

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra mikroelektroniky



Ukládání elektrické energie generované fotovoltaickými zdroji

Storage of Electrical Energy Generated by Photovoltaic Sources

Bakalářská práce

Studijní program: Elektronika a komunikace
Autor práce: Vít Škoda
Vedoucí práce: prof. Ing. Miroslav Husák, Csc.

Praha 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Škoda** Jméno: **Vít** Osobní číslo: **491514**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Ukládání elektrické energie generované fotovoltaickými zdroji

Název bakalářské práce anglicky:

Storage of Electrical Energy Generated by Photovoltaic Sources

Pokyny pro vypracování:

1. Shrňte poznatky z literatury o možnostech ukládání elektrické energie s využitím mechanického úložiště pracujícího s gravitační energií.
2. Navrhněte model mechanického úložiště s využitím gravitační energie seismické hmoty. Základními prvky jsou motor/generátor, seismická hmota, gravitační mechanický systém pro zvedání a spouštění seismické hmoty. Motor/generátoru je řízen jednoduchou elektronikou. Navržený model realizujte.
3. Změřte a zhodnoťte elektrické parametry realizovaného modelu, navrhněte úpravy pro zvýšení účinnosti ukládané energie.

Seznam doporučené literatury:

- [1] 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>
- [2] Spector, J., 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] 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/>
- [4] Nasrullah Khan, Saad Dilshad, Rashida Khalid, Ali Raza Kalair, Naeem Abas, Review of energy storage and transportation of energy, 18 March 2019, <https://doi.org/10.1002/est2.49>, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/est2.49>

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: **02.02.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2024**

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

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.
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

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.

Poděkování

Děkuji všem, kdo mi věřili, že práci dokončím, zejména rodičům. Také děkuji prof. Miroslavovi Husákovi za konzultace a zajištění součástí. Nakonec jsem vděčný všem, kteří jakkoliv přispěli k dokončení této práce.

Abstrakt

Bakalářská práce se věnuje mechanickým úložištím energií, které využívají gravitace a potenciální energii v tíhovém poli.

V teoretické části jsou vyčteny možné koncepty provedení, stávající i nové projekty. Je také uveden nejrozšířenější způsob, což jsou přečerpávací vodní nádrže. Jsou hlavně rozebrány úložiště využívající seismickou hmotu. Jsou uvedené výhody a nevýhody jednotlivých konceptů.

V praktické části je potom navržen a sestaven experimentální model úložiště shodující se s konceptem: mechanické gravitační úložiště využívající důlní šachty (v upraveném měřítku). Následně byly změřeny parametry s dosažením účinnosti cyklu 9,19 %. V návrhu jsou také debatovány možnosti plné automatizace.

V závěru jsou uvedeny výsledky měření a zhodnocení experimentálního modelu. Diskutována možná vylepšení, která by přispěla k vylepšení takového úložiště.

Klíčová slova: mechanické úložiště energie, Energy Vault, ARES, úložiště energie, obnovitelná energie, ČVUT

Abstract

The Bachelor's thesis is devoted to mechanical energy storages which take advantage of potential energy of gravitational field.

In theoretical part the optional concepts are listed with old and new projects. The most used type of energy storage is also stated and it is pumped hydro energy storage. Mainly the mechanical energy storages using seismic matter are discussed with pros and cons along the concepts.

In the practical part of the Bachelor's thesis the experimental model is proposed and created according to the concept of S-GES (shaft-gravity energy storage). Then the parameters of the experimental model are measured with effectivity of one cycle reaching 9,19 %. Throughout the proposal the possible improvements for automatization are discussed.

In the end the results of the experimental model are evaluated, improvement ideas discussed.

Key words: gravity energy storage, solid gravity energy storage, ARES, Energy Vault, CTU, mechanical energy storage, renewable energy

Obsah

Seznam zkratek	1
Úvod	2
1 Teoretický úvod	3
1.1 PHES	6
1.2 SGES	7
1.2.1 Tower SGES	7
1.2.2 Shaft SGES	8
1.2.3 Piston SGES	8
1.2.4 Compressed Air Piston SGES	10
1.2.5 Rope-hoisting piston SGES	11
1.2.6 Mountain Mine-Car SGES	11
1.2.7 Mountain Cable-Car SGES	12
1.2.8 Linear electric machine-based SGES	13
1.2.9 Srovnání SGES	13
1.3 Deep ocean gravitational energy	14
1.4 Energy Vault	16
1.5 Gravitricity Morava	17
1.6 Gravity Power	17
1.7 ARES	18
2 Praktická část	19
2.1 Návrh	19
2.1.1 Konstrukce	19
2.1.2 Blokové schéma obvodu	19
2.1.3 Mikrokontrolér	19
2.1.4 Motor/Generátor	20
2.1.5 Rotační enkodér	21
2.1.6 Testovací zdroj	22
2.1.7 Ovladač motoru	22

2.1.8	Přepínání napájení Motor/Generátor	22
2.1.9	Rekuperační dioda a zpětné proudy	24
2.1.10	Step-down konvertor	25
2.1.11	Velikost úložiště	26
2.1.12	Řídicí algoritmus	27
3	Změřené parametry	27
3.1	Realizace měřicího obvodu	27
3.2	Realizace konstrukce	29
3.3	Změřené parametry	29
	Závěr	34
	Seznam obrázků	39
	Přílohy	40

Seznam zkratek

1. EEelektrická energie
2. CAGES úložiště energie stlačeného vzduchu s gravitačním principem
3. CAES úložiště energie stlačeného vzduchu
4. EES úložiště elektrické energie
5. DOGES úložiště energie v hlubokém oceánu s gravitačním principem
6. PHESúložiště energie s principem přečerpávání vody
7. BESbateriové úložiště energie
8. WPS-HPS hybridní větrná-solární elektrárna
9. GESgravitační úložiště energie
10. T-GES úložiště energie s využitím gravitační síly a věže
11. S-SGES úložiště energie s využitím gravitační síly v šachtě
12. P-SGES úložiště energie s využitím gravitační síly a pístu
13. CAP-GES ..úložiště energie stlačeného vzduchu s gravitačním principem a pístem
14. MMC-SGESúložiště energie s využitím gravitační síly a důlních vozíků
15. MCC-SGESúložiště energie s využitím gravitační síly a lanovky
16. LEM-SGES . úložiště energie s využitím lineárního elektromotoru a gravitační síly
17. PWM šířková modulace impulsu
18. BLDC bezkartáčový stejnosměrný motor

Úvod

Přechod na obnovitelné zdroje je doprovázen otázkou, kam se uloží energie získaná za vhodných podmínek pro větrné nebo solární elektrárny. Nabízejí se tři možnosti, první z nich bude prodat přebytek elektřiny při maximální generaci a následně ji odkoupit zpět v době nedostatku. Druhou možností je využití baterií, ale baterie nejsou bezúnikové. Pokud se tedy nebudou pravidelně nabíjet a vybíjet, tak energie bude unikat a jejich životnost bude klesat rychleji, pokud se budou nabíjet a vybíjet do extrémů. Třetí možností je tedy mechanické úložiště energie. Momentálně nejrozšířenějším typem jsou přečerpávací nádrže. Práce se zabývá mechanickým úložištěm využívajícím gravitační sílu obdobně jako přečerpávací elektrárny, ale místo vody se zvolí seismická hmota.

Budou uvedeny koncepty, které mají již modely ve skutečné velikosti jako například Energy Vault, které staví věže vršící betonové bloky na sebe. V Čechách se pracuje na modelu využívajícím staré důlní šachty, do kterých se spouští obrovské závaží a další koncepty budou představeny. Objevují se také návrhy na postavení úložiště na dně oceánů.

Návrh úložiště založený na konceptu snižování závaží o rozměrech 2 m do výšky a o hmotnosti závaží okolo 20 kg bude rozebrán a následně realizován. Součástí bude výpočet kapacity úložiště a porovnání s velikostí, která by byla schopna dobít jeden mobilní telefon. Ovládací algoritmus je zprostředkován mikrokontrolerem, který ovládá zvedání závaží, které následně roztáčí generátor.

Sestavení navrženého modelu a následné zhodnocení změřených parametrů bude cílem této práce, jako základní stavební kámen pro další rozšíření a úpravy úložiště pro lepší a efektivnější chod. Vše by mělo vést k soběstačnému stroji, který se nabije elektrickou energií z obnovitelného zdroje a v generátorovém režimu by mohl být soběstačný. Implementace takového úložiště do kombinace například s fotovoltaickou elektrárnou (zdrojem) by mělo za následek, že by taková elektrárna mohla být nepřerušovaným zdrojem elektrické energie. To samé by platilo pro všechny obnovitelné zdroje spárované s mechanickým úložištěm energie. V době, kdy by nebylo třeba generovat energii z úložiště by nedocházelo k jejímu úniku. Navíc taková úložiště mají výbornou životnost až 50 let.

1 Teoretický úvod

Ukládání elektrické energie mechanickým způsobem má nespočet řešení. Využívá základního poznatku gravitačního zákona, který byl poprvé popsán Isaacem Newtonem již v roce 1868 v rukopisu *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Dnes známý tvar gravitačního zákona v podobě rovnice 1. Abychom se dostali k tíhové síle v rovnici 2, zjednodušený vzorec druhé rovnice popsán rovnicí číslo 3, která působí v tíhovém poli, ve kterém tělesa nabývají potenciální energii popsanou rovnicí 6, potřebujeme složit již zmíněnou gravitační sílu a sílu odstředivou. [1]

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1)$$

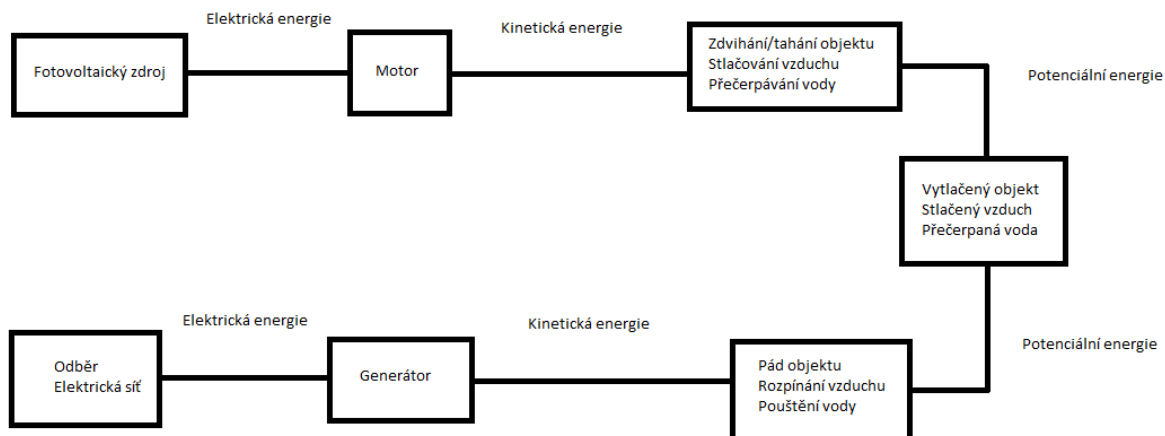
$$F_G = F_g + F_o \quad (2)$$

$$F_G = mg \quad (3)$$

Kde F_g je gravitační síla, G je gravitační konstanta ($G = (6,6742) \cdot 10^{-11} \text{m}^3 \text{s}^{-2} \text{kg}^{-1}$), m_1 a m_2 jsou hmotnosti těles, r je vzájemná vzdálenost těles, F_G je tíhová síla, F_o je odstředivá síla, g je tíhové zrychlení, E_p je potenciální energie a r je vzdálenost dvou těles na sebe působících.

Veškeré dále zmíněné principy ukládání elektrické energie budou založeny na těchto základních vztazích. Vracíme se tedy k základům mechaniky, které jsou známé již od 17. století a nejspíš se stanou opět velice relevantními v následujících letech, pokud se systémy ukládající elektrickou energii využívající gravitační energii prokážou nejefektivnějším způsobem ukládání elektrické energie v blízké budoucnosti.

Obr. 1 popisuje proces ukládání elektrické energie (EE) získané z obnovitelných zdrojů, v tomto případě z fotovoltaických zdrojů. V čase, kdy je přebytek nebo levná EE při malém odběru ze sítě se EE přivede do motoru. Motor převádí EE na kinetickou energii, která manipuluje s seismickou hmotou, stlačuje vzduch nebo přečerpává vodu. V případě vody a seismické hmoty se jedná o překonání síly tíhového pole a tím dochází k přeměně EE na mechanickou energii, která se dělí na kinetickou energii z rovnice 5 a energii potenciální z rovnice 6. Výsledkem je tedy uložení EE do energie potenciální v různých formách jako jsou například vytažený betonový kvádr na kopec, přečerpaná voda do vyšší nadmořské výšky oproti původní. Také lze uložit EE do potenciální energie stlačením vzduchu, ať už jako v našem případě za pomoci CAGES (compressed air gravity storage) nebo pouze CAES (compressed air energy storage), kde se však nevyužívá gravitační energie.



Obrázek 1: Proces ukládání elektrické energie z fotovoltaických zdrojů

pádu

$$E = E_p + E_k \quad (4)$$

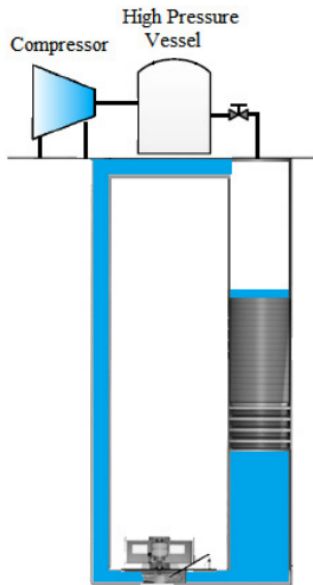
$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (5)$$

$$E_p = mgh \quad (6)$$

Kde E je celková energie systému, E_p je potenciální energie, E_k je kinetická energie, v je rychlost objektu pohánějícího generátor, m je hmotnost daného objektu a h je výšková vzdálenost počátku a konce (sjezdu, toku). [2]

Popsaný proces z obr. 1 [1] je obecně platný pro jakýkoliv obnovitelný zdroj energie, není tedy exkluzivní pro fotovoltaický zdroj. Pro úspěšnou implementaci úložišť EE pomocí gravitační energie, přiblížení se ke 100% odběru EE z obnovitelných zdrojů a zminimalizování uhlíkové stopy a ostatních znečištění, které ať už uhlí, plyn nebo jádro přináší, budou nejspíš nezbytné kombinace jednotlivých ESS s hybridními zdroji, tedy například kombinace fotovoltaické elektrárny s větrnou elektrárnou [3]. Existují nejen hybridní zdroje energie (kombinované elektrárny), ale také i hybridní úložiště energie, jako například CAGES (compressed air gravity energy storage) [4], které využívá poznatků a technologie z jednotlivých úložišť využívající stlačeného vzduchu a gravitace [5]. Spojením těchto dvou typů úložišť můžeme vyrobit síť vysokokapacitních úložišť elektrické energie (EES).

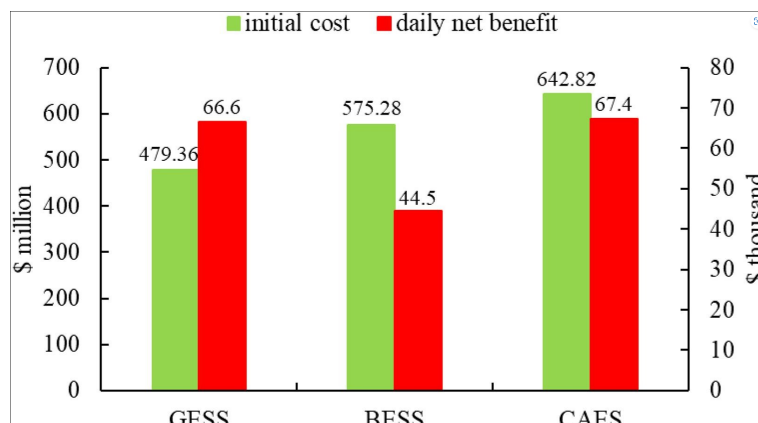
Mezi nejznámější a nejrozšířenější mechanické EES patří přečerpávací nádrže nebo-li PHES (pumped hydro energy storage), které u nás v České Republice mají zástupce na Dlouhých Stráních. Dále můžeme rozdělit mechanické EES do řady dalších druhů využívajících gravitace: S-GES(solid-gravity energy storage), DOGES(deep ocean gravity energy storage), CAGES (compressed air gravity energy storage) viz obr. 2, CAES(compressed air energy storage), který však nevyužívá gravitační energie.



Obrázek 2: Schéma CAGES [4]

Všechny tyto systémy spolu soupeří o budoucnost ukládání elektrické energie, které je naprosto nezbytné pro přechod na obnovitelné zdroje, které mají nestabilní přísun EE. Záleží na jejich kapacitě, rychlosti přísunu EE, účinnosti, výkonu, ceně a dalších parametrech.

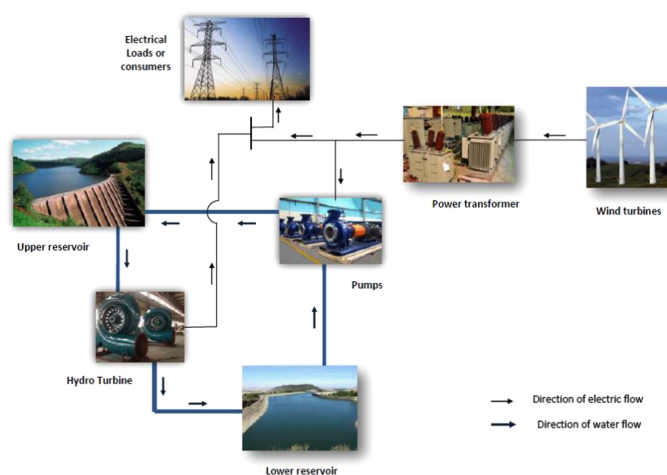
Pro ekonomické srovnání využití GES s ostatními druhy (CAES, BES) dle zdroje [1] vidíme, že nejmenší pořizovací cenu má GES a nejmenší denní zisk BES a to vše v kombinaci s WPS-HPS (wind power storage-hydro pumped storage), tedy hybridní elektrárna. Optimální kapacity dosáhneme také pokud uvažujeme kombinaci s GES. Odhadovaný zisk po zaplacení pořizovací ceny pro GES můžeme očekávat po 20 letech, pro CAES po 26 letech a pro BES po 36 letech. Z ekonomického hlediska se tedy GES zaplatí dřív než CAES a BES se nezplatí v rámci své životnosti.



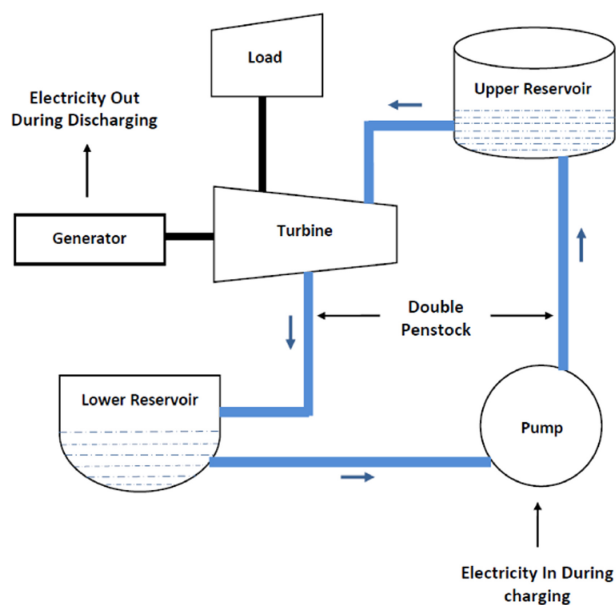
Obrázek 3: Graf srovnání GESS, CAESS a BESS [1]

1.1 PHES

V dnešní době nejzastoupenější mechanické úložiště energie PHES, které zastupuje až 96 % globální výkonové kapacity a až 99 % globálního objemu akumulace energie [6]. V časové úložnosti energie rámcově minut a hodin byly cenově dorovnány dnešními chemickými bateriemi, ale v rámci desítek hodin, dnů a týdnů jsou stále cenově výhodnější. Většina PHES je umístěna na tekoucí řece v souvislosti s vodní elektrárnou, z které se energie potom rovnou může ukládat a nemusí se tedy nikam vést a minimalizují se tím ztráty. Na obr. 4 je schéma principu PHES s větrnou elektrárnou a na obr. 5 je schéma principu PHES s fotovoltaickou elektrárnou.



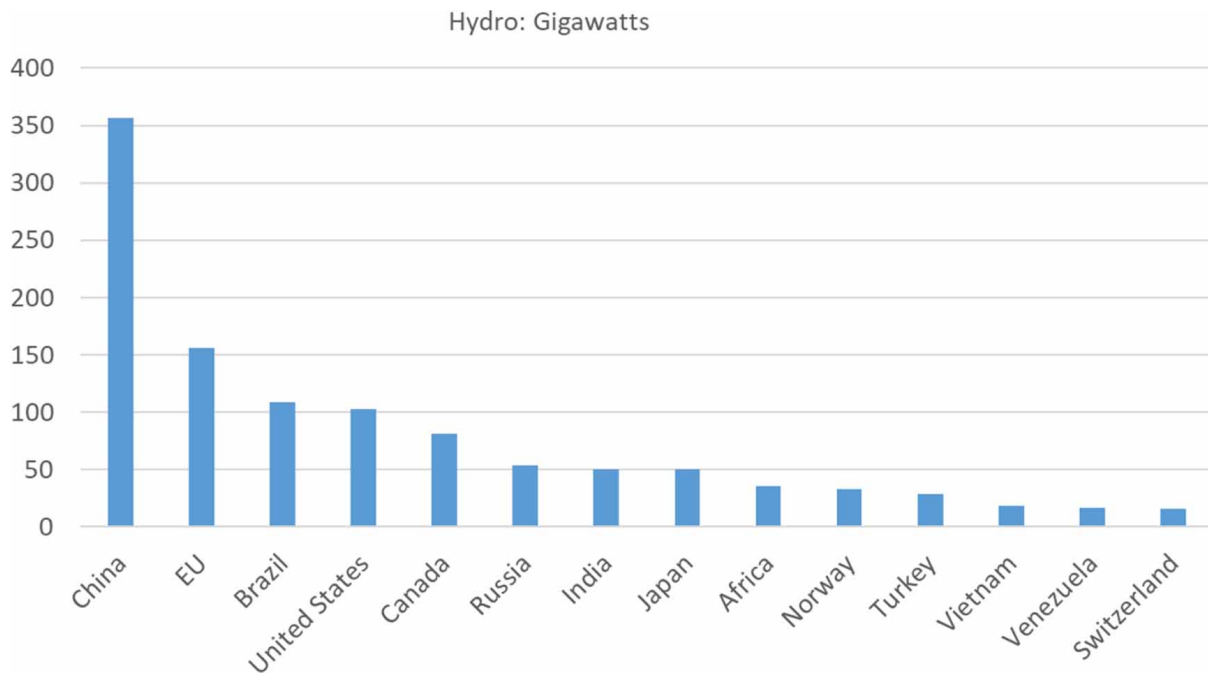
Obrázek 4: PHES v kombinaci s větrnou elektrárnou [7]



Obrázek 5: PHES s fotovoltaickou elektrárnou [7]

Obě schéma fungují na stejném principu, pouze jsou napájená z jiného zdroje odkud je energie použita na přečerpání vody z nádrže v nižší mořské výšce do nádrže v nadmořské výšce vyšší za pomoci čerpadla, vše toto se děje, když je elektřiny dostatek a přebytek odebírá PHES. Když je nedostatek energie z fotovoltaické nebo větrné elektrárny, voda

z výše položené nádrže se nechá samospádem téct z horní do dolní nádrže přes vodní turbínu, která zastupuje funkci generátoru. Tento systém má dobrou regulaci výkonu, rychlou odezvu na požadavek ze sítě. Kapacita jednoho PHES systému se může lišit od stovek kW až do stovek MW [7] a účinnost jednoho cyklu dosahuje až 80 %, 20 % ukládané energie se tedy ztratí, a to 10 % při ukládání a 10 % při generování [6]. Největší potíží s PHES souvisí s tím, že je třeba najít dobré geografické podmínky spolu s možnou plochou pro fotovoltaickou nebo větrnou elektrárnu, popřípadě vodní elektrárnu, kvůli zajištění zdroje pro úložiště. Na obr. 6 je graf srovnání kapacit PHES vybraných zemí.



Obrázek 6: Kapacity PHES vybraných zemí [6]

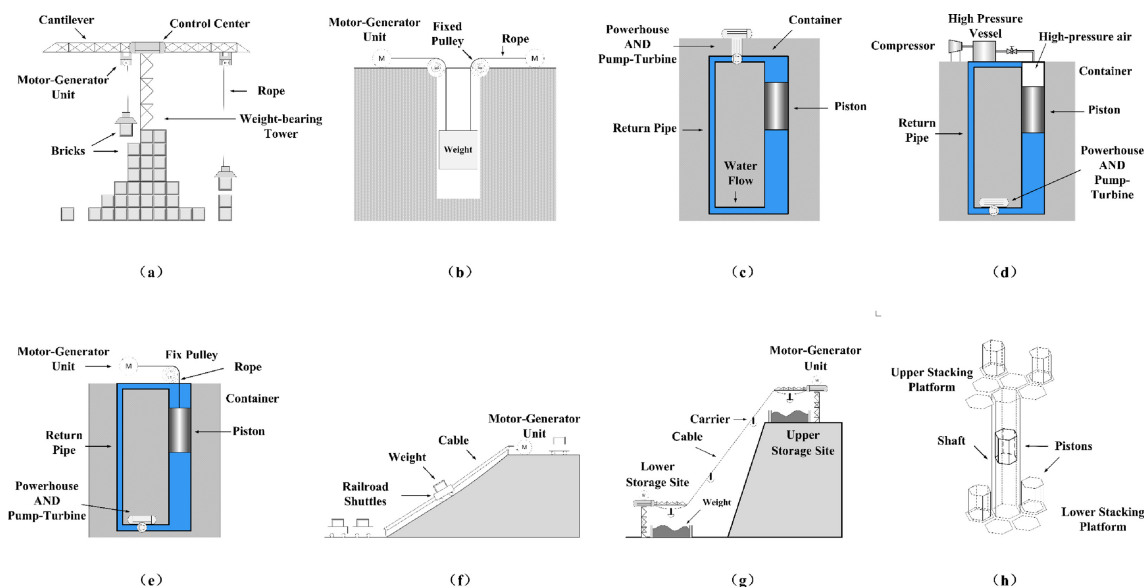
1.2 SGES

Ukládání energie je velice důležitá součást pro přechod na obnovitelné zdroje, je tedy nezbytné nalézt řešení, které je aplikovatelné i v jiných geografických podmínkách než PHES a případně s větší účinností a efektivitou. Jedním takovým řešením se nabízí S-GES (solid gravity energy storage), úložiště energie využívající seismickou hmotu. Základní výhody S-GES zahrnují: nízká pořizovací cena, životnost, velká kapacita úložiště, geografická nezávislost, účinnost cyklu, škálovatelnost a bezpečnost [8]. Na obr. 7 můžeme vidět jednotlivé druhy S-GES.

1.2.1 Tower SGES

T-GES je systém založený na pokládání bloků, z materiálu o veliké hustotě (možnost využití odpadových materiálů), jeden na druhý za pomoci víceramenného jeřábu, jak můžeme vidět na obr. 8. Ramena pracují souběžně pro lepší schopnost a efektivitu ukládání energie a plynulejší vybíjení, kdy při jednom rameni by mohlo dojít k přerušení dodání energie při změně bloku. Se spodní úrovní bloků se po dobu života systému nehýbe,

vytváří základnu pro vyšší úrovně. Jako u všech S-GES hraje velkou roli v účinnosti elektromechanické ústrojí, které převádí elektrickou energii na mechanickou potenciální a poté zpět, protože účinnost nebude nikdy vyšší než je účinnost samotného elektromechanického ústrojí [9].



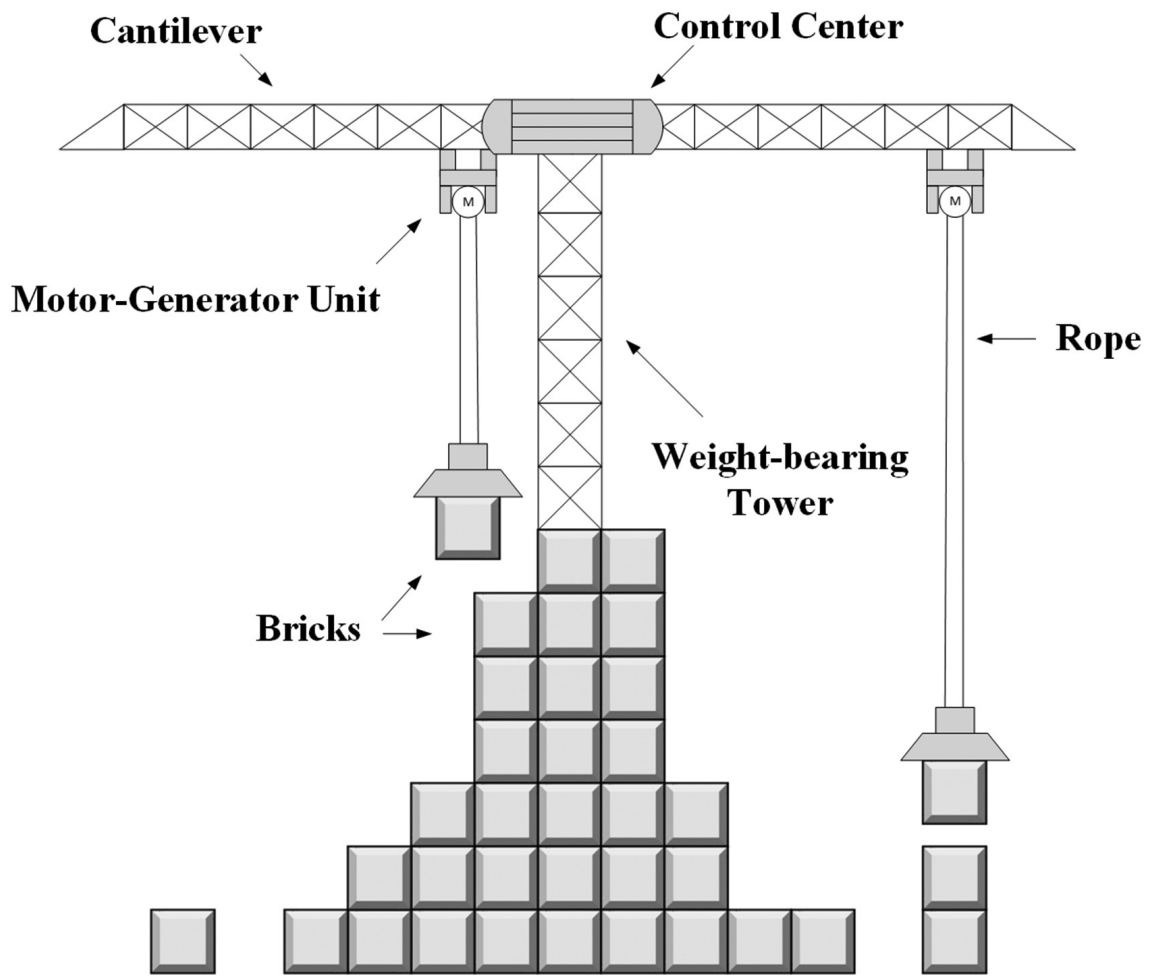
Obrázek 7: Přehled druhů EES s využitím gravitační energie pevné hmoty [10][8]

1.2.2 Shaft SGES

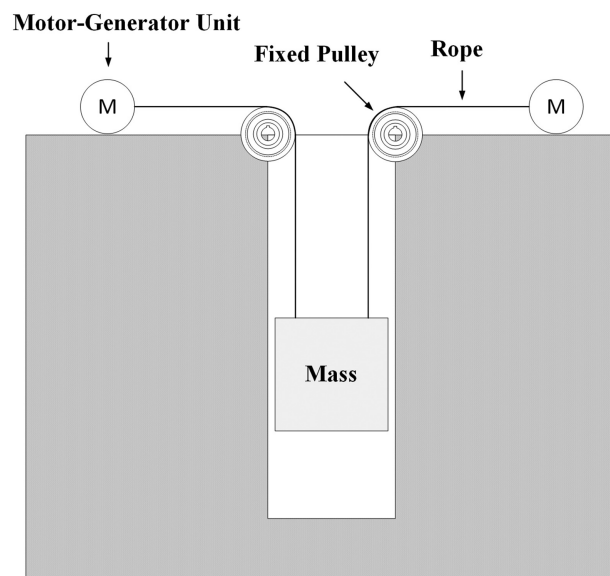
S-SGES je GES, které využívá starých důlních šacht, které jsou již nepoužíváné, je tedy formou GES, která je podmíněná geografickou lokalitou. Využívá pouze jednoho masivního bloku (o hmotnosti 500-5000 t), který tahá nahoru a spouští dolů v důlní šachtě o hloubce alespoň 300 m [8]. Jako jednu z hlavních výhod S-GES vnímám minimální využití prostoru nad povrchem. Tato metoda dosahuje až 80 % účinnost cyklu při použití hmotnosti 3000 t [11]. Další důležitou informací pro tento systém je, že nejvýkonější jeřáb na světě dokáže uzvednout maximálně 20000 t [12]. Tento systém lze také kombinovat s CAES, lze také využít uzavření prostoru šachty pro zdvihání za pomoci hydrauliky ve formě vodního pístu zdvihajícího závaží a ještě lze přidat nádobu, do které celý systém navíc stlačí vzduch, ale to už je součástí dalších možných provedení.

1.2.3 Piston SGES

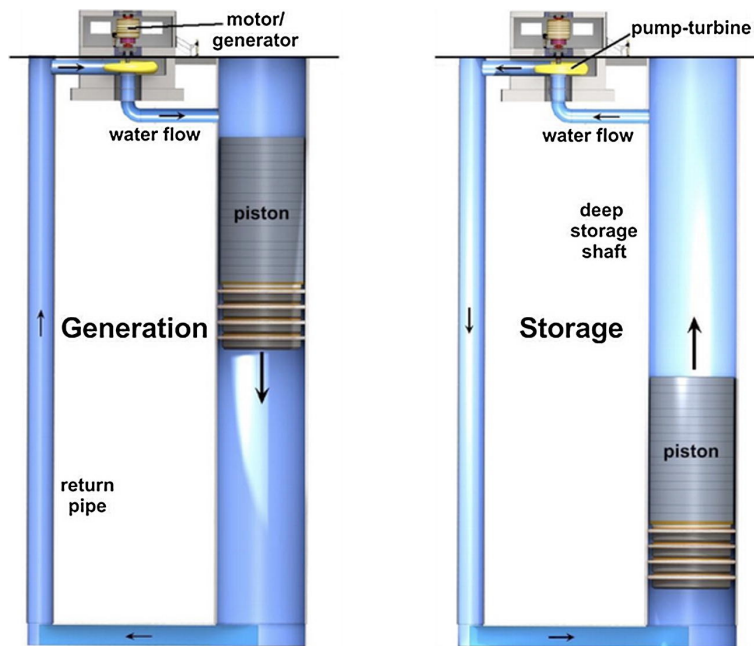
P-SGES je jednou z dalších variant pro ukládání energie pomocí gravitace. Jak vidíme na obr. 10, mezi vybavení potřebujeme uzavřený prostor, ve kterém voda zdvihá píst nahoru pomocí čerpadlové turbíny, která se v opačném směru chová jako generátor. Na obr. 10 vlevo je stav vybíjení při nedostatku energie a vpravo nabíjení při přebytku energie. Stejně jako předchozí model S-GES je účinnost dle modelu až 80 %, rychlost odezvy na požadavek energie, by měla však být vyšší než u předchozích modelů. Kvůli pohybu ve válci je nutné použít materiály zajišťující minimální kluzné tření, doporučeným materiálem [13] je ocel, a nebo železobeton pro lepší těsnění.



Obrázek 8: T-SGES [8]



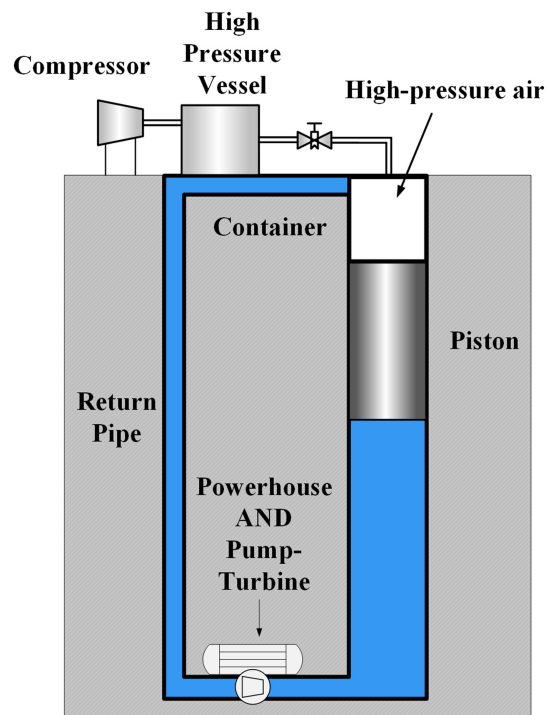
Obrázek 9: S-SGES [8]



Obrázek 10: Piston-SGES [14]

1.2.4 Compressed Air Piston SGES

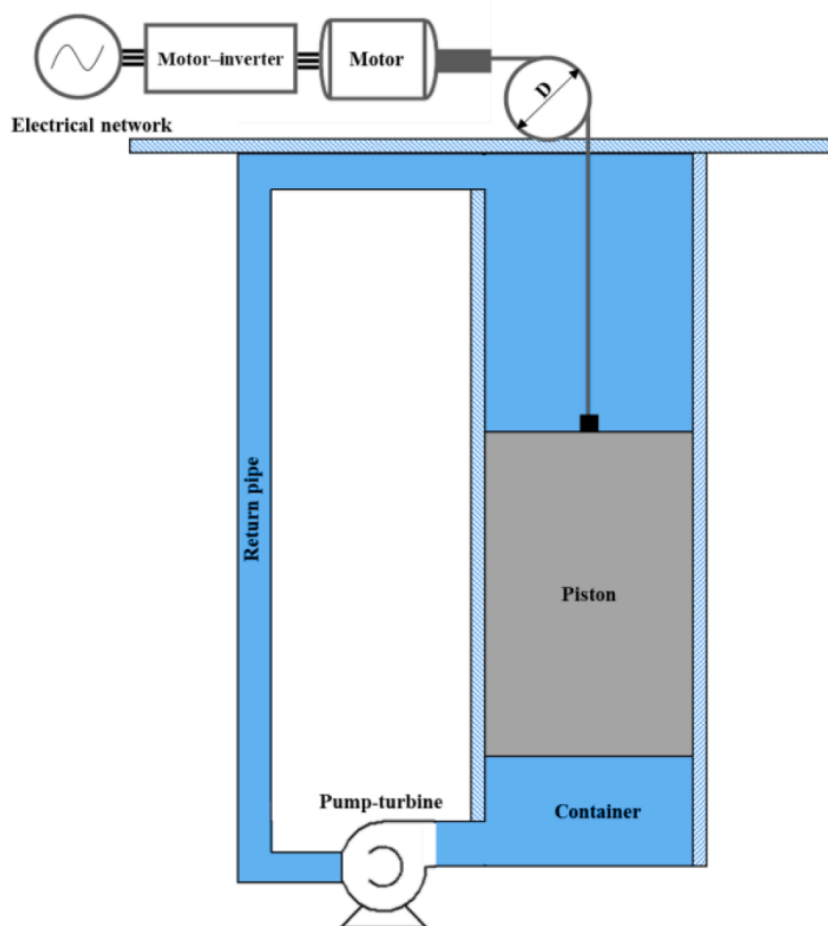
CAP-GES přidává další komponenty do systému P-GES, a to vzduchový kompresor a tlakovou nádobu na stlačení vzduchu. Z uzavřeného cyklu, kde jediné medium byla voda je nyní nad pístem vzduch, který je stlačován při ukládání energie spolu se zdviháním pístu pomocí vodního čerpadla. Touto kombinací zvětšíme kapacitu úložiště, podobně jako kdybychom zvětšili hloubku systému P-GES pro rozšíření kapacity [8].



Obrázek 11: CAP-GES [8]

1.2.5 Rope-hoisting piston SGES

Podobným způsobem jako CAP-GES můžeme upravit P-GES přidáním další elektro-mechanické jednotky, která bude při ukládání energie pomáhat vodnímu čerpadlu při zdvihání a při generaci energie se bude motor chovat jako generátor. Těmito úpravami dosáhneme zvýšení jmenovitého výkonu [15] oproti základní realizaci P-GES. Tento druh úložiště energie je stále ve fázi konceptu.

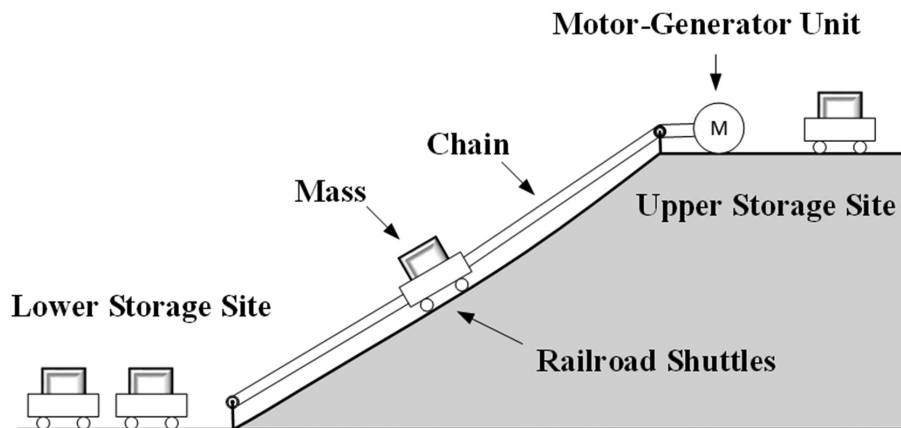


Obrázek 12: Rope-hoisting Piston GES [15]

1.2.6 Mountain Mine-Car SGES

Mountain Mine-Car SGES už není pouze ve fázi konceptu, ale projekt ARES tuto teorii převádí do praxe v USA, Nevada. Tento způsob ukládání energie je přímočarý. Nezáhrnuje žádnou složitou kombinací technologií a jeho škálování by nemělo být složité uskutečnitelné. Účinnost jednoho cyklu se pohybuje mezi 80-90 % a díky jednoduchosti provedení je to relativně bezpečný projekt. Rychlost odezvy je lepší než u následujícího konceptu Mountain Cable-Car SGES, ale oba koncepty mají nižší životnost, kvůli většímu opotřebení materiálů. MMC-SGES má značně větší tření a sklon, pod kterým se pohybují vozíky, je mezi 6-25°, přičemž čím menší sklon tím menší efektivita a čím větší sklon,

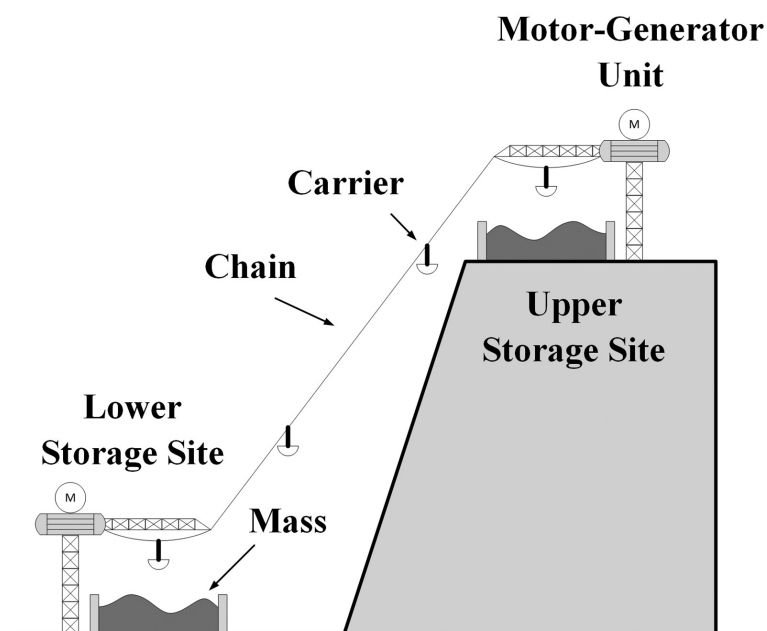
tím náročnější je realizace a výběr materiálů. Mezi nevýhody bych uvedl geografické podmínky, cenu závaží do vozíků a vysoké tření snižující efektivitu.



Obrázek 13: Mountain Mine-Car SGES [8]

1.2.7 Mountain Cable-Car SGES

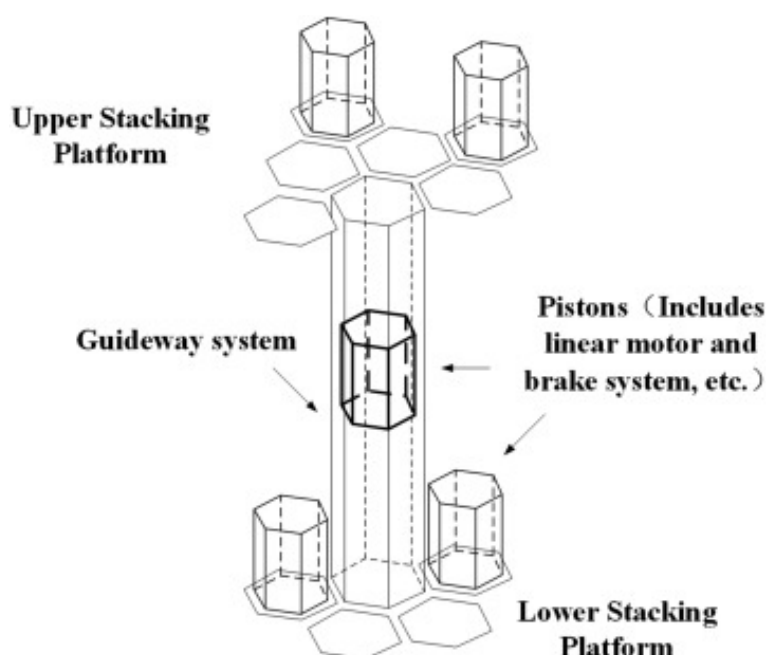
Mountain Cable-Car SGES je pozměněnou verzí MMC-SGES, kde místo vozíků cestuje závaží na lanovce v zavěšených vozíčkách a nahore je vyklopeno na horní skladovací plochu, odkud je v době potřeby odběru energie sváženo zpět dolů. Jedná se o přečerpávací vodní elektrárnu, ale musíme si to představit bez vody. Narozdíl od MMC-SGES je možné využít mnohem prudší kopce a převýšení a škálovatelnost zůstává stále velice proveditelnou. První prototyp byl postavený už v roce 2012 v Californii. Účinnost jednoho cyklu dosahuje až 85 %.



Obrázek 14: Mountain Cable-Car SGES [8]

1.2.8 Linear electric machine-based SGES

LEM-SGES využívá hexagonálních bloků, které jsou přesouvány z dolního úložiště do horního úložiště v době ukládání energie. Pohyb je realizován naváděcím systémem elektrických lineárních motorů. Využitím lineárních motorů pomocí naváděcího systému můžeme převádět energii přímo bez využití dalších komponentů jako u předešlých systémů (například lano mezi motorem a blokem), tím můžeme omezit opotřebení součástí systému, popřípadě zmenšit ztrátu energie při převodu. Protože v tomto systému využíváme lineárních motorů, které pracují s využitím magnetického pole musíme uvážit potřebu materiálu, které musí tedy být z feromagnetického materiálu, abychom mohli uskutečnit takový systém ukládání energie. Takovýto systém dosahuje až 95% účinnosti cyklu [16], [17].

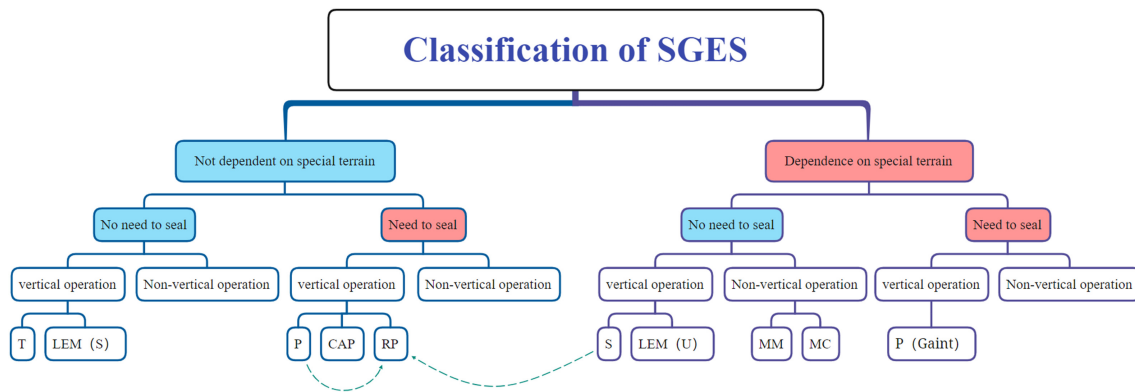


Obrázek 15: Linear Electric Machine-Based SGES [8]

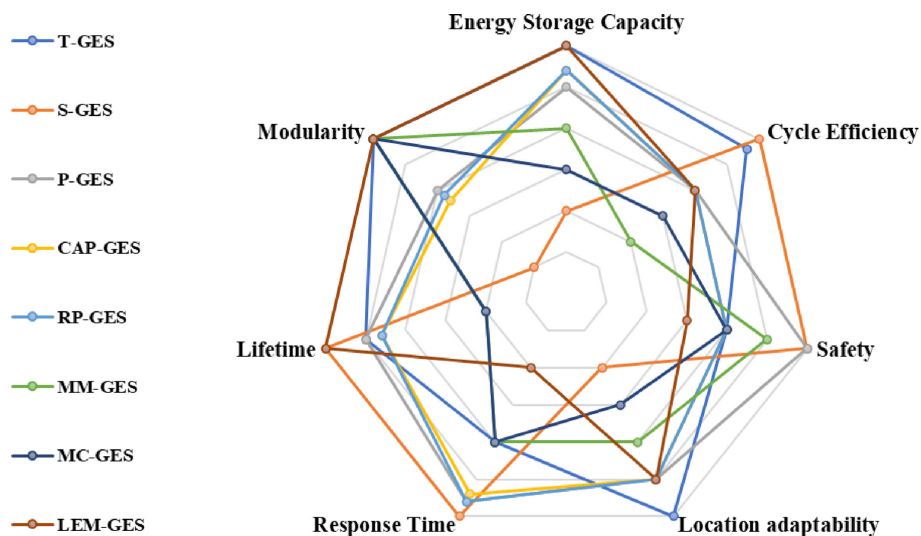
1.2.9 Srovnání SGES

Každý z uvedených konceptů má své nevýhody a výhody. Na obr. 16 a 17 můžeme vidět klasifikaci SGES dle geografických podmínek a porovnání dle paramterů: kapacita úložiště, účinnost cyklu, bezpečnost, životnost, rychost odezvy, přizpůsobivost terénu, modularita.

Protože existuje mnoho možností a konceptů jak realizovat EES pomocí gravitace, lze tedy konstatovat, že je možné je postavit kdekoli, stačí pouze vybrat vhodný model pro danou lokalitu. Po porovnání všech SGES vychází, že T-SGES má v průměru nejlepší parametry a jako jediné provedení nevyžaduje speciální lokaci, těsnění ani druh závaží jako medium ukládání energie. T-SGES disponuje spolu s LEM-GES největší kapacitou, ale zaostávají v rychlosti odezvy.



Obrázek 16: Srovnání SGES podle geografických podmínek a těsnění [10]



Obrázek 17: Srovnání SGES uvedenými parametry [10]

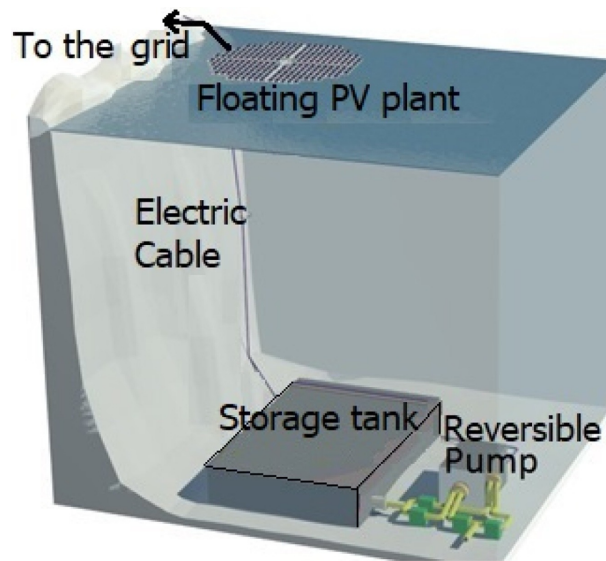
Nejvhodnějším konceptem pro model, který budu realizovat, jsem shledal S-GES, ale namísto šachty bude postavena konstrukce připomínající T-GES model. K takovému výběru jsem dospěl, protože cílem je změřit parametry takového stroje a z výsledků udělat závěr, který se může zabývat tím, co by následně bylo výhodnější.

1.3 Deep ocean gravitational energy

Pro ostrovy nebo přímořské státy se nabízí systém DOGES. Nabízí se několik principů využívající hloubky oceánů. Představím jeden, který operuje s čistou vodou, a druhý operující se slanou vodou (bude tedy potřeba turbínu upravenou pro slanou vodu).

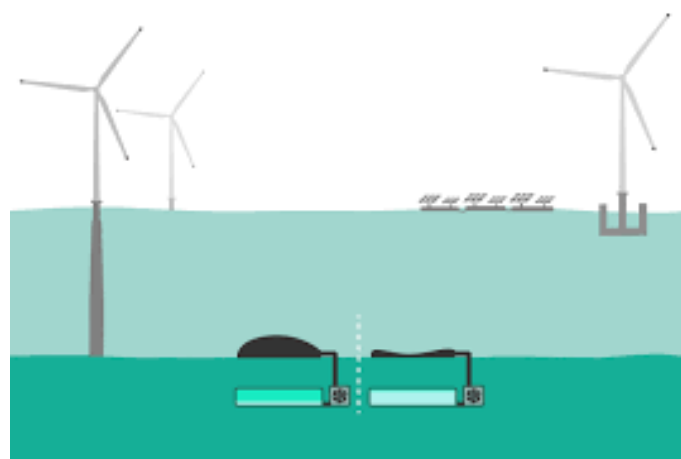
První koncept viz obr. 18 využívající slanou vodu je založený na potopené konstrukci, která se skládá z dutých trubek nebo koule, které jsou propojené s vodní pumpou/turbínou, která je připojená na elektrickou síť a na zdroj obnovitelné energie. Při přebytku energie se voda z trubek/koule vypouští a tím se ukládá energie. Při dostatku se poté voda nechá tlačit zpět do struktury přes turbínu, a tím se generuje energie zpět. Účinnost je tedy závislá na účinnosti turbíny. Pro jednoduchou údržbu lze využít Archimédova zákona pro zdvižení celého systému k hladině, ale také je potřeba ukotvit daný

systém ke dnu, protože v době uložené energie by mohl celý systém vyplout nahoru. Tento koncept je výhodně použitelný až pro hloubky větší než 500 m [18].



Obrázek 18: Deep Ocean Gravity Energy Storage schéma [18]

Druhý koncept využívá sladké vody, která se drží v tancích pod hladinou moře a při přebytku energie ze sítě se voda přečerpá do elastických vaků na dně oceánu, a tím se ukládá energie. V době potřeby energie se následně nechá voda vytlačit z vaků přes turbínu zpět do tanků díky gravitační síle na dně oceánu. Vzhledem k tomu, že se zde využívá sladké vody, není potřeba speciální turbíny upravené pro slanou vodu. Ve skutečnosti se pouze jedná o předělaný způsob PHES, který místo nutnosti geografické lokality pro přečerpávání do vyšší nadmořské výšky a zpět, využívá tlaku na dně oceánu. Díky mnoha různým způsobům vyvíjejícím se v dnešní době je důležité využívat této rozmanitosti a nesnažit se najít jeden nejlepší způsob. Je to podobné jako u fotovoltaických článků a větrných elektrárnách. Jsou lokality, kde vyniká jeden projekt nad druhým. [19]

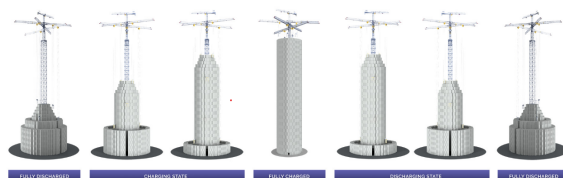


Obrázek 19: Ocean Battery [19]

1.4 Energy Vault

Zástupcem T-GES konceptu je EV1 postavené společností Energy Vault ve Švýcarsku. Věž s 6 rameny, pomocí kterých vrství bloky z vybraného materiálu na sebe pro ukládání elektrické energie. Na obr. 20 vidíme cyklus nabíjení a vybíjení úložiště EV1. [20]

- Kapacita: 20-80 MWh
- Výkon: 4-8 MW
- Doba vybíjení: 8-16 hodin
- Hmotnost bloku: 35 tun
- Výška věže: 210 m
- Účinnost cyklu: 80 %
- Životnost: 30+ let



Obrázek 20: Cyklus nabíjení a vybíjení EV1 [20]



Obrázek 21: Gravitační úložiště energie EV1 [20]

1.5 Gravitricity Morava

Gravitricity svůj projekt staví v dole Staříč v české republice a je založený na konceptu S-GES. [21]

- Kapacita: jedno závaží 2 MWh
- Výkon: 4-8 MW
- Doba vybíjení: $\frac{1}{4}$ -8 hodin
- Hmotnost bloku: 500-5000 tun
- Hloubka dolu: 1 km
- Účinnost cyklu: 80-90 %
- Životnost: 50 let



Obrázek 22: důl Staříč - projekt Gravitricity [21]

1.6 Gravity Power

Gravity power realizuje koncept P-GES, zatím neuvádí tolik parametrů jako ostatní projekty. [22]

- Kapacita: až 1000 MWh na závod
- Účinnost: závislá na technologii turbíny
- Nákladově efektivní - $\frac{1}{2}$ ceny baterie
- Bez úniku vody
- Životnost: 40+ let

1.7 ARES

ARES převádí koncept MMC-GES do praxe v Nevadě, USA. Na rozloze 20 akrů staví 10 souběžných tratí pro vozíky, které vyjedou do kopce pro uložení energie a sjedou dolů, aby energii generovali. Díky více tratím, je možné mít plynulý přísun energie. [23]

- Kapacita vozíku: 250 kWh
- Výkon: 50 MW
- Počet vozíků: až 210
- Převýšení: 300 m
- Životnost: 20-40 let
- Doba vybíjení $\frac{1}{4}$ -12 hodin
- Účinnost cyklu: 80 %



Obrázek 23: Testovací vozík projektu ARES [24]

2 Praktická část

2.1 Návrh

2.1.1 Konstrukce

Konstrukce byla zhotovena z dřevěných stavebních latí, zpevněná zavětrávacími kvádry. Motor bude upevněn na největší ploše uvnitř kvádry. Motor je propojený s hřídelí navijáku, který pomocí ocelového lana přes kladku umístěnou v horním bodu konstrukce tahá závaží nahoru. Elektronika je poté připevněna z druhé strany desky, vně konstrukce naproti motoru dle přílohy B.

2.1.2 Blokové schéma obvodu

Blokové schéma, viz obr. 24, znázorňuje celý obvod po blocích, které mohou obsahovat více částí. Ukazuje nezbytný základ návrhu, ke kterému se mohou ještě přidat další bloky například ve formě step-up konvertoru na výstup, v případě potřeby většího napětí.

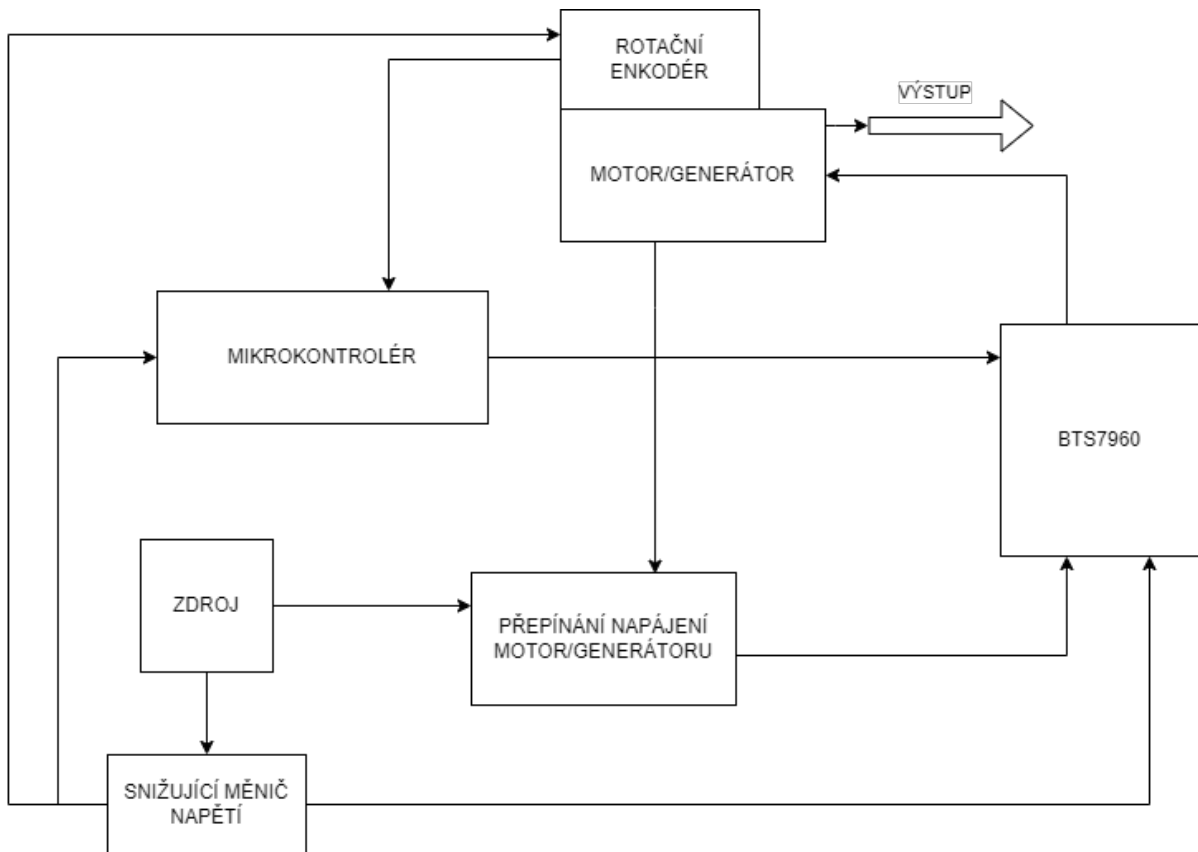
2.1.3 Mikrokontrolér

Pro ovládání mechanismu byl vybrán klon Arduino UNO Rev3. Arduino Uno Rev3 má výhodu nízké ceny a kompatibility s mnoha periferiemi a senzory. Využity byly analogové vstupy, digitální vstupy, digitální výstupy s PWM možností. Základní parametry desky v tab. 1. Pomocí výstupních pinů, které poskytují signál ve formě pulzně šířkové modulace (PWM) se řídí rychlost otáček motoru a generátoru.

Tabulka 1: Základní parametry klonu Arduino UNO Rev3

Parametr	Hodnota
Mikrokontrolér	ATmega328P
Napětí napájení	5 V
Napájecí konektor	Barrel Jack
Napájení přes USB	Ano
Digitální piny	14
PWM piny	6
Analogové vstupní piny	6
Flash paměť	32 KB
SRAM paměť	2 KB
EEPROM paměť	1 KB
Frekvence procesoru	16 MHz

Arduino je prozatím napájené počítačem, ale je třeba vyřešit, aby nemusel být počítač přítomen. Nabízí se tedy možnost externí baterie, která by se dobýjela z fotovoltaického panelu v době, kdy má dostatečný výkon a případně v době potřeby ze samotného úložiště v generátorovém režimu.



Obrázek 24: Blokové schéma obvodu úložiště energie

2.1.4 Motor/Generátor

Při výběru motoru jsem srovnal hlediska jako složitost provedení, předpokládaná účinnost, cena a efektivita. V úvahu jsem bral dvě možnosti: BLDC (bezkartáčový stejnosměrný), kartáčový stejnosměrný¹.

1. Přehled

(a) BLDC motor:

- Trvalý magnet zajišťuje vysokou efektivitu a výkon.
- Potřebuje speciální řídicí elektroniku pro správnou funkci a zpětnou vazbu.
- Kompatibilní s režimem generátoru, ale vyžaduje speciální zařízení pro zpětné napětí.
- Nízká úroveň šumu a vibrací.

(b) Kartáčový DC motor:

- Jednoduchá konstrukce a ovládání.
- Možnost regulace rychlosti pomocí napětí.
- Náchylný k opotřebením kartáčů a komutátoru, což může vést ke ztrátě výkonu a zvyšování úrovně šumu.

¹možnost asynchronního motoru s alternátorem není zvážena pro skutečnost, že jako napájení je použit fotovoltaický panel, který generuje stejnosměrné napětí

- Kompatibilní s režimem generátoru, ale měl by nižší účinnost kvůli vnitřním ztrátám.

2. Shrnutí

- Z hlediska efektivity a výkonu by bezkartáčový stejnosměrný motor byl lepší volbou, ale vyžadoval by speciální řídicí elektroniku a zpětnou vazbu. Kartáčový DC motor by byl jednodušší na ovládání, ale mohl by být náchylný k opotřebením a měl by nižší účinnost v režimu generátoru.
- Celková složitost aplikace by byla vyšší u BLDC motoru, kvůli potřebě speciální řídicí elektroniky a zpětné vazby. Kartáčový DC motor by měl střední úroveň složitosti
- Z hlediska kompatibility s režimem generátoru by byly oba druhy motorů kompatibilní, ale vyžadovaly by různá zařízení pro zpětné napětí nebo synchronizaci a regulaci.

3. Výběr

Na závěr jsem tedy dospěl k výběru kartáčového DC motoru díky střední obtížnosti implementace, a to za cenu střední/nízké efektivity. Parametry motoru viz tab. 2. [25], [26]

Tabulka 2: Parametry motoru

Parametr	Hodnota
Převodový poměr	81:1
Jm. napětí	24 V
Jm. moment motoru	650 g·cm
Jm. otáčky motoru	5450 ot/min
Jm. proud	≤900 mA
Otáčky motoru naprázdno	6000 ot/min
Proud naprázdno	≤750 mA
Jm. výkon	48,3 W
Max. trvalý moment převodovky	100 kg·cm
Jm. otáčky převodovky	66,5 ot/min
Účinnost	60 %

2.1.5 Rotační enkodér

Je to magnetický enkodér s hallovými sondami, slouží k měření otáček motoru. Tento typ enkodéru obsahuje dva senzory posunutý o 90 stupňů, které generují signál čtený arduinem. Parametry enkodéru viz tab. 3.

V aplikaci je použitý pro zjištění, kdy se má seismická hmota zastavit vzhledem k její poloze, aby nedošlo k poškození konstrukce při dobíjení úložiště. Také je použitý pro čtení rychlosti při její regulaci a zároveň kdy má dojít ke zpomalení otáček a pro bezpečné zabrzdění v generátorovém režimu.

Tabulka 3: Parametry enkodéru

Parametru	Hodnota
Typ enkodéru	Magnetický enkodér s hallovými sondami
Počet senzorů	2
Posun senzorů	90 °
Výstup	Otevřený kolektor
Pulsů na otáčku motoru (PPR)	5
Napájecí napětí	3,5 - 20 V

2.1.6 Testovací zdroj

Finálním zdrojem pro tento model by měl být solární panel s napětím 24 V, ale je možné použít dva 12 V panely zapojené do série. Při realizaci a pro testování byl použit 24 V zdroj LYONZG S-100-24, základní parametry viz tab. 4.

Tabulka 4: Parametry napájecího zdroje

Parametru	Hodnota
Vstupní napětí	AC 85-264 V 47-63 Hz
Výstupní napětí	24 V
Výstupní proud	max. 4.1 A
Výstupní výkon	max. 100 W
Rozsah provozních teplot	-20-60°C
Rozsah provozní RH relativní vlhkosti	20-90 %
Ochrana proti přetížení	Ano
Ochrana proti zkratu	Ano
Ochrana proti přehřátí	Ano
Ochrana proti nadproudu	Ano

2.1.7 Ovladač motoru

Prvním návrhem bylo použít H-můstek a využít možnosti ovládání obou směrů například pro rychlejší roztočení generátoru na chtěné otáčky, případně místo brzdění by se dalo dojetí závaží do původní pozice kontrolovat H-můstkem. Jako základ byla provedena možnost spínání motoru zapojením přímo do zdroje pomocí relé, které přepíná režim generátoru a motoru. Relé bude ještě popsáno v režimu přepínání.

Jako ovladač poskytující proudové a napěťové ochrany byl zvolen BTS7960 se specifikacemi v příloze.

2.1.8 Přepínání napájení Motor/Generátor

Přepínáním režimu je zde myšleno přepnutí zdroje, aby se napájelo z generátoru místo ze solárního panelu a zároveň k přepólování výstupu z generátoru.

Při navrhování byly uvažovány dvě varianty, uvedeny jsou zde obě, ale konstruována bude varianta A:

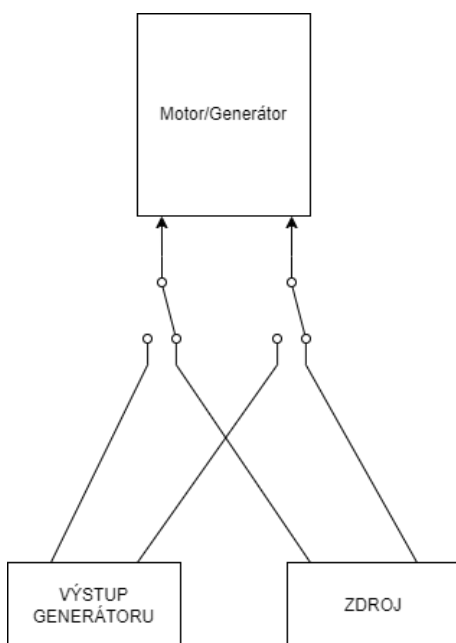
1. Varianta A

Varianta A řeší problém na základní úrovni, kdy jsou použité manuální přepínače. Jedná se o řešení, kdy není potřeba složitější řešení s napájením automatických přepínačů, které by umožnily automatizaci celého stroje.

2. Varianta B

Varianta B má za úkol vyřešit automatizaci úložiště a později přidat možnost řízení na dálku. Jedná se o nahrazení manuálních přepínačů modulem s relátky, u kterých by došlo k automatickému sepnutí. Podmínky sepnutí by byly regulovány automaticky, a to po příchodu signálu, který by se vytvořil při nedostatku energie ze solárního panelu. Druhá možnost by byla ovládáním na dálku, které by mohlo být zprostředkováno přes mobilní telefon.

Přepínání Varianty A obsahuje dva přepínače pro přepínání napájení motoru/generátoru. Přepínání mezi solárním panelem (původně zdrojem napětí v testovací fázi) a generátorem je znázorněné na obr. 25 .



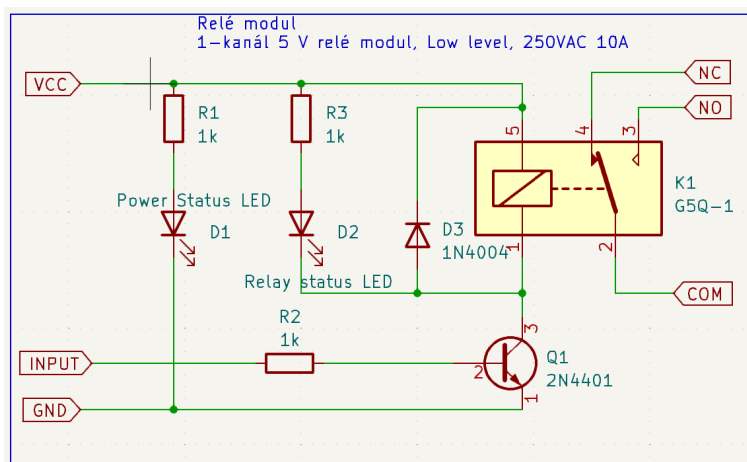
Obrázek 25: Základní manuální přepínání

Relé modul pro Variantu B viz obr. 26 je složený z:

- Single ISO9002
- 2x LED: D1 indikující stav sepnutí a D3 stav napájení
- Spínací bipolární tranzistor Q1 2N4401
- Diodu D3 model 1N4404
- 3 Resistory s hodnotou $1k\Omega$

Varianta B by nahradila manuální přepínače ze schématu viz obr. 25 a umožnila by již zmíněnou automatizaci, ale bylo by zapotřebí přidat další zdroj energie, nejlépe menší

baterii nebo superkondenzátor, který by zajistil přechod mezi režimy motoru a generátoru, aniž by došlo k dočasnému přerušení a nechtěnému sepnutí/rozepnutí obvodu.



Obrázek 26: Relé modul 5 V

2.1.9 Rekuperační dioda a zpětné proudy

Rekuperační dioda se používá k ochraně před zpětnými proudy, které mohou vznikat při použití motoru jako generátoru. Tyto proudy mohou poškodit baterii nebo celý obvod. Proto se rekuperační dioda umísťuje před baterii, aby se zabránilo zpětným proudům. Umístění těchto diod je orientováno tak, aby proud mohl volně téct do motoru a nepoškodil řídicí obvod a zároveň mohl volně téct do baterie z generátoru, ale netekl zpět z baterie do generátoru.

Zpětné proudy, které vznikají při brzdění motoru a při používání motoru jako generátoru, jsou způsobeny elektromagnetickou indukcí vodiče v magnetickém poli. Tyto proudy jsou řízeny Lenzovým zákonem, který stanovuje, že zpětný proud působí v opačném směru k původnímu proudu, který způsobil indukci. Tyto zpětné proudy mohou mít velmi vysoké hodnoty, což může vést k poškození součástí obvodu. Proto je důležité použít rekuperační diody, které umožní proudu volný tok pouze jedním směrem a ochrání obvod před zpětnými proudy. Vypočítat velikost těchto proudů může být složité, protože závisí na mnoha faktorech, jako jsou rychlost motoru, magnetické pole a velikost indukovaného napětí.

Lenzův zákon: Tento zákon říká, že každý pokus o změnu magnetického toku v určitém obvodu způsobí v tomto obvodu elektromotorické napětí, které bude směřovat proti této změně. To znamená, že pokud se v obvodu zvýší magnetický tok, elektromotorické napětí povede ke snížení toku, zatímco pokud se tok sníží, elektromotorické napětí bude působit na zvýšení toku.

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Kde \mathcal{E} je elektromotorické napětí, Φ_B je magnetický tok a t je čas. Tato rovnice popisuje změnu elektromotorického napětí v závislosti na rychlosti změny magnetického toku.

$$\mathcal{E} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$$

kde \mathbf{B} je magnetická indukce (vektorová veličina) a S je plocha, kterou vodič protíná v magnetickém poli. Symbol $d\mathbf{S}$ značí element plochy, kterým integrujeme přes celou plochu S .

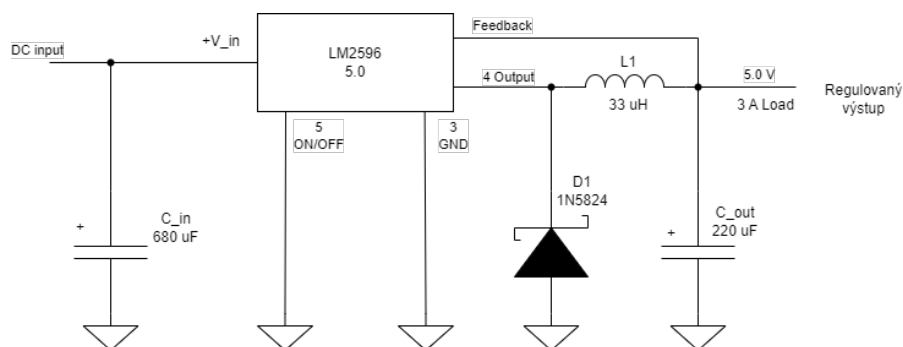
2.1.10 Step-down konvertor

V modelu pro ukládání elektrické energie v mechanickém úložišti jsem se rozhodl využít spínaný regulátor napětí ve formě step-down konvertoru. Pro realizaci step-down konvertoru jsem se rozhodl použít čip LM2596.

Typické složení step-down konvertoru obsahuje cívku, diodu a dva kapacitory:

- Cívka ukládá energii v proudu a následně ji uvolňuje do výstupního obvodu
- Dioda umístěná paralelně s cívkou pro ochranu obvodu proti zpětným proudům, které by mohly jinak poškodit vstupní zdroj
- Kapacitory slouží k stabilizaci vstupního napětí a eliminaci případného šumu

Schéma na obr. 27 ukazuje zapojení součástek s řídicím prvkem LM2596 a tab. 5 ukazuje hodnoty součástek.



Obrázek 27: Schéma návrhu step-down konvertoru

Tabulka 5: Součástky step-down konvertoru

Součástka	Model/Hodnota
Vstupní kapacitor	680 μF
Výstupní kapacitor	220 μF
Cívka	33 μH
Dioda	1N5824

LM2596 je integrovaný spínaný napěťový regulátor, který umožňuje efektivní snižování napětí s minimálními ztrátami energie. Základní parametry LM2596 viz tab. 6.

Tabulka 6: Parametry LM2596

Parametr	Hodnota
Vstupní napětí	4,5-40 V
Výstupní napětí	1,25-37 V
Výstupní proud	3 A
Efektivita	Až 92 %
Frekvence spínání	150 kHz
Provozní teplota	-40 °C až 125 °C

2.1.11 Velikost úložiště

Kapacita a výkon úložiště závisí na dvou hlavních parametrech, a to na hmotnosti seismické hmoty a na vzdálenosti mezi startovacím bodem a konečným bodem. V případě mého modelu vzdálenost od země až po kladku, která je připevněna k vrcholu konstrukce (tvaru věž). Při hmotnosti 20 kg a výšce 2 m můžeme spočítat kapacitu úložiště:

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad (7)$$

$$E_p = 20 \cdot 9,81 \cdot 2 = 392,4 \text{ J}$$

kde E_p je potenciální energie, m je hmotnost, h je výška a g je tíhové zrychlení.

Jako příklad, čeho bych chtěl dosáhnout aproximací pomocí mého modelu jsem si vzal svůj telefon iPhoneXR s baterií HRG-H11 v Li-Ion provedení s kapacitou 2942 mAh. Pro lepší představu bych převedl 2942 mAh na jouly.

$$J = \frac{W}{s} = \frac{I \cdot U}{s} \quad (8)$$

Uvažuji standardní nabíjení telefonu při napětí 5 V. Dosazením do rovnice 8,

$$E_p = \frac{2,942 \cdot 3600 \cdot 5}{1} = 52956 \text{ J}$$

vezmu tedy v potaz naší uloženou energii v modelu ve srovnání se zmíněnou baterií v telefonu, čistě z hlediska kapacity a vyjádřím jako podíl,

$$\frac{E_{model}}{E_{mobil}} = \frac{392,4}{52956} \cdot 100 = 0,7 \%$$

E_{model} je kapacita energie modelu, E_{mobil} je kapacita energie baterie v iPhonu. Pokud bychom tedy chtěli nabít telefon potřebovali bychom zvýšit kapacitu úložiště více než 100krát, přesněji bychom museli zvýšit kapacitu 143krát. Potřebovali bychom tedy změnit jeden nebo oba dva parametry, které ovlivňují kapacitu úložiště.

Abych dosáhnul vyžadované kapacity mohl bych zvýšit závaží na 1 tunu a výšku na 5 metrů, tím bych dosáhnul

$$E_{storage} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 5 = 49050 \text{ J}$$

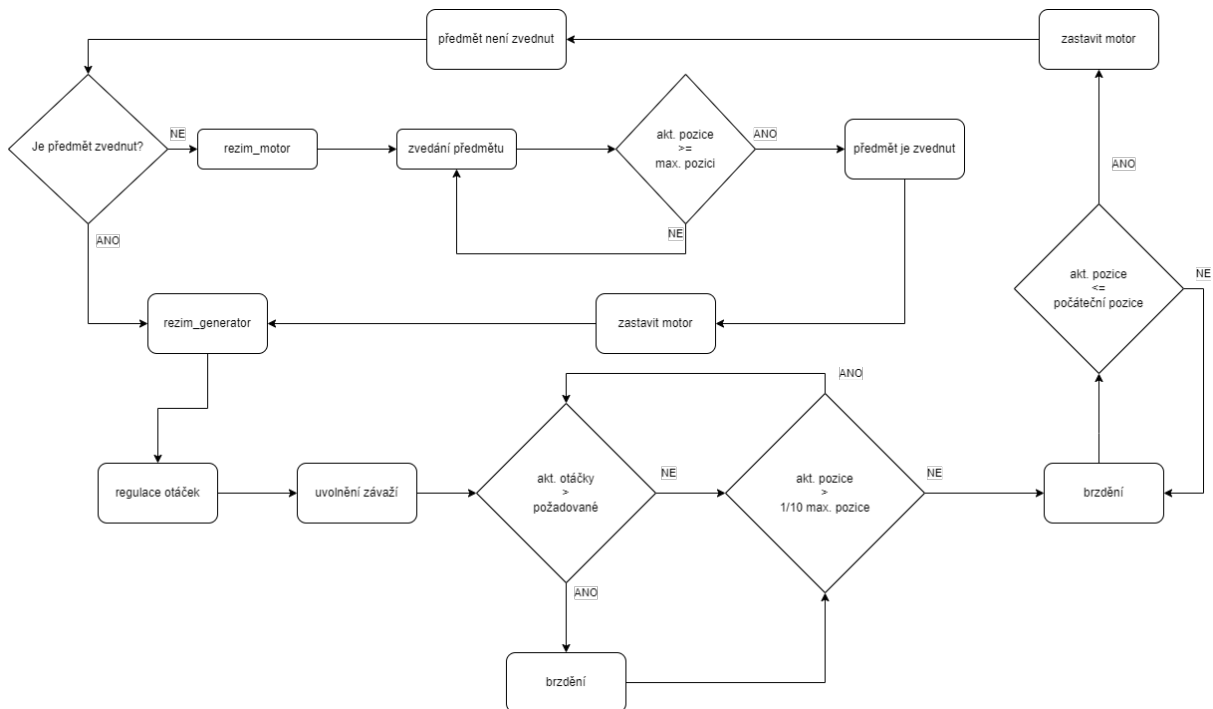
$$\frac{E_{storage}}{E_{mobil}} = 92,6 \%$$

a bylo by možné dobít telefon na 92,6 % za jednu hodinu.

Celá úvaha doposud neuvažovala hlavní ztráty způsobené účinností generátoru ani vedlejší ztráty způsobené třením nebo účinností integrovaných obvodů, a to ještě nezmiňují, že nabití takového mechanického úložiště vyžaduje více energie než uloží, díky nestoprocentní účinnosti motoru.

Přidáme-li do úvahy pouze hlavní ztráty, tak v případě motoru v modelu bychom se dostali rovnou na 60 % použitelné energie, protože účinnost motoru v modelu je pouhých 60 %. Dnešní BLDC motory dosahují účinnosti až 92 %.

2.1.12 Řídicí algoritmus



Obrázek 28: Diagram řídicího algoritmu

Na obr. 28 je znázorněn algoritmus, který ovládá úložiště energie. Zajišťuje kontroly polohy objektu, měření otáček pro jejich regulaci a zajišťuje chod celého stroje. Kód je uveden v příloze. K spínání zátěži byl použit MOSFET IRF520.

3 Změřené parametry

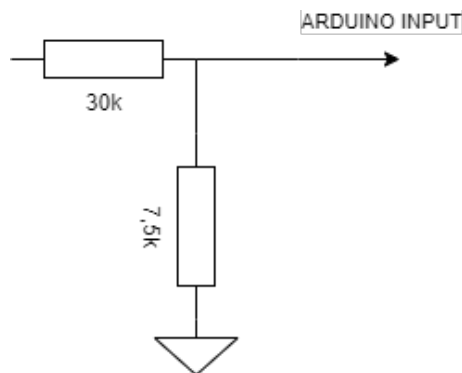
3.1 Realizace měřicího obvodu

Parametry byly změřeny pomocí dvou modulů: **ACS712:**

- proudový sensor pro měření stejnosměrného i střídavého proudu v rozsahu ± 5 A, viz přílohy
- použitý pro změření proudu procházejícím kotvou generátoru

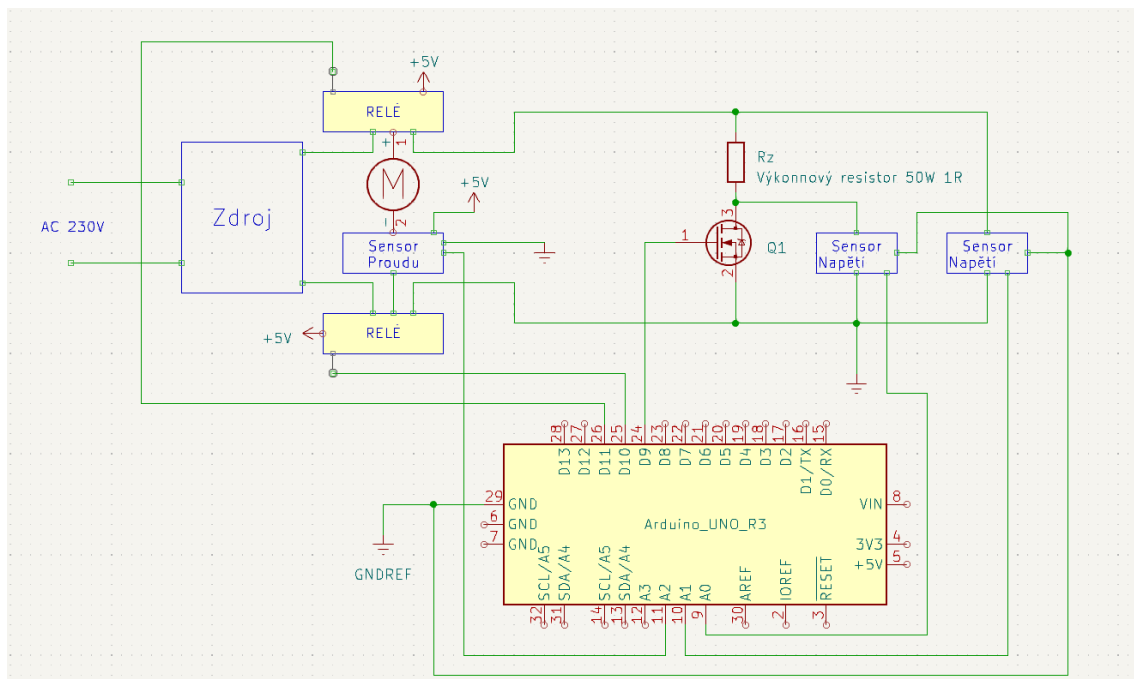
Obvod pro měření napětí

- zvolen modul pro měření napětí v rozsahu 0-25 V
- realizován jako dělič napětí viz schéma na obr. 29



Obrázek 29: Napěťový dělič jako sensor napětí

V obvodu pro měření na obr. 30 bylo vynecháno zapojení s H-můstkem, jelikož nebylo dovedeno k funkčnosti, musel jsem tedy nechat základní návrh se spínáním napájení pomocí Relé. Q1 představuje spínač zátěže MOSFET IRF520.



Obrázek 30: Schema měření

3.2 Realizace konstrukce

Při realizaci konstrukce došlo ke změně uchycení motoru na horní část úložiště, tím se vynechala kladka a došlo ke zmenšení tření. Vzhledem k velikosti modulu je motor stále přístupný ze země. Po této změně připomíná úložiště již koncept S-GES, pouze v mnohem menším měřítku.

Výsledné parametry konstrukce úložiště:

- Závaží: kanistr naplněný vodou, hmotnost 21,5 kg
- Výška konstrukce: 2 m
- Výška úložiště: kanistr je vytažen do výšky 1,4 m, snížené o strop úložiště a výšku kanistru
- Kapacita: $E_{pot} = 295 \text{ J}$

3.3 Změřené parametry

Byly změřeny následující parametry¹: proud kotvou motoru (I_{mot}), proud generátorem (I_{gen}), napětí na tranzistoru (U_{ds}), napětí na generátoru (U_{gen}), napětí motoru (U_{mot}). Ze změřených parametrů byly dopočítány následující: výkon vygenerovaný (P_{out}), energie dodaná (E_{in}), energie vygenerovaná (E_{out}), účinnost generátoru (η_{gen}), účinnost cyklu (η_{cyklu}).

Na grafech v obr. 31-37 lze vidět průběhy parametrů v čase vybíjení a nabíjení. U grafu závislosti proudu motoru na času v době nabíjení můžeme pozorovat proudovou špičku, která je běžná pro stejnosměrné motory. Z dat bylo dále dopočítán výkon dodaný do systému a výkon vygenerovaný systémem, tyto data pro příslušné otázky byly uvedeny v tab. 7. Při jmenovitých otáčkách bylo sice dosaženo vyššího napětí, které přispělo ke zvýšení průměrného výkonu, nicméně byla celková energie vydaná systémem menší. Průběhy jsou uvedené pro vypočtenou hodnotu rychlosti 2414 otáček za minutu. Předmět stoupal po 13 sekund (v obou průbězích) po připojení ke zdroji, následně došlo k přepnutí relé do generátorového režimu odpojením zdroje, zde začínají grafy v čase vybíjení.

V grafech času nabíjení lze pozorovat ustálení proudu okolo hodnoty 1,67 A hned po proudové špičce. Napětí nevykazuje žádné anomálie v době nabíjení. Po dosažení vrcholné pozice a splnění podmínky zvednutí předmětu se přepne režim v programu na generátorový a dojde k zapojení regulace otáček spínáním tranzistoru IRF520.

V čase vybíjení jsou výchyly způsobené kýváním závaží, které způsobilo pohyb vody v kanistru a váha závaží nebyla zcela konstantní. Hodnoty v tab. 7 byly dopočítány na základě maximální dodané energie do stroje:

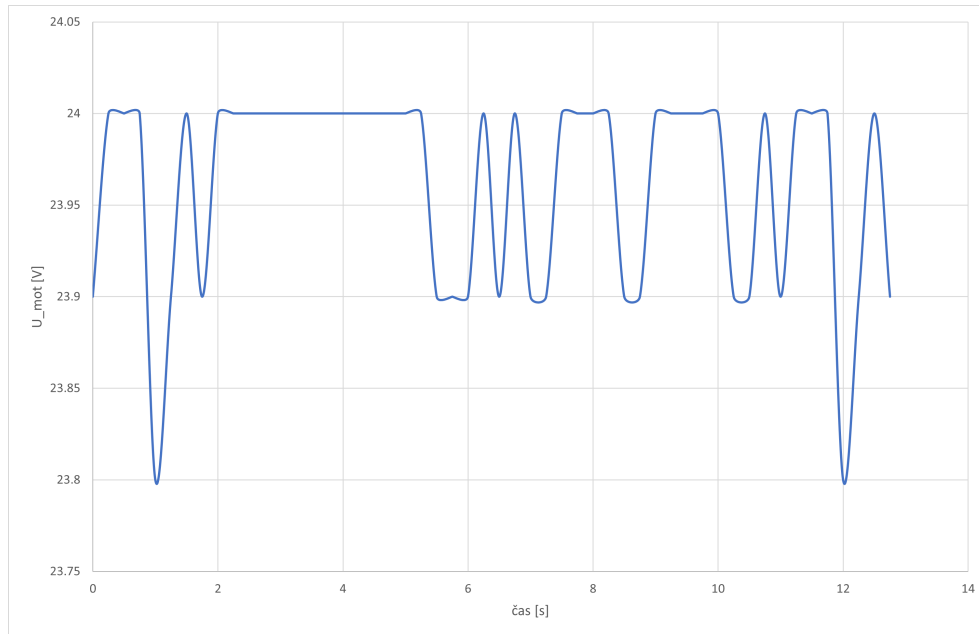
$$E_{in} = I_{mot} \cdot U_{mot} \cdot t = 1,67 \cdot 24 \cdot 13 = 521,04 \text{ J} \quad (9)$$

¹následující parametry byly změřeny bez možnosti měřit rychlost otáčení, rychlost je následně dopočítána

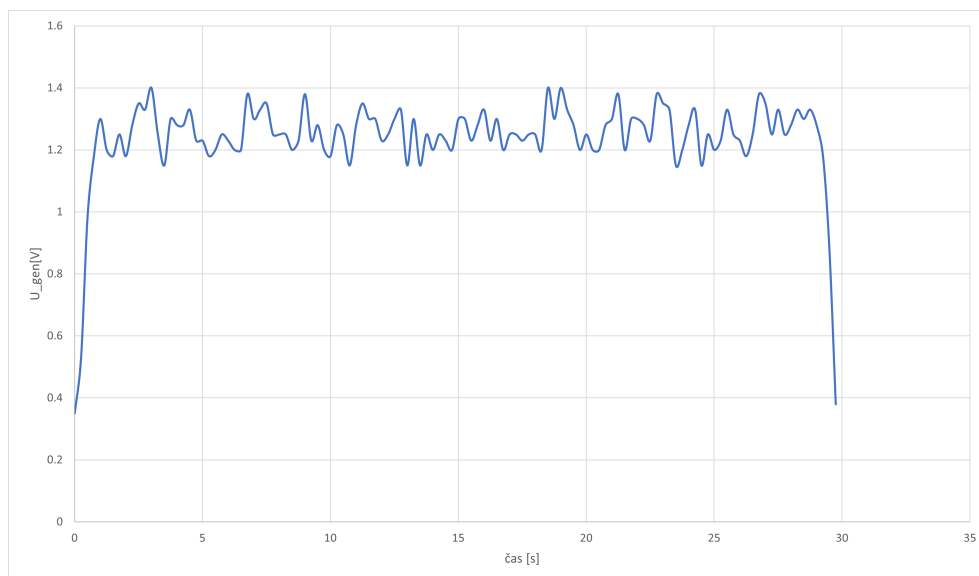
$$E_{out} = W_{gen} \cdot t = 1,65 \cdot 29 = 47,87J \quad (10)$$

$$\eta_{gen} = \frac{E_{out}}{E_{pot}} = \frac{47,87}{295} = 16,22\% \quad (11)$$

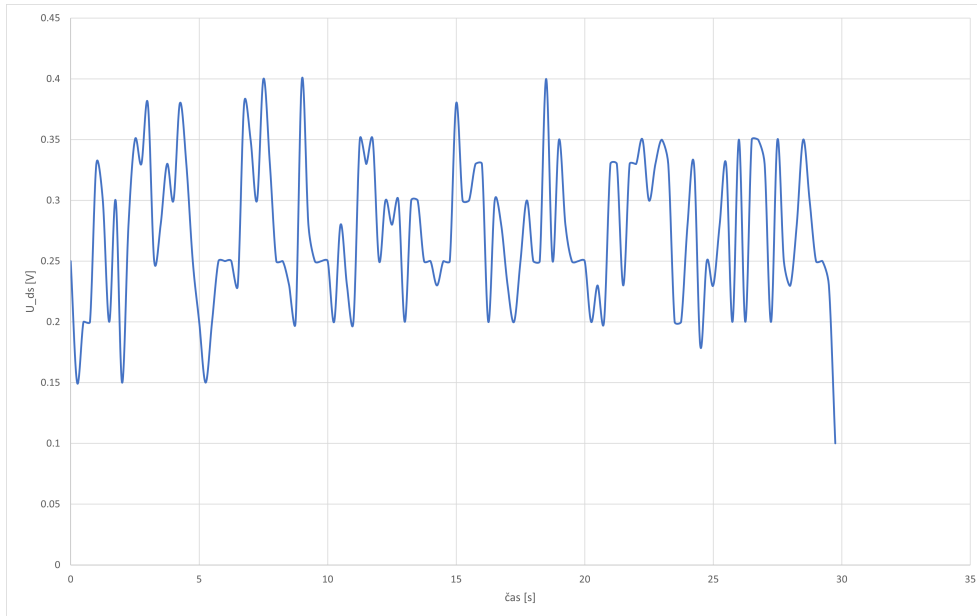
$$\eta_{cyklu} = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \frac{47,87}{521,04} = 9,19\% \quad (12)$$



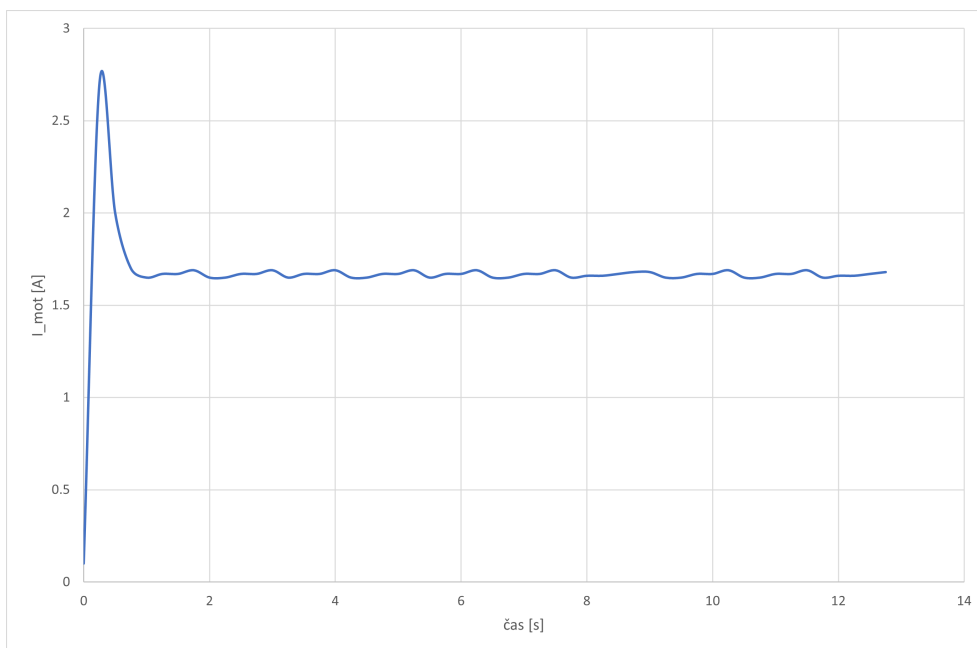
Obrázek 31: Graf závislosti napětí motoru ve fázi nabíjení na čase



Obrázek 32: Graf závislosti napětí generátoru ve fázi vybíjení na čase



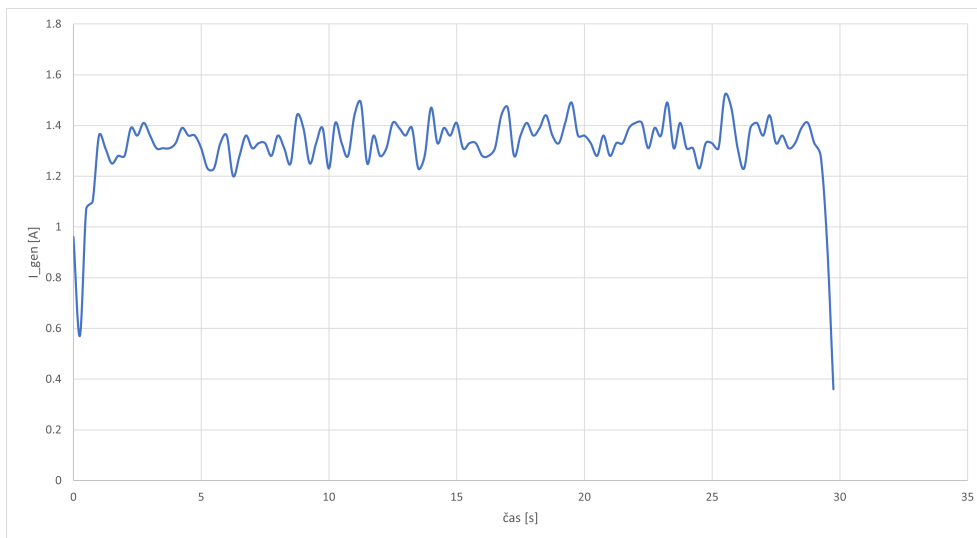
Obrázek 33: Graf závislosti napětí spínacího tranzistoru ve fázi vybíjení na čase



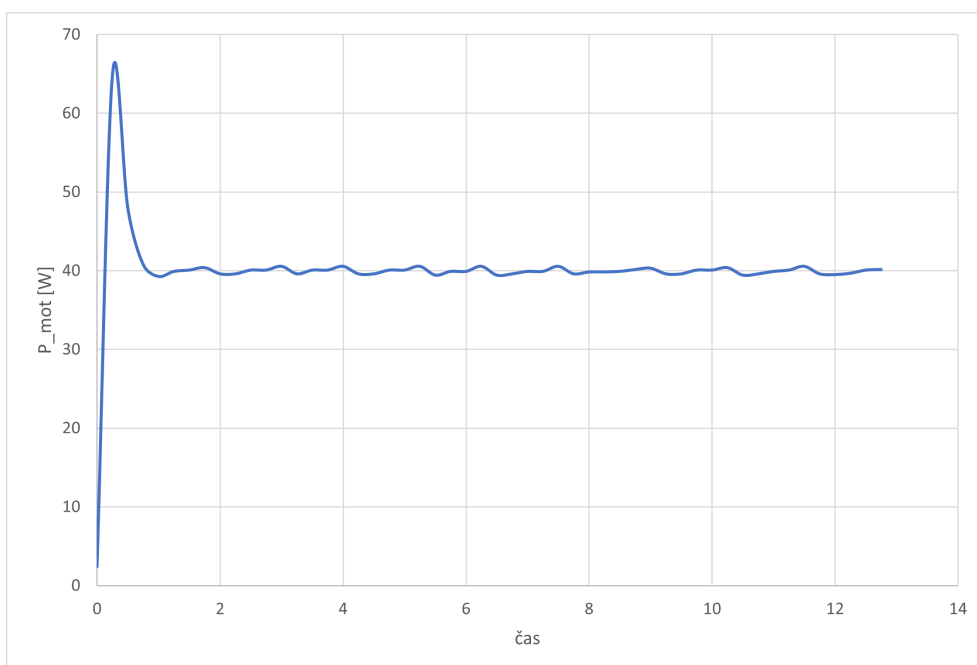
Obrázek 34: Graf závislosti proudu motoru ve fázi nabíjení na čase

Tabulka 7: Tabulka hodnot pro dané otáčky za minutu

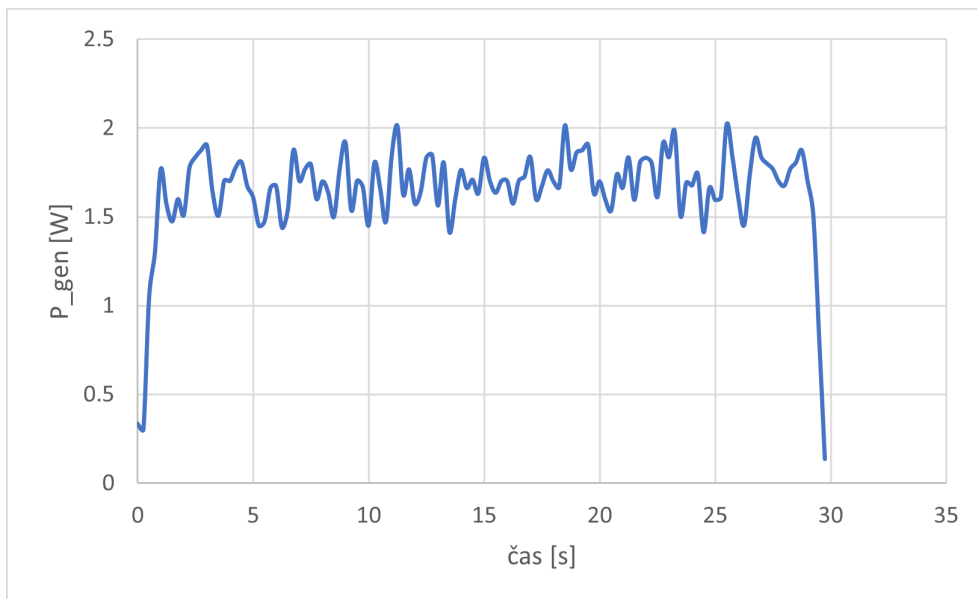
Otáčky za minutu	5000	2414
Celk. generovaná energie	37,18 J	4,87 J
Průměrný výkon	2,86 W	1,65 W
Délka vybíjení	13 s	29 s
Účinnost generátoru	12,6 %	16,22 %
Účinnost cyklu	7,14 %	9,19 %



Obrázek 35: Graf závislosti proudu generátorem ve fázi vybíjení na čase



Obrázek 36: Graf závislosti výkonu motoru ve fázi nabíjení na čase



Obrázek 37: Graf závislosti napětí generátoru ve fázi vybíjení na čase

Závěr

V této práci byl navržen experimentální model mechanického úložiště využívající gravitačního pole a potenciální energie. Jako náhrada seismické hmoty byl použit kanistr naplněný vodou pro snadnou operovatelnost a proměnlivost hmotnosti. V jednotlivých kapitolách byly návrhy změn důležité pro budoucí automatizaci systému. Následně byl realizován experimentální model dle návrhu s několika úpravami viz příloha A. Například nebyla přidělena vratka, pro zastavení systému v nabitě pozici, protože nebyla třeba pro měření parametrů, ale pro funkčnost systému v reálném provozu je nezbytná nebo musí být nahrazena jiným systémem zámku.

Parametry byly změřeny se závažím o hmotnosti 21,5 kg vytaženým do výšky 140 cm. Výsledná energie experimentálního úložiště, kterou bylo schopné generovat byla velmi malá, a to 37-48 J. Ve srovnání s velikostí úložiště na nabití telefonu, jak bylo uvedeno, by bylo třeba zvýšit kapacitu nejméně 1000krát, pokud bychom ponechali stejnou účinnost.

Nepřesnosti v měření byly způsobeny, protože enkodér, který měřil rychlost otáčení, měl tzv. bounce efekt. Po zjišťování příčiny, jsem došel k závěru, že by to mohlo být odskokem kontaktů v enkodéru, protože ostatní příčiny, které mohly být způsobeny šumem, arduinem nebo kódem, byly eliminovány.

Při realizaci se od návrhu několik věcí muselo obměnit. Počínaje konstrukcí, kde došlo ke změně ukotvení motoru a k ovládání rychlosti otáček místo H-můstku na spínač brzdového (výkonového) resistoru. Bylo tak učiněno pro dynamický brzdny efekt, kterého pomocí H-můstku nebylo docíleno. Při použití BLDC motoru s akumulacním prvkem by se mohlo aplikovat regenerativní brzdění a zmenšení ztrát, které v tomto modelu brzděním vznikaly.

Hlavním prvkem pro zlepšení celkové účinnosti cyklu 9,19 % by byla změna motoru na motor s vyšší účinností, popřípadě změna kartáčového stejnosměrného motoru za bezkartáčový stejnosměrný motor, který by mohl být vhodnější pro generátorový režim. V konceptech uváděných v dokumentu byla zjištěna účinnost cyklu až 85 %, není ale nikde uvedené jaké motory jsou použity a zda jsou speciálně upravené pro generátorový režim. Pro další zlepšení by bylo možné snížit převodový poměr, bylo by tedy třeba motoru s větším výkonem. Pro zvýšení kapacity je třeba změnit parametry výšky úložiště a váhy závaží. Jak bylo uvedeno v kapitole Návrh kapacity úložiště. Provedení těchto změn není nijak náročné, jedná se pouze o prodloužení lana a zvýšení konstrukce, nebo vykopání díry. Pro vyšší váhu lze použít odpadního materiálu, například ve formě slisovaného šrotu, to by také mělo za příčinu zmenšení objemu závaží.

Model byl sestrojen za účelem zjištění základních parametrů, od kterých se může odvíjet další testování a rozvíjení technologie. Ať už představuje slepou vývojovou větev nebo základní stavební kámen pro další výzkum, tak bylo dosaženo výsledku, pro který byl navržen a sestrojen.

Použité zdroje

- [1] H. Hou, T. Xu, X. Wu, H. Wang, A. Tang a Y. Chen, „Optimal capacity configuration of the wind-photovoltaic-storage hybrid power system based on gravity energy storage system,“ *Applied Energy*, roč. 271, s. 115 052, 2020, ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115052>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626192030564X>.
- [2] C. Yangyang, H. Hou, T. Xu, X. Wu, P. Liu a H. Wang, „A New Gravity Energy Storage Operation Mode to Accommodate Renewable Energy,“ in *2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, IEEE, 2019, s. 1–5, ISBN: 978-1-7281-0813-1. DOI: 10.1109/APPEEC45492.2019.8994526. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8994526/> (cit. 15. 11. 2022).
- [3] A. Emrani, A. Berrada a M. Bakhouya, „Optimal sizing and deployment of gravity energy storage system in hybrid PV-Wind power plant,“ *Renewable Energy*, roč. 183, s. 12–27, 2022, ISSN: 0960-1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.072>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148121015317>.
- [4] I. David a C. Ștefănescu, „Gravity Compressed -Air- Hydraulic- Power-Tower Energy Storage Plants,“ *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, roč. 960, č. 2, 2020-12-01, ISSN: 1757-8981. DOI: 10.1088/1757-899X/960/2/022077. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/960/2/022077>.
- [5] A. Berrada, K. Loudiyi a I. Zorkani, „Toward an Improvement of Gravity Energy Storage Using Compressed Air,“ *Energy Procedia*, roč. 134, s. 855–864, 2017, ISSN: 18766102. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.542. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610217346714>.
- [6] A. Blakers, M. Stocks, B. Lu a C. Cheng, „A review of pumped hydro energy storage,“ *Progress in Energy*, roč. 3, č. 2, 2021-03-25, ISSN: 2516-1083. DOI: 10.1088/2516-1083/abeb5b. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2516-1083/abeb5b> (cit. 16. 11. 2022).
- [7] S. Rehman, L. M. Al-Hadhrami a M. M. Alam, „Pumped hydro energy storage system, A technological review,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, roč. 44, s. 586–598, 2015, ISSN: 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2014.12.040. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115000106>.
- [8] W. Tong, Z. Lu, W. Chen et al., „Solid gravity energy storage, A review,“ *Journal of Energy Storage*, roč. 53, 2022, ISSN: 2352152X. DOI: 10.1016/j.est.2022.105226. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352152X22012257> (cit. 20. 11. 2022).
- [9] A. Punsirichaiyakul, T. Ratniyomchai a T. Kulworawanichpong, „Gravitational energy storage by using concrete stacks,“ in *2020 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)*, IEEE, 2020-10-14, s. 17–20, ISBN: 978-1-7281-7240-8. DOI: 10.1109/ICPEI49860.2020.9431488. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9431488/> (cit. 20. 11. 2022).
- [10] W. Tong, Z. Lu, J. Sun, G. Zhao, M. Han a J. Xu, „Solid gravity energy storage technology, Classification and comparison,“ *Energy Reports*, roč. 8, s. 926–934, 2022, ISSN: 23524847. DOI: 10.1016/j.egypr.2022.10.286. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352484722022211> (cit. 20. 11. 2022).

- [11] T. Morstyn, M. Chilcott a M. McCulloch, „Gravity energy storage with suspended weights for abandoned mine shafts,“ *Applied Energy*, roč. 239, s. 201–206, dub. 2019. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.226.
- [12] T. Morstyn, M. Chilcott a M. D. McCulloch, „Gravity energy storage with suspended weights for abandoned mine shafts,“ *Applied Energy*, roč. 239, s. 201–206, 2019, ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.226>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919302466>.
- [13] A. Berrada a K. Loudiyi, „Modeling and material selection for gravity storage using FEA method,“ in *2016 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, IEEE, 2016, s. 1159–1164, ISBN: 978-1-5090-5713-9. DOI: 10.1109/IRSEC.2016.7983956. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7983956/> (cit. 20. 11. 2022).
- [14] M. Aneke a M. Wang, „Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review,“ *Applied Energy*, roč. 179, s. 350–377, 2016, ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.097>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916308728>.
- [15] A. Emrani, A. Berrada a M. Bakhouya, „Modeling and Performance Evaluation of the Dynamic Behavior of Gravity Energy Storage with a Wire Rope Hoisting System,“ *Journal of Energy Storage*, roč. 33, 2021, ISSN: 2352152X. DOI: 10.1016/j.est.2020.102154. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352152X20319800> (cit. 20. 11. 2022).
- [16] M. Mugyema, M. Rabadia, C. Botha, M. Kamper a R.-J. Wang, „Design and Control of a Linear Electric Machine Based Gravity Energy Storage System,“ in *2022 30th Southern African Universities Power Engineering Conference (SAUPEC)*, 2022, s. 1–8. DOI: 10.1109/SAUPEC55179.2022.9730745.
- [17] C. Botha, M. Kamper a R.-. Wang, „Design optimisation and cost analysis of linear vernier electric machine-based gravity energy storage systems,“ *Journal of Energy Storage*, roč. 44, s. 103–107, 2021, ISSN: 2352-152X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103397>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X21010847>.
- [18] R. Cazzaniga, M. Cicu, T. Marrana, M. Rosa-Clot, P. Rosa-Clot a G. Tina, „DOGES: Deep ocean gravitational energy storage,“ *Journal of Energy Storage*, roč. 14, s. 264–270, 2017, On The Waterfront: Offshore and Seaside Energy Storage for Rapidly Growing Coastal Populations, ISSN: 2352-152X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.06.008>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X17302396>.
- [19] *Ocean Grazer*. URL: <https://oceangrazer.com/>.
- [20] „Examination of Non-Lithium Battery Storage Concepts.“ (2021), URL: <https://conservancy.umn.edu/handle/11299/220938> (cit. 26. 04. 2023).
- [21] „Starič mine - fullscale project.“ (2021), URL: <https://gravitricity.com/projects/> (cit. 26. 04. 2023).
- [22] „Gravity Power.“ (), URL: <https://www.gravitypower.net/> (cit. 24. 05. 2023).
- [23] „Ares project.“ (2021), URL: <https://aresnorthamerica.com/nevada-project/> (cit. 26. 04. 2023).
- [24] „ARES Gravity Trains May Solve the Energy Storage Problem.“ (2021), URL: <https://www.railway.supply/en/ares-gravity-trains-may-solve-the-energy-storage-problem/> (cit. 26. 04. 2023).

- [25] *Brushless vs. Brushed DC Motors, When and Why to Choose One Over the Other*, 2022.
URL: <https://www.monolithicpower.com/en/brushless-vs-brushed-dc-motors>.
- [26] S. Derammelaere, M. Haemers, J. De Viaene, F. Verbelen a K. Stockman, „A quantitative comparison between BLDC, PMSM, brushed DC and stepping motor technologies,“ in *2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2016, s. 1–5.

Seznam obrázků

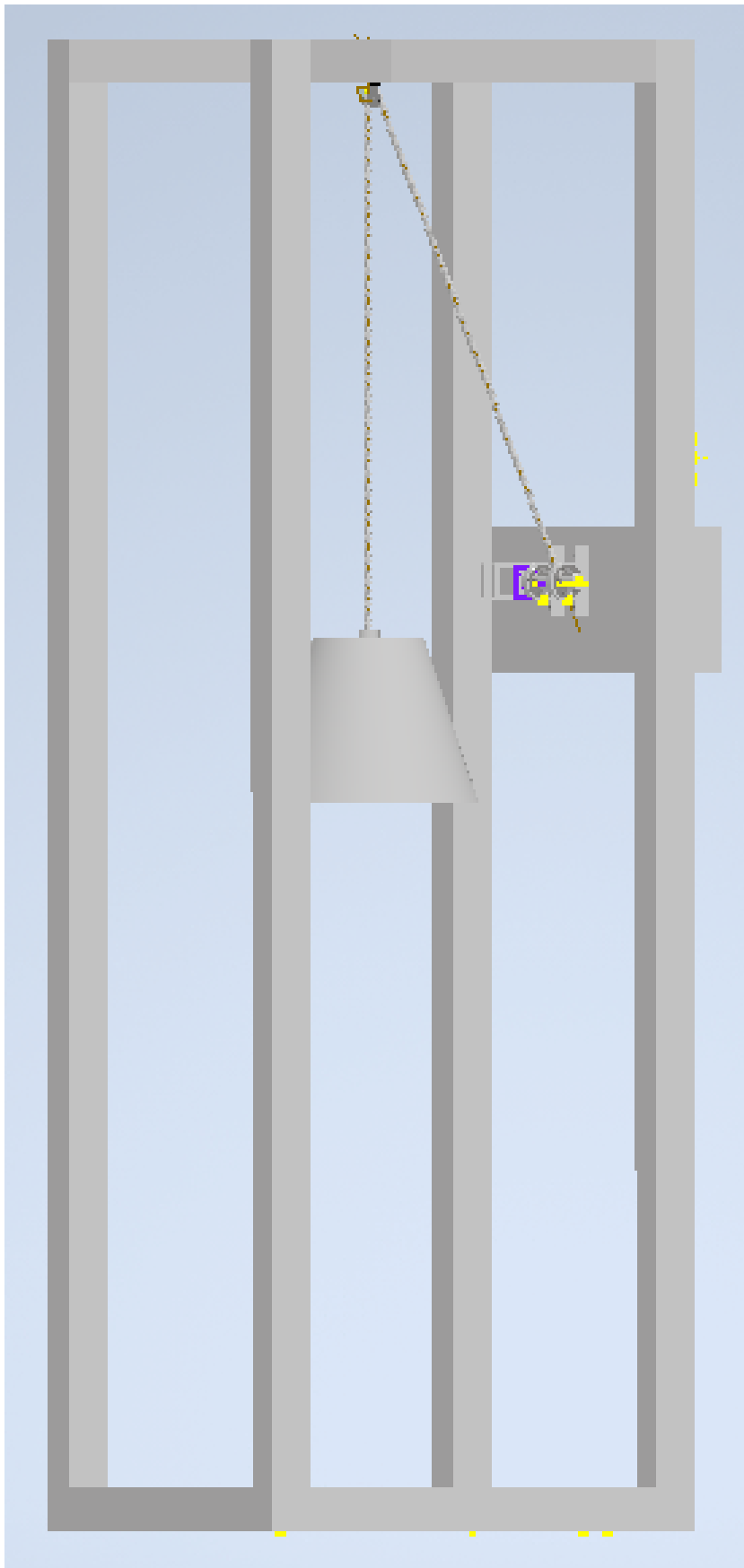
1	Proces ukládání elektrické energie z fotovoltaických zdrojů	4
2	Schéma CAGES [4]	5
3	Graf srovnání GESS, CAESS a BESS [1]	5
4	PHES v kombinaci s větrnou elektrárnou [7]	6
5	PHES s fotovoltaickou elektrárnou [7]	6
6	Kapacity PHES vybraných zemí [6]	7
7	Přehled druhů EES s využitím gravitační energie pevné hmoty [10][8]	8
8	T-SGES [8]	9
9	S-SGES [8]	9
10	Piston-SGES [14]	10
11	CAP-GES [8]	10
12	Rope-hoisting Piston GES [15]	11
13	Mountain Mine-Car SGES [8]	12
14	Mountain Cable-Car SGES [8]	12
15	Linear Electric Machine-Based SGES [8]	13
16	Srovnání SGES podle geografických podmínek a těsnění [10]	14
17	Srovnání SGES uvedenými parametry [10]	14
18	Deep Ocean Gravity Energy Storage schéma [18]	15
19	Ocean Battery [19]	15
20	Cyklus nabíjení a vybíjení EV1 [20]	16
21	Gravitační úložiště energie EV1 [20]	16
22	důl Staříč - projekt Gravitricity [21]	17
23	Testovací vozík projektu ARES [24]	18
24	Blokové schéma obvodu úložiště energie	20
25	Základní manuální přepínání	23
26	Relé modul 5 V	24
27	Schéma návrhu step-down konvertoru	25
28	Diagram řídicího algoritmu	27
29	Napěťový dělič jako sensor napětí	28
30	Schema měření	28

31	Graf závislosti napětí motoru ve fázi nabíjení na čase	30
32	Graf závislosti napětí generátoru ve fázi vybíjení na čase	30
33	Graf závislosti napětí spínacího tranzistoru ve fázi vybíjení na čase	31
34	Graf závislosti proudu motoru ve fázi nabíjení na čase	31
35	Graf závislosti proudu generátorem ve fázi vybíjení na čase	32
36	Graf závislosti výkonu motoru ve fázi nabíjení na čase	32
37	Graf závislosti napětí generátoru ve fázi vybíjení na čase	33

Příloha A



Příloha B



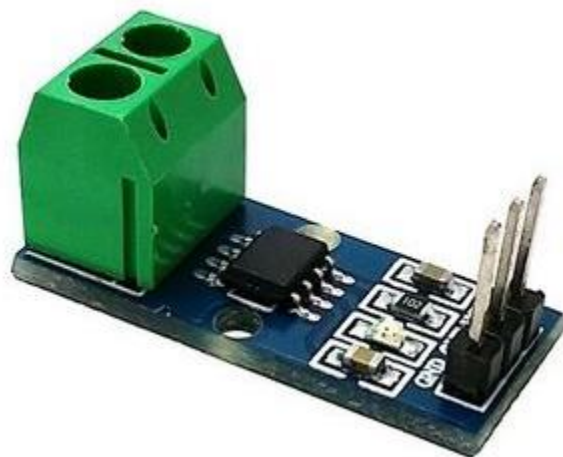
5A proudový senzor ACS712

1. POPIS

Tento modul pracuje na principu Hallova jevu a umožní vývojovým kitům Arduino/Genuino a spoustě dalších (např. Raspberry PI) měřit proud.

Základní charakteristika modulu:

- Lineární převodní charakteristika
- Možnost měření stejnosměrného i střídavého proudu
- Indikační LED kontrolka



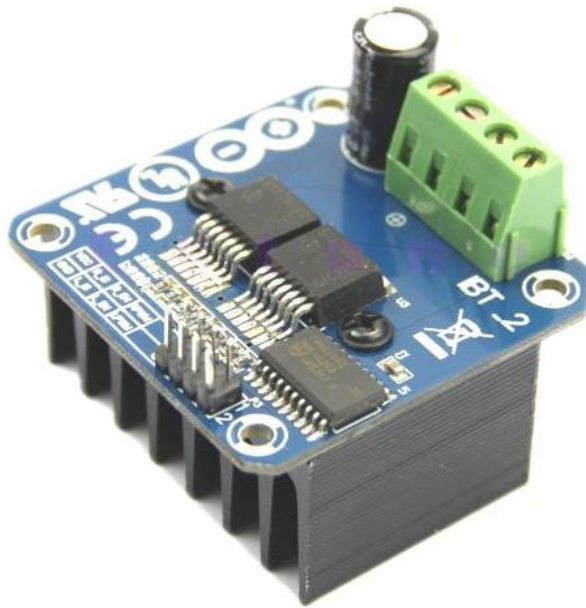
2. SPECIFIKACE

Čip	ACS712	Vnitřní odpor senzoru	1,2 mΩ
Provozní napětí	5 VDC	Doba náběhu (rise time)	5 us
Rozsah měření proudu	± 5 A	Izolační napětí	2,1 kV _{RMS}
Výstupní hodnota při I= 0 A	VCC/2	Šířka pásma	80 kHz
Citlivost	66-185 mV/A	Provozní teplota (°C)	-40-85
Chyba měření (@ 25°C)	< 1,5 %	Rozměry (mm)	31 x 13



BTS7960 High Current 43A H-Bridge Motor Driver

The BTS7960 is a fully integrated high current H bridge module for motor drive applications. Interfacing to a microcontroller is made easy by the integrated driver IC which features logic level inputs, diagnosis with current sense, slew rate adjustment, dead time generation and protection against overtemperature, overvoltage, undervoltage, overcurrent and short circuit. The BTS7960 provides a cost optimized solution for protected high current PWM motor drives with very low board space consumption.



SKU: [DRV-1012](#)

Brief Data:

- Input Voltage: 6 ~ 27Vdc.
- Driver: Dual BTS7960 H Bridge Configuration.
- Peak current: 43-Amp.
- PWM capability of up to 25 kHz.
- Control Input Level: 3.3~5V.
- Control Mode: PWM or level
- Working Duty Cycle: 0 ~100%.
- Over-voltage Lock Out.
- Under-voltage Shut Down.
- Board Size (LxWxH): 50mm x 50mm x 43mm.
- Weight: ~66g.