midlands ve Velké Británii celkem 38370. Z těchto 38370 šachet autoři analyzovali pouze 3234, jelikož o ostatních neměli informace, co se týče průměru a hloubky šachet. Výsledkem této studie je 340 šachet, které by mohly být transformovány na úložiště energie s kapacitou odpovídající nad 1 MWh za předpokladu, že by závaží vážilo 3000 tun.

V roce 2013 si Gravitrlicity nechala zaregistrovat patent [17] popisující velice obecně princip tohoto zařízení. Na rozdíl od demonstrujícího projektu se v patentu kombinuje jak ukládání energie v podobě navíjeného tělesa, tak i ukládání energie v podobě stlačeného vzduchu (CAES), kde nádobu, kde by měl být vzduch stlačován, reprezentuje samotná šachta.

Celý systém podle patentu obsahuje:

- šachtu, uzavřenou tak, aby nedocházelo k únikům tlaku stlačeného vzduchu
- zvedaný objekt z nedefinovaného materiálu
- podpůrný systém lan vystředující zvedaný objekt uvnitř šachty
- motor/generátor
- převodovku
- navíjecí buben
- kompresor, který zároveň funguje jako expandující turbína
- tepelný výměník a zásobník tepla využívající teplo vzniklé stlačováním vzduchu
- měřící a řídicí techniku

Na svých stránkách se ale Gravitrlicity o kombinaci CAES a gravitačního úložiště nezmiňuje a podle pilotního projektu to spíše vypadá, že se chystá realizovat úložiště využívající pouze tíhovou energii.

2.2.1.1 Parametry

Parametry zařízení, které by mělo být instalováno do bývalých důlních šachet, by měly být následující:

- 25letý provoz bez ztráty účinnosti
- okamžitý výkon až 20 MW
- hmotnost závaží až 5000 tun
- jmenovitá kapacita typicky 10 MWh podle hloubky důlní šachty
- doba rozběhu na maximální výkon do 1 s
- účinnost mezi 80-90 %

2.2.1.2 Výhody a nevýhody

Mezi výhody určitě patří možnost zužitkovat opuštěné důlní šachty po těžbě, což vede ke snížení celkových nákladů.

Další výhodou je velice krátká doba rozběhu na maximální výkon a poměrně vysoký výkon v porovnání s ostatními projekty.

Jednoduchá konstrukce znamená menší počet mezičlenů, které zprostředkovávají transformaci energii a tím i snižuje nároky na údržbu.

V důlních šachtách se musí pravidelně odčerpávat podzemní voda, což znamená zavedení dalšího členu do soustavy – čerpadlo schopné odčerpávat vodu ze dna šachty. Naskytuje se tedy problém – čím větší kapacita úložiště, tím větší hloubka šachty a tím větší výkon čerpadla, což vede ke zvýšení nákladů a nároků na údržbu.

Maximální hmotnost závaží uváděná projektanty jako 5 000 tun klade velké mechanické nároky na všechny prvky konstrukce – převodovku, motor, hřídel, navíjecí a upevňovací lana, mechanické brzdy atd. Nicméně nejvýkonnější portálový jeřáb na světě je schopný zvednout až 20 000 tun, realizace tedy bude určitě obtížná, ale ne nemožná [18].

2.2.2 Energy Vault

Koncept švýcarské společnosti Energy Vault (Obrázek 2-2) se zakládá na operování s jednotlivými betonovými bloky. Jeden samostatný blok by měl vážit 35 tun. Manipulaci s těmito bloky by měl zařídit 6 ramenný jeřáb, který má na každém rameni jeden pohon konající pohyb posuvný po rameni jeřábu a zároveň schopný navíjet, či spouštět závaží v podobě betonových bloků.

Principem tohoto konceptu je skládání betonových bloků na sebe v okolí jeřábu – v případě dostatku energie v síti jeřáb bere betonové bloky nejprve nejdále vzdálené od středu a přesunuje je do vyšší polohy směrem blíž ke středu jeřábu. V případě potřeby generovat energii jeřáb uchytí závaží směrem nejbliž ke středu jeřábu a spustí jej do řady, která je nejméně zaplněná.

System skládání bloků by měl fungovat samostatně a reagovat tak na potřeby sítě.



Obrázek 2-2 Přechod ze stavu s nejvyšší energií (nalevo) do stavu s nejnižší energií (napravo) [19]

2.2.2.1 Parametry

Výrobce udává následující parametry [19]:

- životnost 30-40 let
- maximální okamžitý výkon 4 MW
- jmenovitá kapacita 35 MWh
- doba rozběhu na maximální výkon 2,9 s

2.2.2.2 Výhody a nevýhody

Mezi výhody tohoto systému se dá počítat relativně vysoká jmenovitá kapacita vzhledem k ostatním projektům v této kapitole.

V ilustračním videu, kde společnost představuje tento projekt, je umístěno toto zařízení přímo uprostřed parku větrných turbín, kde logicky bývá rychlost větru většinu času relativně vysoká a s rostoucí výškou od povrchu země přibývající. Nabízí se tedy otázka, jak je vyřešen problém se spuštěním či zvedáním závaží v takových podmínkách, když závaží je uchyceno pouze pomocí navíjecího lana a výška konstrukce je udávána jako 120 m. Není samozřejmě podmínkou stavět takovéto zařízení v blízkosti větrného parku, nicméně obecně platí, že s rostoucí výškou od zemského povrchu se rychlost větru logaritmičtě zvyšuje. Otázka vlivu větru na stabilitu celé soustavy a kývání během spouštění/navíjení je nezanedbatelná a tím pádem i limitující [20].

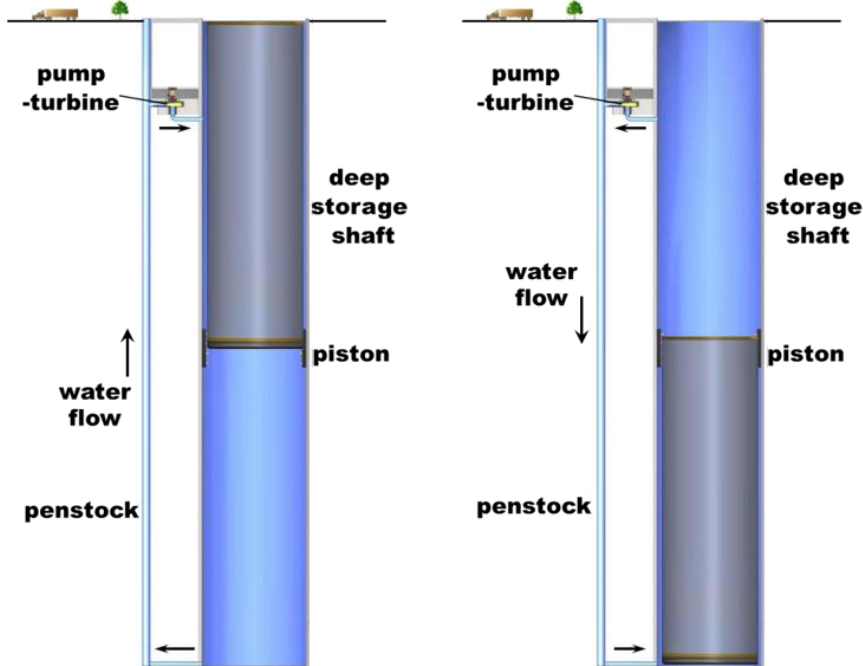
Dalším možným problémem, se kterým se budou muset projektanti vypořádat, je spojitá dodávka výkonu. V případě, že by mělo toto zařízení dodávat do sítě maximální výkon, muselo by pracovat 6 generátorů najednou. To ale znamená, že poté, co by dopadlo všech 6 bloků do polohy s minimální energií (pro představu tělesu padající volným pádem ze 120 m trvá necelých 5 s, než dopadne na zem), by byla přerušena dodávka výkonu do sítě a jeřáby by se musely navinout zpět, uchytit další závaží atd. Pokud bychom chtěli dodávat spojitý výkon do sítě, musel by pracovat jenom určitý počet generátorů, aby došlo k tomu, že nikdy nebude přerušena dodávka. To limituje maximální výkon. Kvůli nedostatku informací o parametrech soustrojí nelze určit, jestli udávaných 6 MW okamžitého výkonu počítá se spojitou, nebo nespojitou dodávkou.

2.2.3 Gravity Storage/Gravity Power

Jedná se o dva téměř identické koncepty gravitačního úložiště, které kombinuje základní princip úložiště gravitační energie s hydraulikou.

Principem technologie je hydraulické zvedání masivního pístu a samovolný pokles pístu uvnitř dutiny. Pracovní látkou je zde voda, která je pomocí čerpadel hnána z nádrže na povrchu do prostoru pod pístem, který je v zapouzdřené nádobě pod povrchem. Jak je voda hnána pod píst, dochází ke zdvihu pístu a nárůstu tlaku. Energie a tlak je maximální, je-li píst ve své krajní poloze

směrem k povrchu. Koncept Gravity Storage (Obrázek 2-3) dokonce předpokládá, že píst je schopen se zvedat nad povrch. Ke generování výkonu dochází tak, že tlak způsobí proud vody opačným směrem přes turbínu, až se voda dostává zpět do horní nádrže.



Obrázek 2-3 Koncept technologie Gravity Power [21]

2.2.3.1 Parametry

Gravity Storage udává na svých stránkách obecné technické parametry pro 3 různé varianty úložiště [22]:

- jmenovitá kapacita: 1, 3, nebo 8 GWh
- průměr pístu: 150, 200, nebo 250 m
- objem vody potřebné ke zdvihu pístu: 1,340; 2,380; nebo 5,990 mil. m³
- maximální tlak uvnitř systému: 41, 67, nebo 71 bar
- účinnost 80%

Současný stav projektů obou společností, navrhující toto podobné řešení, je pouze ale ve fázi konceptu.

Gravity Storage ke konci roku 2020 vstoupila do insolvenčního řízení a prodala své patenty jiné společnosti, která v současné době hledá investory na realizaci pilotního projektu [22].

Gravity Power ke konci roku 2017 provedla zkušební vrt blízkosti města Weilheim v Bavorsku s cílem analyzovat geologickou strukturu. V březnu 2020 společnost ohlásila pozitivní výsledky z tohoto testu, zároveň ohlásila, že probíhá testování technologie těsnění. Od té doby ale žádná zpráva z vývoje nezazněla [23].

2.2.3.2 Výhody a nevýhody

Svého oblíbení se toto řešení zatím neujalo pravděpodobně z několika důvodů. Obecně se problémy pojí s celkovou velikostí zařízení. Důvodem, proč koncept počítá s tak masivními rozměry, je rozpočet nákladů. Podle projektantů Gravity Storage roste kapacita takového úložiště se čtvrtou mocninou poloměru pístu, zatímco náklady rostou pouze s druhou mocninou [22].

Výstavba takového zařízení musí být umístěná na pevném podloží. Nejmenší verze konceptu Gravity Storage počítá s pístem o průměru 150 m, což je 1,25násobek délky fotbalového hřiště. Najít takovou plochu s pevným podložím asi nebude jednoduchý úkol. Zároveň samotná stavba tak ohromného pístu je další výzvou.

Dalším masivním parametrem, který je klíčový k výstavbě, je objem vody potřebné k fungování celého systému. V případě nejvyšší kapacity, tj. verzi o kapacitě 8 GWh, je potřeba provozní objem vody necelých 6 miliard m³, což je více jak dvojnásobek celkového objemu PVE Dlouhé Stráně [3].

Další technickou výzvou je problém s těsněním, a to jednak těsnění postranních „zdi“ kolem pracovního pístu, neboť každá skála obsahuje praskliny, kudy může odtékat voda, tak těsnění mezery mezi pístem a skálou kolem pístu. Pracovní tlak dosahuje u největší varianty až 71 bar. Gravity Storage navrhuje pro těsnění prostoru mezi pístem a okolím pístu membránové prvky, podobně jako dopravní pásy používané v těžebním průmyslu, které se skládají z vulkanizované gumy vyztužené ocelovými lany nebo aramidovými vlákny [22].

2.2.4 ARES

ARES (Advanced Rail Energy Storage) je americká společnost zabývající se od roku 2010 gravitačními úložišti energie na principu pohybujících se vozů na izolované trati.

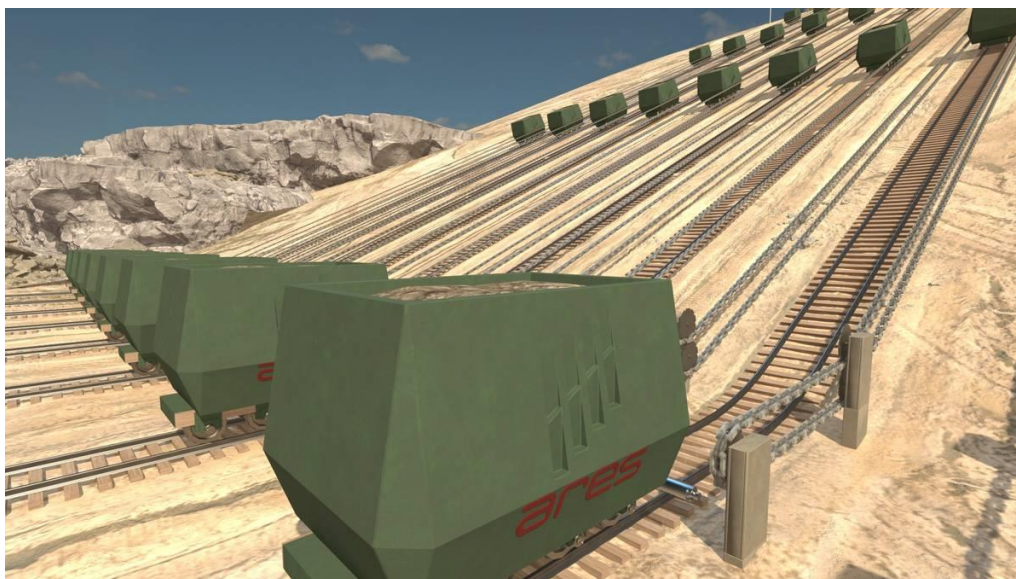
Původní prototyp (Obrázek 2-4) zahrnoval železniční trať s určitým sklonem a vozíky, které se po trati pohybovaly, každý měl svůj motor a zároveň betonové bloky tvořící většinu hmotnosti. U tohoto prototypu se ale vyskytovaly problém s trakcí při vyšších úhlech naklonění svahu, a proto byl nahrazen soustavou vozíků bez motoru a řetězovým pohonem [24].



Obrázek 2-4 První prototyp spol. ARES [25]

Jeich nová verze gravitačního úložiště, tzv. GravityLine (Obrázek 2-5), počítá s následujícím návrhem. Železnice, po které se pohybují vozíky s hmotou, vede přes plošinu, svah a končí zase na plošině. Na vrchu kopce je plošina, kde se vyskytují vozíky s největší polohovou energií. Následuje svah (různé délky, o různém sklonu, podle aplikace), kde jsou vozíky spouštěny, nebo naopak táhnuty pomocí řetězového systému a motorů, které se nachází na horní plošině. Jakmile vozík opouští svah, ocitá se na dolní plošině, kde má nejmenší energii.

Pohon, který pohání řetězovou soustavu, na které se může naráz ocitát i několik vozíků najednou, je složen ze 6, nebo 8 elektromotorů/generátorů. Na svahu může být umístěno i několik železnic vedle sebe, čímž se zvětšuje celkový výkon a kapacita soustavy.



Obrázek 2-5 Koncept nového prototypu vznikající poblíž města Pahrump v Nevadě [25]

V prosinci roku 2020 byla zahájena stavba nové verze tohoto projektu poblíž města Pahrump v Nevadě. Celá stavba by neměla zabrat více jak 20 akrů plochy a měla by být dokončena koncem roku 2021 [25].

2.2.4.1 Parametry

Projekt vznikající poblíž města Pahrump se bude skládat z celkem 10 modulů tvořící soustavu trať-motor-vozíky, kde jedna soustava by měla mít podle výrobce následující parametry [26]:

- okamžitý výkon až 5 MW
- jmenovitá kapacita 1,25 MWh
- hmotnost jednoho vozíku až 326 tun
- rozměry vozíku: 6,1×4,9× 4,5 m
- doba rozběhu na maximální výkon: 3 s
- životnost: nad 40 let
- účinnost: větší než 80%

2.2.4.2 Výhody a nevýhody

Velikou výhodou tohoto systému je jeho flexibilita. Systém je možné rozšířit o další moduly reprezentující železnici, motor a soustavu vozíků. Celkově je tak možné dosáhnout podle výrobce až 1 GW okamžitého výkonu a kapacity 250 MWh [26].

Zároveň je tak možné rozdělit hmotnost do více samostatných modulů, místo koncentrování celkové hmotnosti do jednoho celku, čímž se jednak zvyšuje schopnost regulace a zároveň se zmenšují nároky na pevnost materiálů tvořící tažnou soustavu.

Další možnou výhodou podle výrobce je použití řetězového pohonu místo lan a kabelů, čímž odpadají problémy spojené s dilatací, oscilací a opravou těchto lan [26].

Použití svahu namísto výškové konstrukce, či hloubkové šachty, zvyšuje stabilitu a nezávislost systému.

Nevýhodné může být větší počet prvků v soustavě. Např. jeden pohon, který navívá řetěz s vozíky, se skládá ze 6 až 8 samostatných motorů – v případě projektu poblíž města Pahrump takových motorů bude potřeba 60 až 80.

2.3 Shrnutí

Obecnou charakteristiku a hlavní výhody/nevýhody mechanických úložišť využívající potenciální energii tíhového pole můžeme na základě parametrů projektů v předchozí sekci popsat v následujících bodech:

- rychlá odezva na změnu požadovaného výkonu a doba rozběhu na maximální výkon řádově v jednotkách sekund
- vysoký maximální výkon
- vysoká účinnost, typicky kolem 80 %
- dlouhá životnost a nízké nároky na údržbu
- vysoké kapitálové náklady v poměru s instalovanou kapacitou v porovnání např. s lithium-iontovými bateriemi, které ale s rostoucí kapacitou zařízení rostou pomaleji [27]
- srovnatelné náklady v poměru s instalovaným výkonem v porovnání s lithium-iontovými bateriemi [27]

Gravitační úložiště pravděpodobně nebudou to nejvhodnější řešení pro delší odběr výkonu ze sítě, např. v případě ostrovních režimů, nebo jako záložní zdroje do domácností. Mnohem větší potenciál ale mají v případě primární regulace frekvence sítě, a to z důvodu rychlé odezvy na změnu výkonu, tak díky vysokému výkonu, které jsou schopny v krátkém intervalu poskytnout. To může být využito pro vykrytí výkonových špiček při rozběhu strojů v rámci např. výrobních hal, nebo při rozběhu elektráren, nebo v případě náhlé změny výkonu z obnovitelných zdrojů.

Pro posouzení využitelnosti gravitačních úložišť bude nezbytné provést detailnější ekonomickou analýzu, která porovná gravitační úložiště s ostatními řešeními z hlediska finanční návratnosti.

KAPITOLA 3: NÁVRH MECHANICKÉHO ÚLOŽIŠTĚ VYUŽÍVAJÍCÍ POTENCIÁLNÍ ENERGII TÍHOVÉHO POLE

V této kapitole je popsán návrh jednoduchého demonstračního modelu úložiště, které využívá potenciální energii tíhového pole.

K ujasnění vztahů mezi elektrickými a mechanickými veličinami byl nejprve realizován matematický model v nadstavbě programu MATLAB-Simulink od společnosti MathWorks.

Na základě výsledků simulací z matematického modelu byl sestaven experimentální demonstrační model úložiště.

3.1 Odvození matematického modelu

Model vychází ze zadaných parametrů, tj. ze zadané výšky konstrukce a z hmotnosti seismické hmoty. Výška konstrukce měla být 2 m a seismická hmota by měla vážit 20 kg. Zároveň princip činnosti modelu měl být co nejjednodušší a pokud možno jednoduše realizovatelný, neboť v čase zadání a po průběh práce byl omezen vládními opatřeními ohledně epidemické situace.

Z důvodu jednoduchého řízení jsem se rozhodl zvolit jako nejdůležitější součást zařízení, motor/generátor stejnosměrný motor s permanentními magnety v buzení. Pro sestavení jak matematického modelu, tak následně experimentálního modelu bylo nejprve potřeba popsat chování zařízení pomocí jasně definovaných vztahů mezi mechanickými a elektrickými veličinami v modelu.

3.1.1 Mechanická část matematického modelu

Soustrojí motor/generátor, převodovku a zátěž v podobě závaží můžeme popsat pomocí pohybové rovnice, která vychází z mechaniky, konkrétně z d'Alembertova principu:

$$\sum_{i=1}^n M_i + M_d = 0, \quad (3-1)$$

kde M_i jsou hnací a zátěžné momenty (N·m) a M_d je dynamický moment (N·m) [28].

Dynamický moment rozepíšeme jako:

$$M_d = J \cdot \frac{d\Omega}{dt}, \quad (3-2)$$

kde J je moment setrvačnosti soustavy ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$) a Ω je úhlová rychlost soustavy (s^{-1}).

Použijeme-li metodu redukce sil a hmotnosti můžeme nahradit celou analyzovanou soustavu jedním fiktivním tělesem, které se otáčí stejnou úhlovou rychlostí Ω_1 , na které působí jeden hnací moment M_C a jeden zátěžný moment M_{ZC} a které má jeden moment setrvačnosti J_C . Pro takovou soustavu bude platit pohybová rovnice v následujícím tvaru:

$$M_C - M_{ZC} = J_C \cdot \frac{d\Omega_1}{dt}, \quad (3-3)$$

V motorickém režimu, kdy taháme závaží směrem nahoru, představuje hnací moment od motoru a zátěžný moment od závaží. Pro generátorový režim můžeme na soustavu nahlížet opačně: zátěž nyní představuje motor a hnací moment způsobuje spouštěné závaží.

Rovnice (3-3) popisuje ale idealizovaný případ. V reálném zařízení budou přeměny energie doprovázeny ztrátami. V našem případě se bude jednat především o mechanické ztráty v převodovce a ztráty v elektrickém stroji.

Zavedeme do modelu mechanické ztráty v převodovce přidáním dalšího členu do rovnice (3-3):

$$M_C - M_{ZC} = J_C \cdot \frac{d\Omega_1}{dt} + B \cdot \Omega, \quad (3-4)$$

kde B představuje koeficient viskózního tření ($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$).

Pro velikost momentu, kterým působí závaží na hřídel motoru za převodkou, můžeme napsat následující vztah:

$$M_z = F_G \cdot r = m \cdot g \cdot r, \quad (3-5)$$

kde r je vzdálenost působíště síly F_G od osy otáčení hřídele (m), m je hmotnost závaží (kg) a g je velikost tíhového zrychlení ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$).

Hřídel motoru a hřídel motoru za převodkou se ale otáčejí různými rychlostmi. Pokud bychom chtěli vyjádřit velikost momentu, kterým působí závaží přímo na hřídel motoru, je třeba pomocí metody redukce sil a hmotností přepočítat velikost tohoto momentu na:

$$M_{zred.} = \frac{M_z}{i \cdot \eta_T} = \frac{M_z \cdot \Omega_2}{\Omega_1 \cdot \eta_T} \quad (3-6)$$

kde Ω_2 je úhlová rychlost hřídele za převodkou (s^{-1}), Ω_1 je úhlová rychlost hřídele motoru (s^{-1}) a η_T je účinnost převodky (-).

3.1.2 Elektrická část matematického modelu

Pro moment elektrického stroje s permanentními magnety v buzení za předpokladu, že se pohybuje pouze v lineární oblasti magnetizační charakteristiky, platí následující vztah:

$$M = k \cdot I, \quad (3-7)$$

kde k je tzv. konstanta motoru, která je rovna součinu konstrukční konstanty motoru C a hodnoty magnetického toku Φ . Stejná konstanta se používá i pro vztah mezi indukovaným napětím a otáčkami motoru:

$$U_i = k \cdot \Omega, \quad (3-8)$$

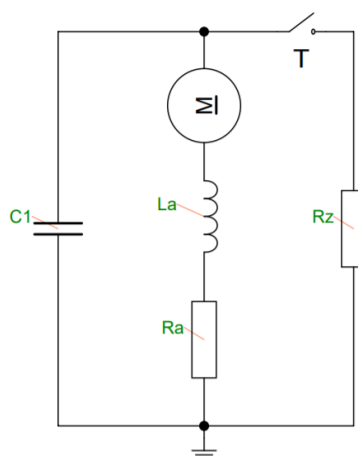
proto se můžeme setkat se dvěma různými jednotkami pro konstantu, která má stejnou velikost ($\text{N} \cdot \text{m}/\text{A}$, $\text{V} \cdot \text{s}$).

Pokud bychom chtěli modelovat elektrické ztráty u běžného elektrického stroje, museli bychom zahrnout několik elementů jako např. ztráty ve vinutí, ztráty v komutátoru či sběracích kroužcích, ztráty v magnetickém obvodu apod. Zavést tak komplexní ztráty do matematického modelu by bylo příliš složité pro účel této práce, a proto byly zjednodušeny pouze na ztráty ve vinutí, které můžeme vyjádřit podle následujícího vztahu:

$$P_{el} = R_a \cdot I^2, \quad (3-9)$$

kde R_a je odpor vinutí kotvy (Ω) a I je proud protékající kotvou (A).

Pro simulaci elektrických jevů, které budou probíhat v obvodu během generátorického režimu, byl sestaven následující elektrický obvod (Obrázek 3-1).



Obrázek 3-1 Elektrické schéma simulovaného obvodu

M představuje motor v generátorickém režimu. L_a je náhradní indukčnost vinutí rotoru, R_a je odpor vinutí rotoru. C_1 je kondenzátor paralelně připojený ke svorkám motoru, který má funkci omezit napěťové špičky tvořené spínáním indukčnosti pomocí spínače T .

R_z zde simuluje zátěž, která odebírá energii z generátoru a z kondenzátoru podle polohy spínače T . Velikost odporu byla navolena tak, aby generátor pracoval co možná s největší účinností.

Obvod můžeme popsat, podíváme-li se na situaci z pohledu polohy spínače T .

Když bude spínač T rozepnutý a uvažujeme-li, že napětí na kondenzátoru C_1 je v čase $t = 0$ nulové, dostaneme následující rovnici:

$$U_i(t) - \frac{1}{C} \int i(t) dt - R_a \cdot i(t) - L_a \cdot \frac{di(t)}{dt} = 0 \quad (3-10)$$

Sepneme-li spínač T , musí platit, že na kondenzátoru, na motoru a na zátěžném odporu bude stejné napětí:

$$\frac{1}{C} \int i_c(t) dt = U_i(t) - R_a \cdot i_a(t) - L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} = R_z i_{Rz}(t) \quad (3-11)$$

Vztah mezi proudy v této rovnici popisuje rovnice:

$$i_{Rz}(t) = i_a(t) - i_c(t) \quad (3-12)$$

Přepínáním polohy spínače T regulujeme velikost proudu i_a , dosadíme-li i_a do rovnice (3-7), je vidět, že změnou proudu regulujeme velikost momentu motoru, který má v generátorickém režimu brzdny účinek.

Spínáním spínače T tak můžeme regulovat velikost střední hodnoty brzdného momentu motoru a tím pádem i velikost střední hodnoty elektrického výkonu dodávaného do zátěže – odporu R_z .

3.1.3 Výsledný matematický model

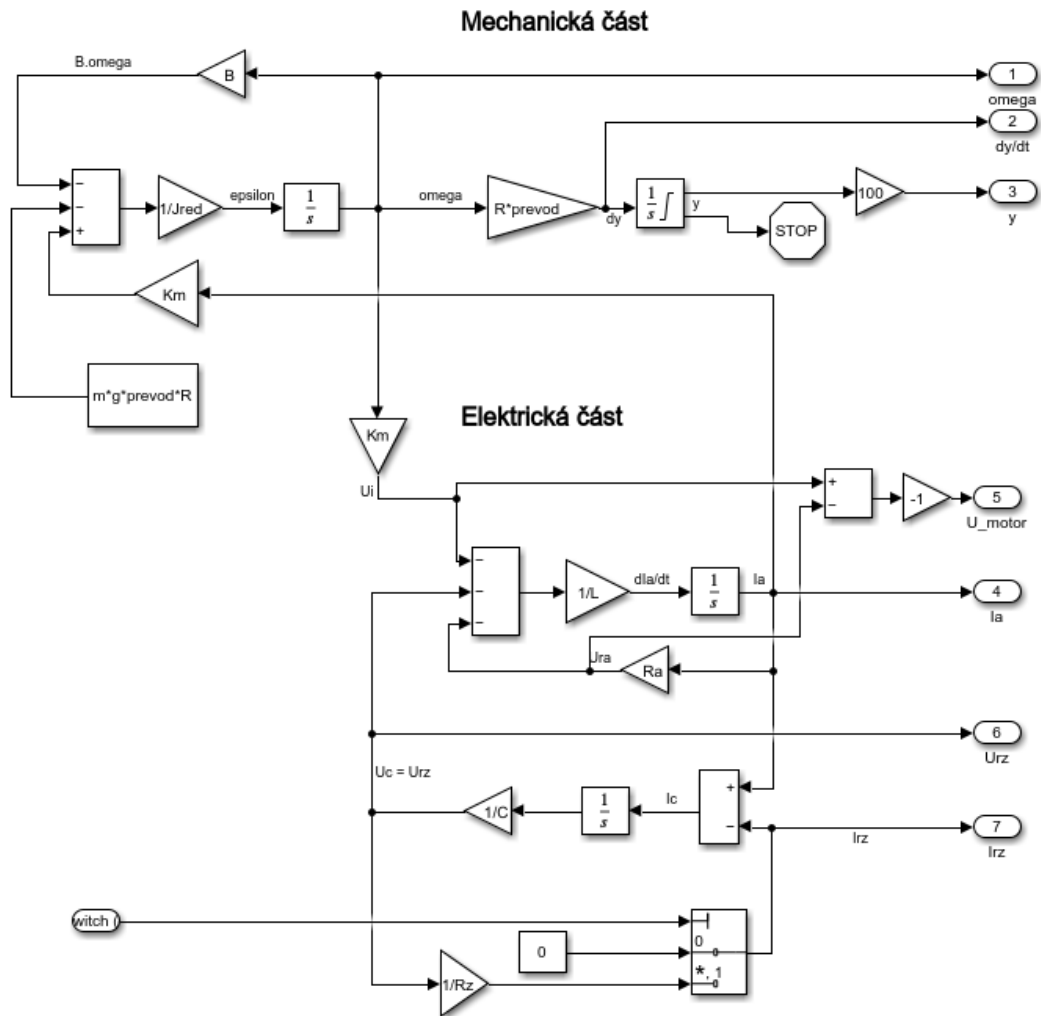
Rovnice výše popsané byly použity k vytvoření matematického modelu v programu MATLAB-Simulink (Obrázek 3-2, Obrázek 3-3) a byly doplněny o konstanty, které se vyskytují v těchto rovnicích. Velikosti konstant byly určeny ze zadání a z katalogu motoru, který byl následně pořízen, případně byly doměřeny. Některé konstanty musely být odhadnuty z důvodu nedostatku informací z katalogu motoru a nedostatku času a prostředků, které by byly potřebné k jejich zjištění. Odhadnut byl celkový moment setrvačnosti J_c a náhradní indukčnost vinutí rotoru L_a .

K demonstraci funkce modelu byly navrženy dva pracovní režimy generátoru:

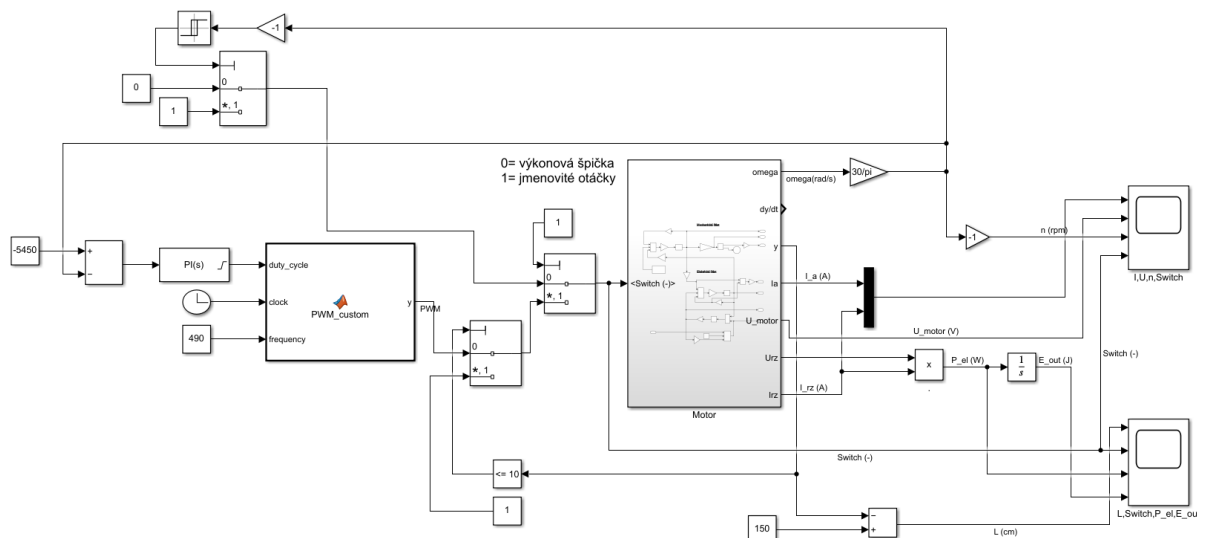
První režim byl navržen tak, aby pomocí vhodného spínání spínače T udržoval generátor jmenovité otáčky. Toho bylo docíleno pomocí PI regulátoru, který byl importován z příslušné knihovny. Tento režim měl simulovat schopnost úložiště měnit výkon podle potřeby, kde výkon je měněn na základě požadované hodnoty otáček generátoru.

Druhý režim měl demonstrovat schopnost gravitačního úložiště generovat vysoký výkon v krátké době. Z toho důvodu bylo navrženo řízení, které nejprve nechá stroj rozběhnout volným pádem na vyšší otáčky než jmenovité ($8000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$), tak aby se stroj nacházel stále v oblasti bezpečných otáček, a poté dojde k sepnutí spínače T . Výsledky simulace jsou zobrazeny přímo v programu.

Následující kód (Obrázek 3-2, Obrázek 3-3) je k dispozici v příloze.



Obrázek 3-2 Simulační model motoru v programu MATLAB-Simulink



Obrázek 3-3 Pohled na celkový model gravitačního úložiště v programu MATLAB-Simulink

3.2 Popis realizace experimentálního modelu

3.2.1 Konstrukce

Původní návrh konstrukce se skládal ze svařených ocelových jechlů a soustavy kladek, nicméně z důvodu možného zpoždění termínů kvůli nejisté situaci týkající se vládních opatření byla konstrukce zjednodušena.

Nová verze konstrukce je mobilnější než předchozí. Elektrické součástky jsou připevněny k dřevěnému podstavci, který je sešroubovaný s ocelovým profilem. Profil byl následně upevněn pomocí závitových tyčí a šroubovacích háků k traverze, která je součástí zahradního altánu, kde byl experiment následně proveden. Výška od země k místě uchycení zařízení k traverze byla okolo 2 m.

3.2.2 Naviják

Naviják byl vyroben z mosazné hřídele. Poloměr hřídele byl navrhnut tak, aby společně s tloušťkou lana tvořil rameno síly takové, aby velikost momentu, kterým působí závaží na osu hřídele, odpovídala jmenovitému momentu motoru.

Na jednom konci hřídele byla do mosazného nástavce vysoustružena díra o rozměrech odpovídající hřídeli motoru, na kterou byl naviják nasazen. Připevnění ke hřídeli motoru bylo realizováno dvěma šrouby, které tlačí na plochou stranu hřídele motoru. Na jeden z těchto šroubů bylo i upevněno navijecí lano. Druhý konec byl přichycen k ložiskovému domku typu UCP, který je spojen s podstavcem.

Jako navijecí lano bylo použito ocelové lanko o průměru 2 mm. Jedná se o dostatečně pevné a ohebné lanko, které díky své malé tloušťce je možné navinout na menší vzdálenost navijecího nástavce než lanka z jiných materiálů.

3.2.3 Závaží

Pro výrobu závaží o hmotnosti 20 kg byly použity čtyři pětikilové kotoučové závaží k činkám. Dohromady byly spojeny pomocí závitové tyče a příslušných upevňovacích součástí. Kotoučová závaží jsou vyrobena ze železa, povrch je potáhnut vrstvou plastu.

Během testování bylo nutné přidat další závaží o hmotnosti 2,5 kg navyšující tak celkovou hmotnost závaží na 22,5 kg.

3.2.4 Realizovaný obvod

Zjednodušený simulační obvod byl doplněn o prvky měření a řízení, přepínací relé a zdroj napětí.

Spínač T byl realizován pomocí unipolárního tranzistoru typu MOSFET s indukovaným kanálem N. K tranzistoru je upevněn pasivní chladič.

Měřicí prvky zahrnují měření proudu kotvou motoru, měření napětí na svorkách motoru a mezi svorkami Drain a Source u tranzistoru. Měření napětí je realizováno pomocí odporových děličů, které se skládají z rezistorů s minimální hodnotou tolerance. Analogové vstupy mikrokontroléru jsou chráněny Zenerovými diodami se závěrným napětím 5,1 V. Proud zátěžným rezistorem je dopočítán z rozdílu naměřených napětí a ze známé hodnoty odporu rezistoru. Pro měření proudu kotvou byl použit měřicí modul ACS712, který měří proud pomocí hallových senzorů. Tento způsob měření byl vybrán za cenu menší přesnosti zejména kvůli velké proudové špičce, která se objeví, připne-li se motor ke zdroji napětí.

Pomocí rotačního enkodéru, kterým je vybaven motor, jsou měřeny otáčky motoru, ze kterých se následně dopočítává uražená vzdálenost. Rotační enkodér je vybaven dvěma hallovými sondami, které posílají každá 5 pulzů za jednu otáčku motoru. Signály jsou vzájemně posunuté o 90 °. K realizaci modelu byla ale využita pouze jedna sonda, neboť nebylo potřeba znát směr otáčení a ušetřil se tak výpočetní výkon mikrokontroléru.

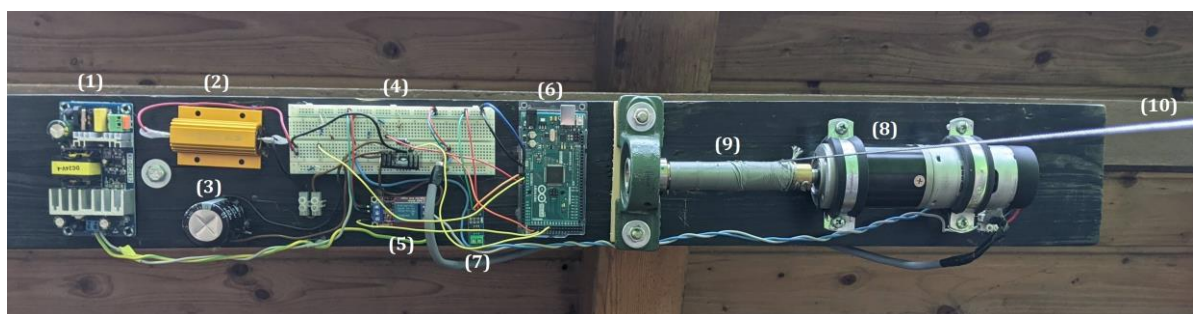
Při vybírání vhodného kondenzátoru byl kladen důraz především na kapacitu. Z toho důvodu byl vybrán elektrolytický kondenzátor, který má větší kapacitu než ostatní typy kondenzátoru.

Kondenzátor je chráněn proti přepólování jednak přepínacím relé, které přepíná svorku motoru mezi zdrojem napětí a obvodem obsahující zátěžným odpor a kondenzátor. Další ochranou proti přepólování je zabudovaná dioda v pouzdru MOSFETu. Pro jistotu byla mezi svorkou Source a Drain zapojena ještě jedna vhodně dimenzovaná dioda, která by měla zapůsobit, dojde-li k poškození MOSFETu.

Řídicí úlohu zprostředkovává vývojová deska Arduino Mega 2560 rev3, která je napájena ze samostatného adaptéru a která je připojena pomocí kabelu USB k notebooku.

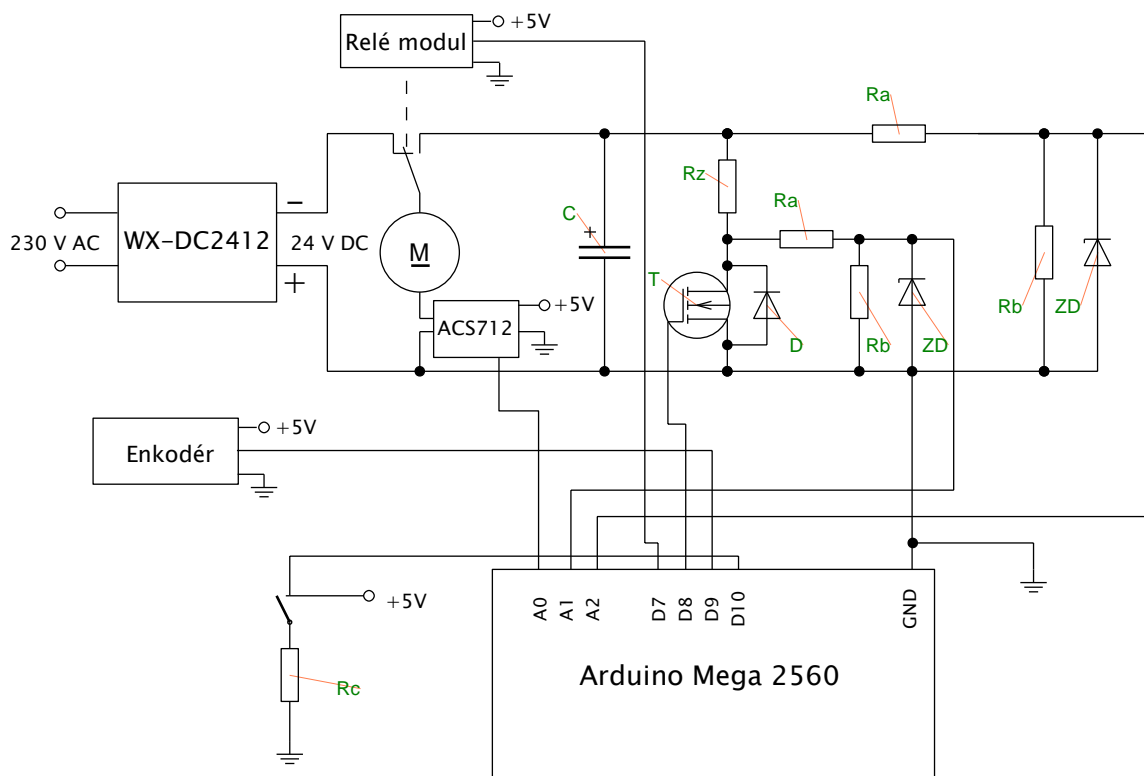
Propojení jednotlivých součástek bylo provedeno pomocí nepájecího kontaktního pole a svorkovnic. Součástky byly k podstavci přilepeny tavnou pistolí. Motor a ložisko byly s podstavcem sešroubovány.

Experimentální model byl vyfocen a následně popsán (Obrázek 3-4).



Obrázek 3-4 Realizovaný experimentální model (1 - zdroj, 2 - výkonový rezistor, 3 - kondenzátor, 4 - nepájivé pole s tranzistorem, diodou a odporovými můstkami, 5 - přepínací relé, 6 - Arduino Mega, 7 - měřící modul proudu, 8 - motor s enkodérem, 9 - navíjecí buben, 10 - ocelové lanko se závažím)

Součástky popsané v předchozích odstavcích byly nakresleny do detailnějšího elektrického schématu (Obrázek 3-5). Použité součástky jsou sepsány v tabulce (Tabulka 3-1).



Obrázek 3-5 Schéma elektrické části experimentálního modelu

Tabulka 3-1. Seznam použitých součástek a modulů

Značka ve schématu	Typ součástky	Funkce v obvodu	Dodatečné informace
WX-DC4212	zdroj stejnosměrného napětí	napájení motoru	230 V AC → 24 V/4 A DC
Relé modul	relé modul s optickým oddělením	přepínač mezi motor. a generátor. režimem	High/Low trigger
Enkodér	Magnetický enkodér s hallovými sondami	čítač otáček motoru, odměřování vzdálenosti	2 senzory posunuté o 90 °, zapojen pouze 1
M	stejnosměrný motor s převodovkou	motor/generátor	podrobněji popsáno v samostatných tabulkách
ACS712	modul měření proudu	měření proudu kotvy	rozsah ± 20 A, citlivost: 66–185 mV/A
Arduino Mega 2560	mikrokontrolér	řídící jednotka	verze Rev3
C1	elektrolyt. kondenzátor	optimalizace chodu motoru	C = 15 mF, prac. napětí 50 V DC
T1	MOSFET s kanálem N	spínání odporové zátěže	označení AOT284L
D	dioda	ochrana vstupu a přepólování kondenzátoru	označení BY550-600
ZD	Zenerova dioda	ochrana analogového vstupu	označení BZX85/C5V1
Ra	metalizovaný rezistor	součást odporového děliče	$R_a = 8,2 \text{ k}\Omega$, $tol. = 0,1\%$, $P_{max} = 0,6 \text{ W}$
Rb	metalizovaný rezistor	součást odporového děliče	$R_b = 1 \text{ k}\Omega$, $tol. = 0,1 \%$, $P_{max} = 0,6 \text{ W}$
Rz	výkonový rezistor drátový s chladičem	simulace zátěže	$R_z = 10 \Omega$, $tol. = 5 \%$, $P_{max} = 100 \text{ W}$
Rc	metalizovaný rezistor	součást obvodu přepínače	$R_c = 10 \text{ k}\Omega$, $tol. = 5 \%$, $P_{max} = 0,6 \text{ W}$

Parametry použitého motoru s převodkou jsou popsány detailněji v samostatných tabulkách níže (Tabulka 3-2, Tabulka 3-3). Parametry byly získány z webové stránky dodavatele [29].

Tabulka 3-2 Parametry použitého motoru

Označení	PG520-24-66-BE
Jmenovité napětí [V]	24
Jmenovitý moment [kg·cm]	0,65
Jmenovité otáčky [ot·min ⁻¹]	5450
Jmenovitý proud [mA]	≤2750
Proud naprázdno [mA]	≤750
Jmenovitý výkon [W]	48,3
Hmotnost [g]	1330
Maximální účinnost	67 %

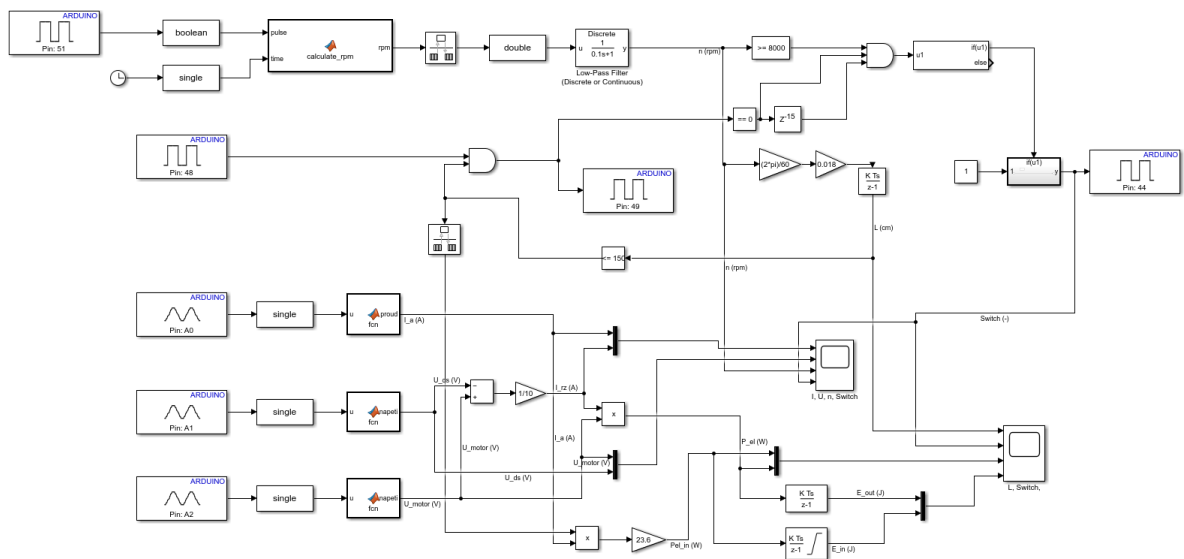
Tabulka 3-3 Parametry převodovky motoru

Typ převodovky	planetární
Převodový poměr	1:66
Účinnost	60 %
Jmenovitý moment motoru za převodovkou [kg·cm]	25
Maximální trvalý moment [kg·cm]	100
Jmenovité otáčky motoru za převodovkou [ot·min ⁻¹]	83

3.2.5 Popis řídicí části

K naprogramování řízení experimentálního modelu byl rovněž použit program MATLAB-Simulink. Po stažení dodatku Simulink Support Package for Arduino Hardware je možné programovat Arduino přímo v prostředí Simulink. Výhoda tohoto typu programování je především v možnosti použít zobrazovací prostředky Simulinku a v možnosti zobrazovat výsledky v reálném čase.

Stejně jako v simulaci byly realizovány dva generátorické režimy, první by měl udržovat otáčky generátoru pomocí PWM kolem jmenovitých otáček a druhý by měl nechat generátor roztočit na 8000 ot·min⁻¹ a poté sepnout zátěž. Jelikož se jedná o rozsáhlejší programy než v případě simulace, byly pro tyto režimy napsány z důvodu větší přehlednosti dva samostatné kódy, které jsou k dispozici v příloze (Obrázek 3-6, Obrázek 3-7).



Obrázek 3-6 Řídicí struktura experimentálního modelu – režim výkonové špičky

Vstupy pro oba kódy jsou stejné. Analogové vstupy A0, A1, A2 jsou vzorkovány s periodou 0,01 s a po přepočtení pomocí funkce napsané v Matlabu dostáváme hodnoty pro proud kotvou (I_a), napětí na svorkách motoru (U_{motor}) a napětí mezi elektrodami tranzistoru Drain a Source (U_{ds}).

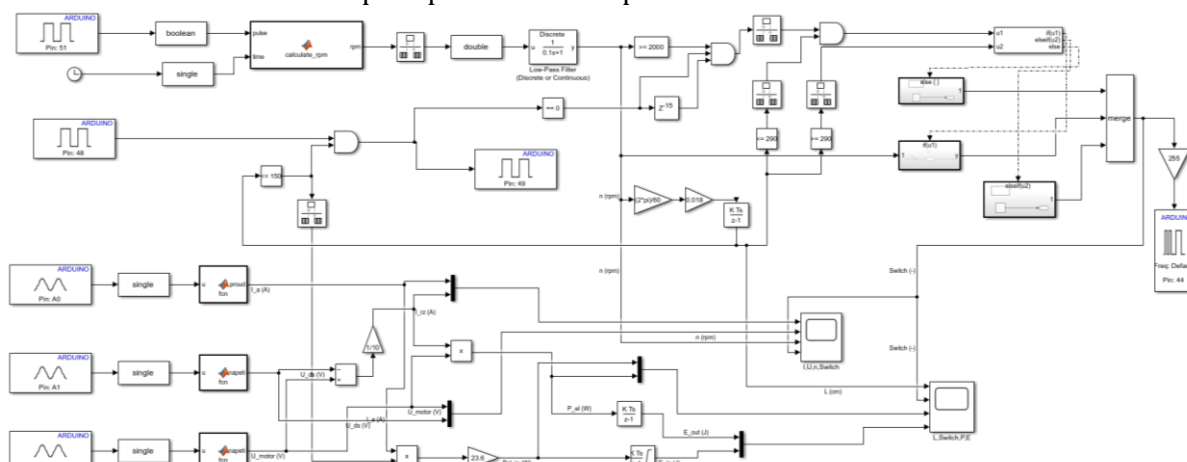
Dalším vstupem je digitální vstup na pinu 48, který má funkci jednak spouštěcího spínače mechanismu – v momentě sepnutí spínače dojde k připnutí zdroje napětí ke svorkám motoru a odpojení kondenzátoru a větve s tranzistorem a zátěžným rezistorem. Zároveň se jedná o pohotovostní spínač pro případ, kdy by nedošlo k přepnutí relé v koncové poloze navíjení závaží a tím i k možnému poškození celého zařízení. Z tohoto důvodu musela být výška, do které se navíjí závaží zredukována na 1,5 m, čímž se zredukovala i kapacita úložiště.

Jako digitální vstup na pinu 51 je připojena sonda z enkodéru. Vzorkovací perioda tohoto pinu je nejmenší v celém kódu – 0,2 ms. Jedná se o periodu, která je schopna vzorkovat signál enkodéru i v mezním případě, kdy otáčky motoru dosahují hodnoty 8 000 ot·min⁻¹. Tomu odpovídá obdélníkový signál enkodéru o periodě necelých 1,5 ms, vzorkovací frekvence tedy vyhovuje vzorkovacímu teorému. Pro větší vzorkovací frekvence se objevovaly chyby ve vzorkování způsobené pravděpodobně přetížením sériové komunikace s notebookem.

Opět pomocí funkce napsané v Matlabu jsou z frekvence pulzů dopočteny otáčky, které jsou následně vyfiltrovány v bloku dolní propusti. Důvodem této filtrace jsou skoky v počtu otáček vlivem vynechání jednoho příchozího pulzu. Vyfiltrovaná hodnota otáček je vhodnějším vstupem pro regulátor otáček a zároveň je i uživatelsky příjemnější z hlediska vyhodnocování průběhu otáček.

Pomocí údaje o otáčkách jsou následně dopočítány krajní polohy uražené vzdálenosti navíjeného či spouštěného závaží. V případě režimu výkonové špičky se hlídá pouze případ horní meze navíjení, tj. vzdálenost od země, kdy by mělo dojít k zastavení navíjení. Tato poloha představuje z hlediska úložiště plně nabitou kapacitu úložiště.

Následuje vyhodnocovací blok, kdy se pomocí logického součinu AND rozhoduje, zda se nachází stroj v generátorickém režimu a zda bylo dosaženo požadovaných 8 000 ot·min⁻¹. Pokud jsou podmínky splněny, dojde k sepnutí tranzistoru a zátěžný rezistor je připnut ke svorám motoru. Tranzistor zůstává sepnut po celou dobu spouštění.



Obrázek 3-7 Řídicí struktura experimentálního modelu – režim PWM

Rozdíl v kódu pro režim řízení otáček pomocí PWM je především ve způsobech vyhodnocování stavu stroje.

Prvním rozdílem je ve vyhodnocovacím bloku spínání tranzistoru. Podobně jako v předchozím případě zde musí být splněny podmínky pro generátorický režim. Tranzistor je zde ale spínán prostřednictvím PI regulátoru, kde žádanou veličinou mohou být různé hodnoty otáček motoru měřenou veličinou jsou aktuální otáčky (po vyfiltrování dolní propustí) a akční veličinou je střída PWM v rozsahu 0 až 1. Tato hodnota je vynásobena zesílením tak, aby odpovídala vstupu pro blok z nadstavby pro Arduino, který na základě určené frekvence (ponechána na defaultních 490 Hz) a vstupní hodnoty v rozsahu 0 až 255 upraví střídu výstupního obdélníkového signálu.

Druhým rozdílem je, že dopočítaná vzdálenost z průběhu otáček je použita i pro hodnotu, kdy úložiště vyčerpalo svou kapacitu a závaží se blíží k zemi. Zde je ošetřena podmínka, kdy v blízké vzdáleností nad zemí, dojde k trvalému sepnutí tranzistoru, čímž dojde k dobrzdění závaží.

V obou případech jsou měřené veličiny vyhodnoceny a zobrazeny v reálném čase pomocí zobrazovacího nástroje Scope v rámci Simulinku.

Zobrazeny jsou následující veličiny:

- proud kotvou motoru (I_a)
- proud zátěžným rezistorem, který se dopočítává z měřených napětí (I_{rz})
- napětí na svorkách generátoru (U_m)
- napětí na elektrodách tranzistoru Drain a Source (U_{ds})
- otáčky motoru (n)
- stav řídící elektrody tranzistoru Gate (Switch), kde 0 odpovídá zavřeném tranzistoru, 1 otevřenému
- uražená vzdálenost závaží od země (L)
- elektrický výkon spotřebovaný během motorického režimu (P_{el_in})
- elektrický výkon dodaný do zátěžného rezistoru (P_{el})
- elektrická energie spotřebovaná během motorického režimu (E_{in})
- elektrická energie dodaná do zátěžného rezistoru (E_{out}).

KAPITOLA 4: VÝSLEDKY

V této kapitole jsou prezentovány a porovnány výsledky ze simulace a z měření experimentálního modelu.

Výsledky simulace zahrnují průběh jednotlivých zobrazených veličin v čase pouze pro generátorický režim úložiště, zatímco výsledky z experimentálního měření zahrnují i motorický režim. Měření začíná připnutím napájecího zdroje ke svorkám motoru, následuje vytažení závaží do krajní polohy. Poté následuje generátorický režim, který je i součástí simulace.

Výsledky v původní kvalitě jsou dostupné ve formátu .fig v příloze.

4.1 Výsledky simulace

Aby bylo porovnání jednodušší, byla počáteční výška, ze které bylo simulováno spouštění závaží, upravena v simulaci ze 2 na 1,5 m a hmotnost závaží byla upravena ze 20 na 22,5 kg tak, aby vstupní parametry byly stejné jako u experimentálního modelu.

4.1.1 Režim PWM

Jako žádaná hodnota otáček byla v regulátoru nastavena jmenovitá hodnota otáček. Podle simulace se generátor roztočí na jmenovité otáčky za necelých 1,7 s. Následuje zapůsobení PI regulátoru, který začne spínat tranzistor. Proud zátěžným rezistorem je přerušovaný, zatímco proud kotvou díky kondenzátoru neklesne během spínání k nule. Výkon dodávaný do rezistoru je tedy rovněž přerušovaný.

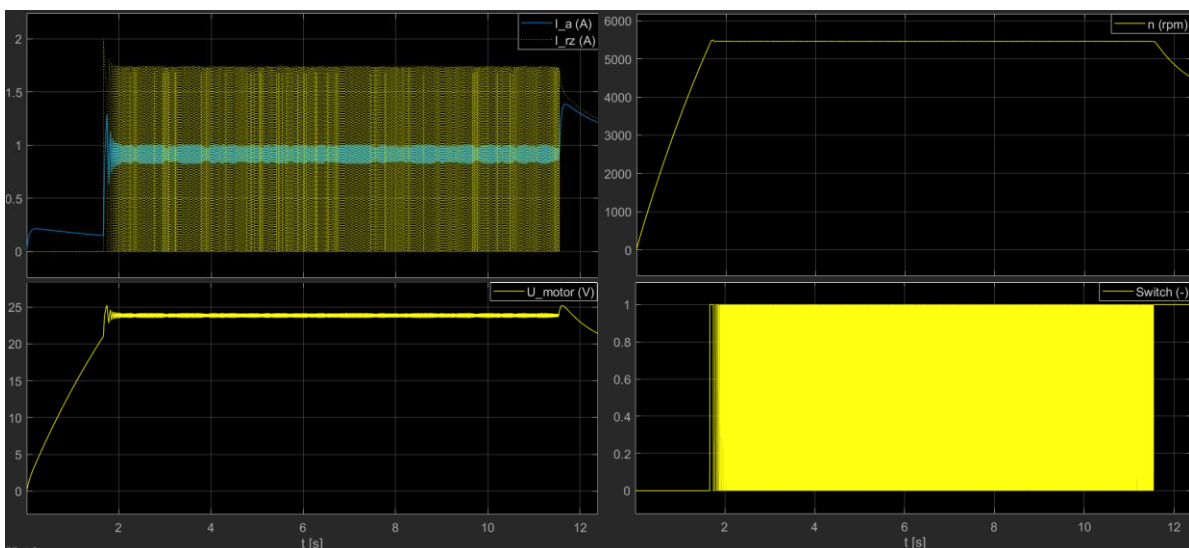
Konečná energie dodaná do rezistoru je 171 J. Uvědomíme-li si, že vstupující energií do přeměny energie je potenciální tíhová energie, můžeme spočítat účinnost přeměny energie jako:

$$\eta_{s_gen_PWM} = \frac{E_{out}}{E_p} = \frac{E_{out}}{m \cdot h \cdot g} = \frac{171}{22,5 \cdot 1,5 \cdot 9,81} = 51,65 \% \quad (4-1)$$

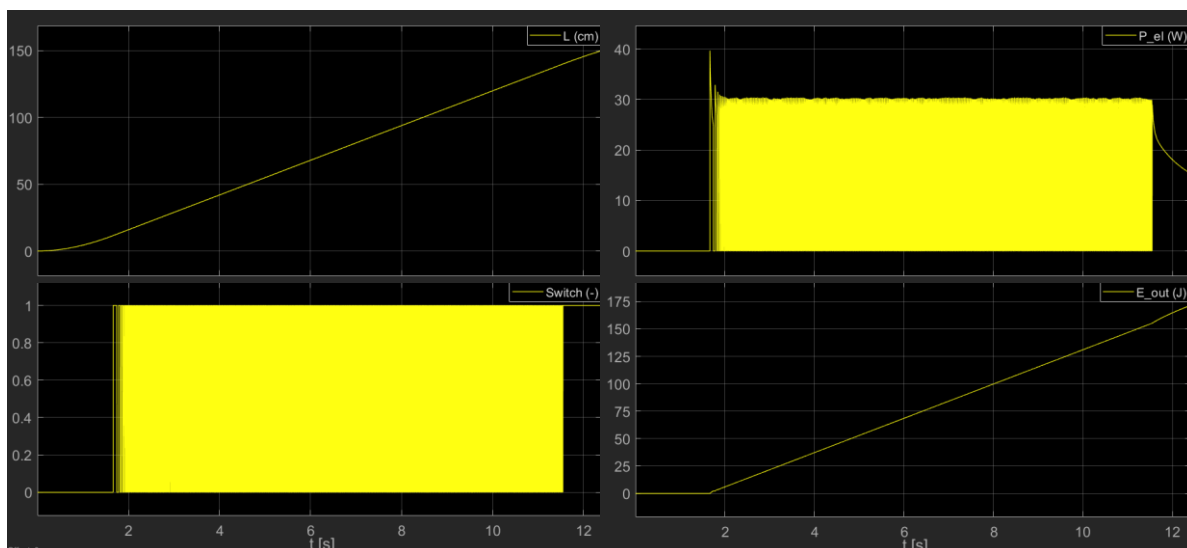
a střední hodnotu elektrického výkonu dodaného do rezistoru jako:

$$P_{s_AV_PWM} = \frac{E_{out}}{\Delta t} = \frac{171}{10,4} = 16,44 \text{ W} \quad (4-2)$$

kde Δt je doba během níž byl dodáván výkon do rezistoru.



Obrázek 4-1 Výsledek simulace - režim PWM, část 1.



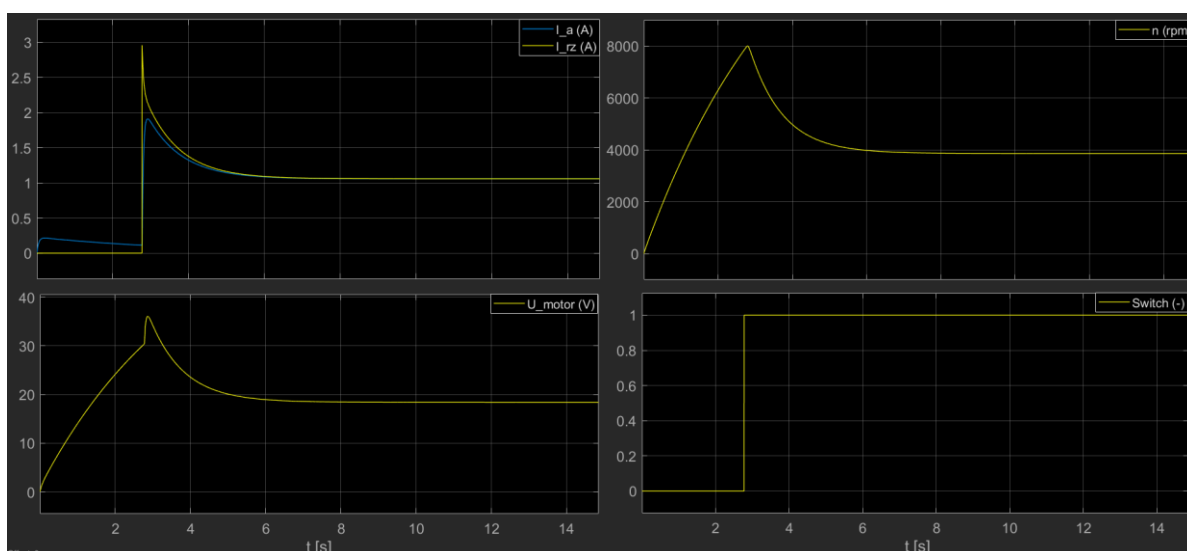
Obrázek 4-2 Výsledek simulace - režim PWM, část 2.

4.1.2 Režim výkonové špičky

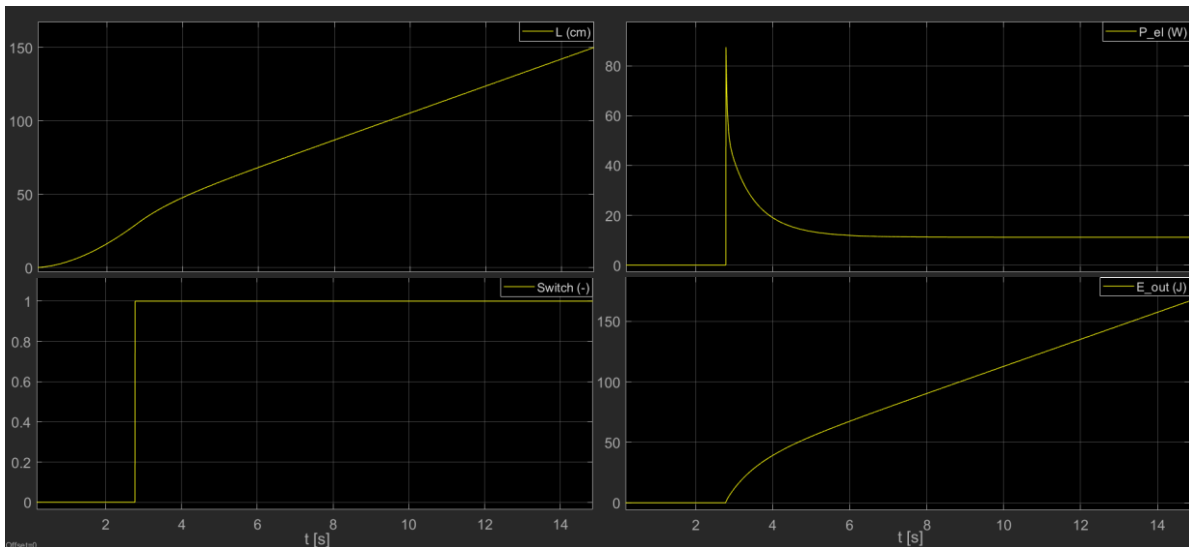
Na hodnotu $8000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ se generátor podle simulace roztočí za necelých 2,8 s. Vidíme, že rozdíl pouhých $2000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ už způsobí prodloužení doby, za kterou se stroj roztočí na dané otáčky, o 1,1 s, což je způsobeno rostoucím členem představující ztráty v převodovce v rovnici (3-4). Výkonová špička dosahuje hodnoty 87 W a po přibližně 2,5 s se výkon dodávaný do rezistoru ustálí na hodnotě 11 W.

Konečná energie dodaná do rezistoru je 167 J. Podobně jako v předchozím případě můžeme spočítat účinnost jako:

$$\eta_{s_gen_PEAK} = \frac{E_{out}}{E_p} = \frac{E_{out}}{m \cdot h \cdot g} = \frac{167}{22,5 \cdot 1,5 \cdot 9,81} = 50,44 \% \quad (4-3)$$



Obrázek 4-3 Výsledek simulace - režim výkonové špičky, část 1.



Obrázek 4-4 Výsledek simulace - režim výkonové špičky, část 2.

4.2 Výsledky experimentálního modelu

4.2.1 Režim PWM

Podíváme-li se na průběh proudů v prvním obrázku (Obrázek 4-5), vidíme u proudu kotvou na začátku průběh proudovou špičkou typickou pro rozběh stejnosměrných motorů přímým připojením ke zdroji napětí. Následně se proud ustálí na hodnotě okolo 2 A, než dojde k přepnutí relé. Zde můžeme vidět proudovou špičku opačné polaroty, která je způsobena pravděpodobně otevřením jedné, nebo více diod, které jsou v momentě přepnutí relé v propustném směru, než otáčky klesnou nule i s nimi i indukované napětí motoru. V průběhu otáček motoru klesnutí k nule nevidíme, což je způsobeno tím, že je na otáčky aplikován filtr, které tyto rychlé změny bohužel vyfiltruje.

Stroj nyní přechází do generátorického režimu a v momentě, kdy dosáhne jmenovitých otáček začne působit PI regulátor. Jmenovitých otáček dosáhne motor za necelé 2 s. V průběhu otáček můžeme vidět i pokles otáček vlivem dobrzdění před dopadem závaží na zem.

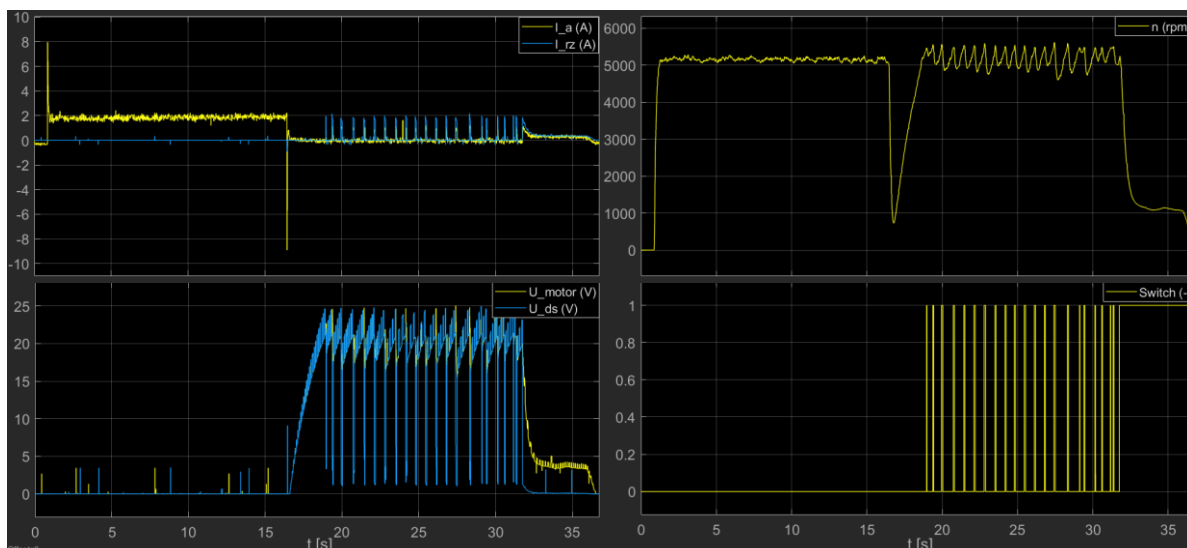
Na druhém obrázku (Obrázek 4-6) můžeme vidět průběh celkové uražené vzdálenosti závaží. V hodnotě 150 cm je sedlo, kdy dojde k překlenutí do generátorického režimu. U průběhu výkonů je vidět, že výkon spotřebováváný během motorického režimu nezačíná v nule, což je způsobeno chybnou kalibrací nulové hodnoty proudového senzoru.

Hodnota celkové energie dodané do rezistoru je 59,21 J. Účinnost zařízení v generátorickém režimu bychom mohli opět spočítat jako:

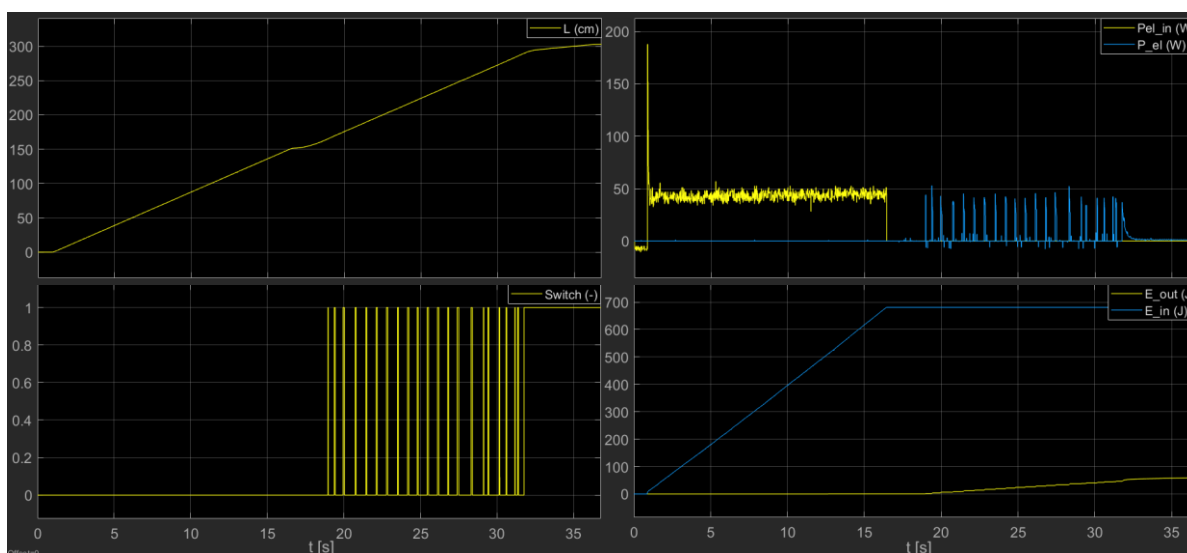
$$\eta_{gen_PWM} = \frac{E_{out}}{E_p} = \frac{E_{out}}{m \cdot h \cdot g} = \frac{59,21}{22,5 \cdot 1,5 \cdot 9,81} = 17,88 \% \quad (4-4)$$

a celkovou účinnost jednoho cyklu úložiště energie zahrnující jak ztráty při ukládání energie, tak ztráty dané při dodávání energie zpět můžeme vyjádřit pomocí znalosti energie spotřebované při „nabíjení“ úložiště, tedy při navíjení závaží nahoru do koncové polohy, jako:

$$\eta_{celk_PWM} = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \frac{59,21}{681,10} = 8,69 \% \quad (4-5)$$



Obrázek 4-5 Výsledek měření - režim PWM, část 1.



Obrázek 4-6 Výsledek měření - režim PWM, část 2.

Dále byly provedeny další 3 odměry, pro žádané otáčky menší než jmenovité. Žádaná hodnota otáček byla zadána jako vstup do PI regulátoru. Výsledky z těchto měření jsou zpracovány v tabulce (Tabulka 4-1).

Tabulka 4-1 Výsledky pro různé otáčky generátoru

Žádaná hodnota otáček [min^{-1}]	E_{out} [J]	P_{AV} [W]	η_{gen} [-]	$\eta_{celk.}$ [-]
5450	59,21	3,48	17,88 %	8,69 %
4725	64,96	3,22	19,62 %	9,53 %
4000	71,92	3,13	21,72 %	10,56 %
3275	73,38	2,62	22,16 %	10,77 %

Průběhy odpovídající řádkům v tabulce jsou dostupné v příloze.

4.2.2 Režim výkonové špičky

Podobně jako v simulaci trvá stroji dostat se na hodnotu $8000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ podstatně déle než v případě jmenovitých otáček, zde hodnota této doby činila okolo 5,5 s (Obrázek 4-7).

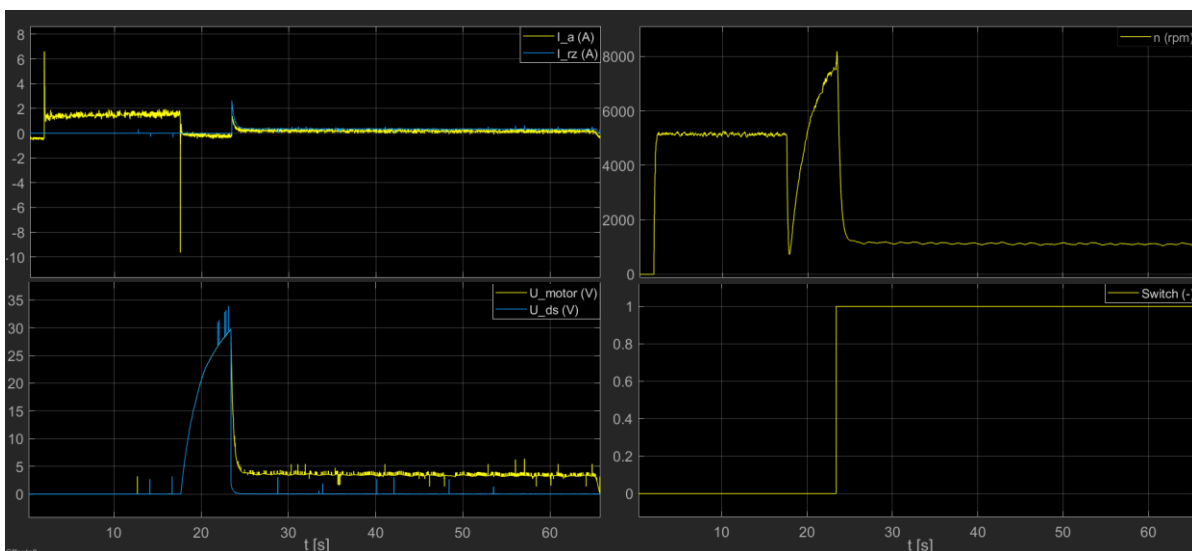
Výkonová špička dosahovala hodnoty 75,98 W, následně se výkon dodávaný do rezistoru ustanovil na hodnotě okolo 2 W, než dopadlo závaží na zem (Obrázek 4-8).

Celková energie dodaná do rezistoru byla rovna 62,48 J. Podobně jako v předchozím případě můžeme spočítat účinnosti:

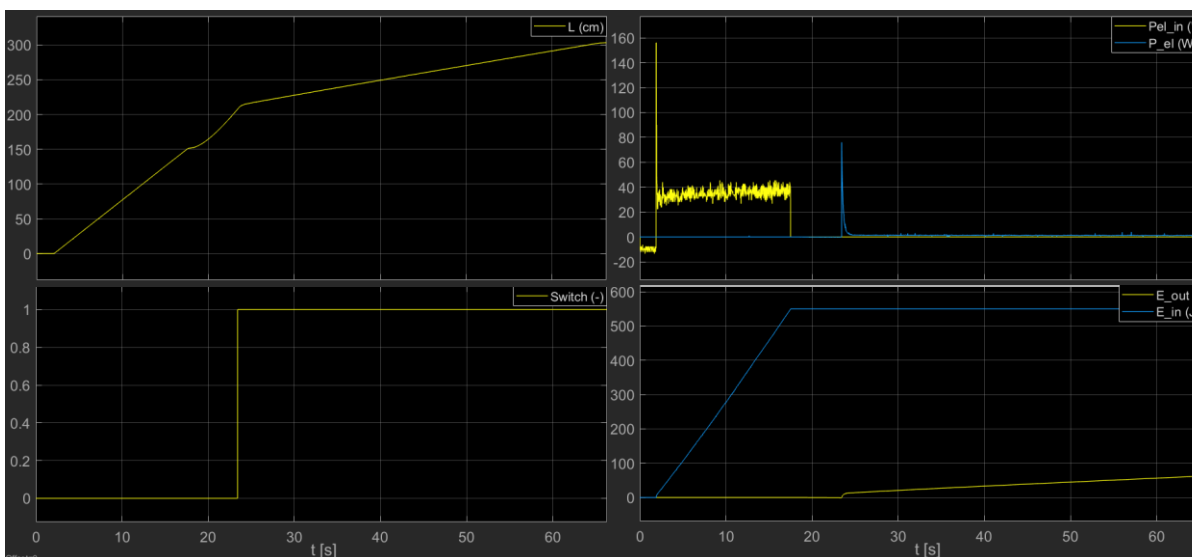
$$\eta_{gen_PEAK} = \frac{E_{out}}{E_p} = \frac{E_{out}}{m \cdot h \cdot g} = \frac{62,48}{22,5 \cdot 1,5 \cdot 9,81} = 18,87 \% \quad (4-6)$$

a účinnost celého cyklu:

$$\eta_{celk_PEAK} = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \frac{62,48}{549,60} = 11,37 \% \quad (4-7)$$



Obrázek 4-7 Výsledek měření - režim výkonové špičky, část 1.

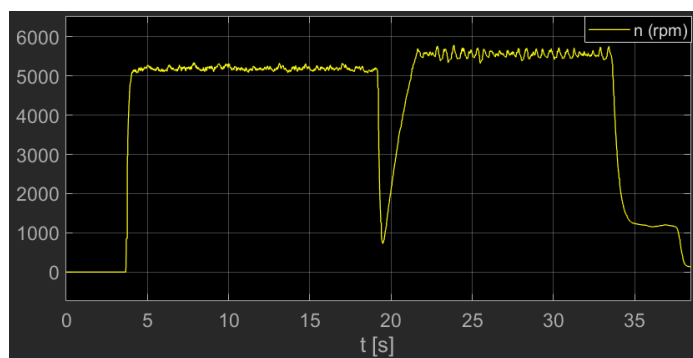


Obrázek 4-8 Výsledek měření - režim výkonové špičky, část 2.

4.3 Porovnání výsledků a zhodnocení

Co se týče chování jednotlivých zobrazených veličin, odpovídá simulační model ve většině případů experimentu. Liší se především hodnoty, kterých tyto veličiny dosahují.

Kde se průběhy rozbíhají, je především v režimu PWM, kde průběh otáček u experimentálního modelu osciluje kolem jmenovité hodnoty otáček. Problém se později podalo vyřešit vhodným nastavením konstant PI regulátoru (Obrázek 4-9). Oscilaci se nepodařilo zcela odstranit, ale byla znatelně menší než v přechozích případech. Naměřené hodnoty se ale téměř neměnily, z toho důvodu jsem již nepředělával výsledky.



Obrázek 4-9 Průběh otáček po vyladění PI regulátoru

Dalším rozdílem jsou spočítané účinnosti. Zde musíme brát v úvahu, že počítání ztrát v simulačním modelu bylo zjednodušeno na ztráty v převodovce a ztráty v odporu vinutí kotvy. V experimentálním modelu ztráty dosahují značných hodnot. Důvodem, proč tomu tak je, jsou dodatečné ztráty v motoru (komutační, třecí), ztráty v tranzistoru, ztráty v obvodech měření (odporové děliče) a ztráty v přívodních vodičích. Do ztrát musíme započítat i velikost kinetické energie, kterou závaží dopadá na zem.

Dalším velice pravděpodobným důvodem, proč se účinnosti liší, je fakt, že během testování a ladění konstant PI regulátoru došlo k roztočení stroje na otáčky větší jak 10000 ot·min⁻¹, čímž se mohla poškodit převodovka motoru. K této události došlo, když závaží vážilo původních 20 kg a bylo možné dosáhnout takhle vysokých otáček. Od této události bylo tření v převodovce znatelnější a s původními 20 kg již nebylo možné nechat roztočit stroj na 8000 ot·min⁻¹. Z tohoto důvodu jsem musel přidat dalších 2,5 kg k závaží.

Porovnáme-li celkové účinnosti cyklu experimentálního úložiště (rovnice (4-5) a (4-7)), můžeme vidět, že vstupující energie do této rovnice, tedy energie potřebné pro vytáhnutí závaží, jsou odlišné. To je způsobeno chybou v měření, neboť v experimentu, kde energie vychází větší, nebylo pravděpodobně lano zcela napnuté. Na motor, když se připnul ke zdroji napětí, nepůsobil tak velký zátěžný moment, a proto je pravděpodobně i proudová špička při rozběhu motoru v tomto experimentu menší než v druhém případě. Druhou možnou variantou je nepřesná kalibrace senzoru proudu.

Se zmenšující se hodnotou žádaných otáček, a tedy i s častějším spínáním tranzistoru roste celková dodaná energie do rezistoru a s ní i účinnost. Největší účinnosti bychom dosáhli, kdyby byl tranzistor po celou dobu spouštění sepnutý, ale tím bychom přišli o možnost řízení velikosti středního výkonu.

Spočtené účinnosti získané experimentálním měřením můžeme porovnat s teoretickým maximem daného motoru s převodovkou. Uvážíme-li, že motor by byl optimálně zatěžován, tj. s takovým zatížením, kdy je účinnost maximální, dostaneme celkovou teoretickou účinnost jednoho cyklu úložiště po nahlédnutí do katalogu motoru a odečtení hodnoty účinnosti z dané charakteristiky přibližně [29]:

$$\eta_{teor.} = (\eta_{motor} \cdot \eta_T)^2 = (0,67 \cdot 0,60)^2 = 16,16 \% \quad (4-8)$$

KAPITOLA 5: ZÁVĚR

Realizovaný model mechanického úložiště využívající potenciální energii tíhového pole demonstroval základní rysy této technologie.

Prvním rysem je schopnost dodat plný výkon v čase řádově pár sekund. Dalším rysem je možnost řízení dodávky energie, což bylo realizováno nepřímo řízením otáček motoru pomocí PI regulátoru. U možnosti řízení výkonu byla vyzkoušena i schopnost úložiště dodávat vysoký výkon po kratší dobu prostřednictvím výkonové špičky, která dosahovala sice vysoké hodnoty okamžitého výkonu, ale trvala velice krátkou dobu.

U realizovaného modelu bylo z důvodu nedostatku času zanedbáno zastavení závaží v určité výšce podle potřeby a zajištění proti pádu v případě poruchy. V reálném úložišti by toto nebylo možné, bylo by třeba navrhnout vhodným způsobem zastavení do nulové rychlosti otáčení a zajištění proti samovolnému pohybu mechanickou brzdou.

Generátorický režim byl u tohoto modelu zjednodušen na brzdění motoru do rezistoru, tedy přímé připojení zátěže na generátor. Zátěž by se teoreticky mohla nahradit akumulačními prvky a střídačem, aby bylo možné dodávat výkon přímo do sítě. Efektivnějšího způsobu, jak dodávat výkon z motoru přímo do sítě a mít stále možnost regulovat jeho velikost, bychom dosáhli např. za použití nereverzačního tyristorového usměrňovače, který lze provozovat v invertorovém režimu. U takového způsobu řízení bychom navíc měli možnost jednoduše motor/generátor zcela zastavit a závaží mechanicky zajistit proti samovolnému pohybu v libovolné výšce.

Celková účinnost jednoho cyklu úložiště se pohybovala v rozmezí od 8,69 do 11,37 %, což není vysoká hodnota, ale vezmeme-li v potaz, že se jedná o demonstrační model, který nebyl zkonstruován za účelem dosažení maximální účinnosti, tak to je výsledek, který pobízí k dalšímu zkoumání. Důvod, proč byla účinnost tak nízká, byl podrobně diskutován v předchozí kapitole. Obecně se ale nejedná o ideální výběr technologie motoru, a to jednak z důvodu vysokých ztrát, které jsou dány velkým převodovým poměrem převodovky, tak z důvodu obecně malé účinnosti stejnosměrných motorů s komutátorem.

Účinnost systému by mohlo výrazně zlepšit použití asynchronních, nebo synchronních strojů s příslušným frekvenčním měničem a vhodným řízením. Použitím vícepólových strojů by bylo možné dosáhnout větších momentů, čímž by se zmenšily nároky na převodový poměr převodovky. Případně se nabízí možnost nepoužít převodovku vůbec.

Kapacitu experimentálního úložiště by bylo možné zvětšit několikanásobně použitím delšího navíjecího lana a umístěním zařízení na konstrukci vhodné výšky. V místě, kdy bylo závaží navinuto do limitní výšky, byla na navíjecím bubnu navinuta sotva třetina celkové délky bubnu. Kapacita takovýchto úložišť bude tedy především dána výškou konstrukce a způsobem, jakým zajistit dostatečný moment na hřídeli motoru tak, aby bylo možné maximalizovat i druhý parametr kapacity – hmotnost závaží.

LITERATURA

- [1] T. Kousksou, P. Bruel, A. Jamil, T. E. Rhafiki a Y. Zeraouli, „Energy storage: Applications and challenges,“ *Solar Energy Materials & Solar Cells*, pp. 59-80, 2014.
- [2] International Energy Agency, „Technology Roadmap - Energy storage,“ 2014. [Online]. Available: <https://webstore.iea.org/download/direct/451>.
- [3] ČEZ, „Přečerpávací vodní elektrárny u nás,“ [Online]. Available: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/06/precerpel_1.html. [Přístup získán 30 1 2021].
- [4] Voda základ života , „Dlouhé stráně: Technický div, který změnil tvář Jeseníků,“ 2016. [Online]. Available: <http://www.vodazakladzivota.cz/clanky/28-dlouhe-strane-technicky-div-ktery-zmenil-tvar-jeseniku>. [Přístup získán 30 1 2021].
- [5] Redakce nazeleno.cz, „Výstavba nových vodních elektráren v ČR: Jaké jsou plány?,“ 2011. [Online]. Available: <https://www.nazeleno.cz/energie/vodni-energie/vystavba-novych-vodnich-elektraren-v-cr-jake-jsou-plany.aspx>. [Přístup získán 30 1 2021].
- [6] solarninovinky.cz, „730 MWh: Tesla letos v Kalifornii postaví největší bateriové úložiště na světě,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.solarninovinky.cz/730-mwh-tesla-letos-v-kalifornii-postavi-nejvetsi-bateriove-uloziste-na-svete/>. [Přístup získán 30 1 2021].
- [7] Hybrid.cz, „Největší bateriové úložiště v ČR má výkon 4 MW a kapacitu 2,5 MWh,“ 2019. [Online]. Available: <http://www.hybrid.cz/nejvetsi-bateriove-uloziste-v-cr-ma-vykon-4-mw-kapacitu-25-mwh>. [Přístup získán 30 1 2021].
- [8] Wikipedia, „Lithium-iontový akumulátor,“ 2021. [Online]. Available: https://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-iontov%C3%BD_akumul%C3%A1tor. [Přístup získán 30 1 2021].
- [9] J. Moravec, Lithium, jeho vlastnosti a využití v technologické praxi, Pardubice: Univerzita Pardubice - fakulta chemicko - technologická, 2018.
- [10] hybrid.cz, „Průtokové baterie před prahem singularity: část 1,“ [Online]. Available: <http://www.hybrid.cz/prutokove-baterie-pred-prahem-singularity-cast-1>. [Přístup získán 30 1 2021].
- [11] European Commission, „Powering a climate-neutral economy: An EU Strategy for Energy System Integration,“ 8 7 2020. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/energy_system_integration_strategy_.pdf. [Přístup získán 10 11 2020].
- [12] E. komise, „Vodíková strategie pro klimaticky neutrální Evropu,“ Brusel, 2020.
- [13] Hytep, „Využití vodíku - účinnost,“ Česká vodíková technologická platforma, 2007. [Online]. Available: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyuziti-vodiku/637-ucinnost>. [Přístup získán 30 1 2021].

- [14] renews.biz, „Work underway on Gravitricity storage demo,“ Gravitricity, 31 8 2020. [Online]. Available: <https://www.renews.biz/62778/work-begins-gravitricitys-11m-energy-storage-demonstrator/>. [Přístup získán 2021 2 6].
- [15] Gravitricity, „Now published: Spring 2021 Newsletter,“ Gravitricity, 25 4 2021. [Online]. Available: <https://gravitricity.com/spring-2021-newsletter-now-published/>. [Přístup získán 13 5 2021].
- [16] T. Morstyn, M. Chilcott a M. McGulloch, „Gravity energy storage with suspended weights for abandoned mine shafts,“ *Applied Energy*, pp. 201-206, 2019.
- [17] P. Frankel a M. Wright, „Apparatus and method for electrical energy storage“. Velká Británie Patent 2518125, 18 3 2015.
- [18] Scarlet Tech, „What are the Top 5 World’s Biggest Strongest Crane?,“ Scarlet Tech, 31 8 2020. [Online]. Available: <https://scarlet-tech.com/2020/08/31/worlds-biggest-strongest-crane/>. [Přístup získán 8 2 2021].
- [19] businesswire, „Energy Vault Announces Commercial Availability of Transformative Utility-Scale Energy Storage Technology Yielding Unprecedented Economic Benefits to Global Energy Providers,“ Business Wire, Inc., 7 11 2018. [Online]. Available: <https://www.businesswire.com/news/home/20181106006096/en/Energy-Vault-Announces-Commercial-Availability-of-Transformative-Utility-Scale-Energy-Storage-Technology-Yielding-Unprecedented-Economic-Benefits-to-Global-Energy-Providers>. [Přístup získán 7 2 2021].
- [20] Svaz podnikatelů pro využití energetických zdrojů, z.s., „Větrné elektrárny,“ spvez.cz, [Online]. Available: <http://www.spvez.cz/pages/OZE/vitr.htm>. [Přístup získán 8 2 2021].
- [21] Gravity Power, „Technology,“ Gravity Power, 2017. [Online]. Available: <http://www.gravitypower.net/technology-gravity-power-energy-storage/>. [Přístup získán 8 2 2021].
- [22] Gravity Storage, „Status of Development,“ Gravity Storage, [Online]. Available: <https://heindl-energy.com/about-us/>. [Přístup získán 9 2 2021].
- [23] stawm.de, „Gravity Power Pumpspeicher,“ Stadtwerke Weilheim, 3 2020. [Online]. Available: <https://www.stawm.de/energie/strom/speicherung.html>. [Přístup získán 9 2 2021].
- [24] M. Flynn, „KIRKLAND COMPANY’S PLAN FOR RAIL-CAR ENERGY-STORAGE CONCEPT FUELS RENEWABLE-ENERGY INTEREST,“ Mike Flynn & Associates, 15 10 2020. [Online]. Available: <https://www.emikeflynn.com/index.php/blog/flynn-s-harp/kirkland-company-s-plan-for-rail-car-energy-storage-concept-fuels-renewable-energy-interest>. [Přístup získán 9 2 2021].
- [25] R. Andrews, „Is ARES the solution to the energy storage problem?,“ Energy Matters, 3 2016. [Online]. Available: <https://euanmearns.com/is-ares-the-solution-to-the-energy-storage-problem/>. [Přístup získán 9 2 2021].
- [26] ARES, „GravityLine,“ ares, 2021. [Online]. Available: <https://aresnorthamerica.com/gravityline/>. [Přístup získán 9 2 2021].

- [27] R. Andrews, „Short-term energy storage with “Gravitricity” – iron versus ion,“ Energy Matters, 10 5 2018. [Online]. Available: <http://euanmearns.com/short-term-energy-storage-with-gravitricity-iron-versus-ion/>. [Přístup získán 9 2 2021].
- [28] J. Pavelka a P. Koblí, Elektrické pohony a jejich řízení, Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2019.
- [29] J. Gross, „DC motor série PG520 s planetovou převodovkou,“ StejnospřávnéMotory.cz, 2021. [Online]. Available: <https://www.dcmotory.cz/dc-motory-planetova-prevodovka/cenik-serie-pg520.html>. [Přístup získán 3 5 2021].

SEZNAM SYMBOLŮ

E_p (J)	potenciální energie
m (kg)	hmotnost
h (m)	výška
M_i (N · m)	moment síly
M_d (N · m)	dynamický moment
Ω (s ⁻¹)	úhlová rychlost
M_C (N · m)	celkový hnací moment
M_{ZC} (N · m)	celkový zátěžný moment
B (N · m · s)	koeficient viskózního tření
J_C (kg · m ²)	celkový moment setrvačnosti
F_G (N)	tíhová síla
r (m)	rameno síly
η_T (-)	účinnost převodovky
i (-)	převodový poměr
k (N · m / A, V · s)	konstanta motoru
U_i (V)	indukované napětí
R_a (Ω)	odpor kotvy
P_{el} (W)	elektrický výkon
I (A)	elektrický proud
C (F)	kapacita
L_a (H)	indukčnost kotvy
$i_{RZ}(t)$ (A)	proud zátěžným rezistorem
$i_a(t)$ (A)	proud kotvou
$i_c(t)$ (A)	proud kondenzátorem
R_z (Ω)	odpor zátěžného rezistoru
$\eta_{s_gen_PWM}$ (-)	účinnost u simulace během generátorického režimu, režim PWM
$P_{s_AV_PWM}$ (W)	střední hodnota elektrického výkonu u simulace, režim PWM
$\eta_{s_gen_PEAK}$ (-)	účinnost u simulace během generátorického režimu, režim výkonové špičky
η_{gen_PWM} (-)	účinnost experimentálního modelu u generátorického režimu, režim PWM
η_{celk_PWM} (-)	celková účinnost experimentálního modelu, režim PWM
η_{gen_PEAK} (-)	účinnost exp. modelu u generátorického režimu, režim výkonové špičky
η_{celk_PEAK} (-)	celková účinnost exp. modelu, režim výkonové špičky
$\eta_{teor.}$ (-)	maximální účinnost motoru s převodovkou
η_{motor} (-)	maximální účinnost motoru
E_{out} (J)	energie dodaná do zátěže
E_{in} (J)	energie spotřebovaná během motorického režimu
J (kg · m ²)	moment setrvačnosti