

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

NÁVRH SOUPRAVY PRO VYTVOŘENÍ ZÁSOBOVACÍHO MÍSTA ELEKTRICKOU ENERGIÍ VYTVOŘENOU Z OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ

DESIGN OF A KIT FOR THE CREATION OF A SUPPLY POINT FOR ELECTRICITY GENERATED FROM
RENEWABLE SOURCES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Fridrich

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Tomáš Binar, Ph.D.

BRNO 2021



Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektrotechnická výroba a management**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Jiří Fridrich

ID: 195180

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Návrh soupravy pro vytvoření zásobovacího místa elektrickou energií vytvořenou z obnovitelných zdrojů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Popište způsoby výroby a skladování elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Navrhněte mobilní soupravu zásobovacího místa elektrickou energií pro napájení přenosných proměnných dopravních značek a metody pro ověření navrhovaného řešení.

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Binar, Ph.D.

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem a realizací soupravy pro vytvoření zásobovacího místa elektrickou energií vytvořenou z obnovitelných zdrojů. V teoretické části jsou zpracovány informace o obnovitelných zdrojích energie a možnostech akumulace energie. V praktické části je navržena mobilní souprava pro napájení proměnných dopravních značek, která využívá fotovoltaické panely a energii ukládá do olověného akumulátoru. Pro záložní napájení je využit methanolový palivový článek. Zařízení je přizpůsobeno možnostem použití v silniční dopravě a splňuje požadavky příslušných úřadů. K ověření stability konstrukce byly provedeny statické výpočty, které prokázaly odolnost zařízení při namáhání větrem. Součástí práce bylo zpracování kompletní výrobní dokumentace, podle níž byl vyroben zkušební vzorek. Na něm byla provedena dlouhodobá měření energetických toků v systému. Tato měření potvrdila schopnost autonomního provozu zařízení a možnost použití k požadovanému účelu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Fotovoltaický panel, olověný akumulátor, palivový článek, MPPT, PDZ.

ABSTRACT

This project deals with the design and realisation of a set that will work as a power supply point with electricity generated from renewable energy sources. The theoretical part deals with information about renewable energy sources and energy storage options. In the practical part, a mobile kit for powering variable message traffic signs is designed. It uses photovoltaic panels and stores energy in a lead-acid battery. A methanol fuel cell is used for backup power. The device is adapted for use in road traffic and meets the requirements of the relevant authorities. To verify the stability of the structure, there were performed static calculations, which proved the ability of the device to withstand wind stress. Part of the work was to draw a complete production documentation, which was used to create a test sample. Long-term measurements of energy flows in the system were performed on that sample. These measurements confirmed the ability of the device to operate autonomously and the possibility of using it for the required purpose.

KEYWORDS

Photovoltaic panel, lead-acid battery, fuel cell, MPPT, VMS.

FRIDRICH, Jiří. *Návrh soupravy pro vytvoření zásobovacího místa elektrickou energií vytvořenou z obnovitelných zdrojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie, 2021, 116 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Binar, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora:	Bc. Jiří Fridrich
VUT ID autora:	195180
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2020/21
Téma závěrečné práce:	Návrh soupravy pro vytvoření zásobovacího místa elektrickou energií vytvořenou z obnovitelných zdrojů

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Tomáši Binarovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Chtěl bych také poděkovat Ing. Petru Kalousovi za konzultace a cenné rady při vytváření výkresové dokumentace.

Obsah

Úvod	12
1 Obnovitelné zdroje energie	13
1.1 Energie slunce	13
1.1.1 Fotovoltaické systémy	15
1.1.2 Tepelné systémy	21
1.2 Energie vody	23
1.2.1 Turbíny	24
1.2.2 Energie vodních toků	29
1.2.3 Energie moří	30
1.2.4 Teplo uchované ve vodě	30
1.2.5 Osmotická energie	30
1.3 Energie větru	31
1.3.1 Odporové motory	33
1.3.2 Vztlakové motory	33
1.4 Další druhy energie	35
1.4.1 Biomasa	35
1.4.2 Geotermální energie	36
1.5 Shrnutí	38
2 Akumulace energie	40
2.1 Elektrochemická akumulace	41
2.1.1 Akumulátory Pb	41
2.1.2 Akumulátory Ni	44
2.1.3 Akumulátory Li	45
2.1.4 Palivové články	46
2.1.5 Průtokové baterie	50
2.2 Mechanická akumulace	51
2.2.1 Setrvačníky	51
2.2.2 Přečerpávací elektrárny	52
2.2.3 Stlačený vzduch	52
2.3 Elektromagnetická akumulace	53
2.3.1 Superkondenzátory	53
2.3.2 Supravodivé cívky	54
2.4 Shrnutí	54

3 Praktická část	56
3.1 Současný stav	56
3.2 Navržené řešení	58
3.2.1 Potřebný příkon	58
3.2.2 Záložní napájení	58
3.2.3 Vlastní návrh	59
3.2.4 Statický výpočet	63
4 Měření, vyhodnocení	67
4.1 Testovací souprava	67
4.1.1 Výsledky měření	68
4.2 Ekonomické zhodnocení	72
4.2.1 Porovnání nákladů	72
4.2.2 Párové porovnání Saatyho metodou	74
Závěr	76
Literatura	78
Seznam symbolů a zkratk	83
A Schémata zapojení	87
B Výkresy sestav	91
C Odběrové diagramy	96
D Ekonomika	113
E Obsah elektronické přílohy	116

Seznam obrázků

1.1	Sluneční záření	13
1.2	Průměrná hodnota slunečního záření v ČR	14
1.3	Přeměna slunečního záření	15
1.4	Fotovoltaický článek	16
1.5	Spektrální citlivost Si článku	17
1.6	Zatěžovací a výkonová charakteristika FV článku	18
1.7	Monokrystalický a polykrystalický panel	20
1.8	Účinnost a cena jednotlivých generací FV panelů	20
1.9	Solární koncentrátoři	21
1.10	Peltierův článek	22
1.11	Konverze energie vodní elektrárny	24
1.12	Využitelnost turbín podle průtoku a spádu	25
1.13	Francisova turbína	26
1.14	Kaplanova turbína	27
1.15	Peltonova turbína	28
1.16	Bánkiho turbína	29
1.17	Základní vyřazení vodních elektráren	29
1.18	Princip vzniku větru	31
1.19	Konverze větrné energie	33
1.20	Savoniův motor	33
1.21	Vztlakové rotory	34
1.22	Mapa průměrné rychlosti větru v ČR ve výšce 100 m	35
1.23	Složení planety Země	37
2.1	Rozdělení akumulačních soustav	40
2.2	Princip činnosti palivového článku	49
2.3	Princip průtokové baterie	51
2.4	Struktura superkondenzátoru	53
3.1	Stávající skříň akumulátoru	56
3.2	Blokové schéma sestavy	59
3.3	Základna upevňovací konstrukce panelu	60
3.4	FV panely mezi svodidly	60
3.5	Nová skříň akumulátoru	61
3.6	Skříň palivového článku	62
3.7	Rozložení působících sil	63
4.1	Třístupňové nabíjení	68
4.2	Průběh napětí AKU - jasná obloha	69
4.3	Průběh napětí AKU - zatažená obloha	69

4.4	Procentuální zastoupení zdrojů energie	70
4.5	Závislost kapacity AKU na počtu cyklů	71
4.6	Hloubka vybíjení AKU - duben	71
4.7	Porovnání nákladů na pořízení a provoz	73
4.8	Významnost kritérií dle Saatyho metody	75
4.9	Výsledné hodnocení Saatyho metodou	75
A.1	Schéma zapojení AKU skříně	87
A.2	Schéma zapojení skříně palivového článku	88
A.3	Schéma zapojení testovací soupravy - vnější části	89
A.4	Schéma zapojení testovací soupravy - vnitřní části	90
B.1	Upevňovací konstrukce pro solární panel	91
B.2	Skříň akumulátoru	92
B.3	Skelet skříně akumulátoru	93
B.4	Skříň palivového článku	94
B.5	Skelet skříně palivového článku	95
C.1	Odběr PDZ - leden	97
C.2	Dodávka FV - leden	97
C.3	Energetické toky AKU - leden	98
C.4	Stupeň nabití AKU - leden	98
C.5	Dodávka z externích zdrojů - leden	99
C.6	Odběr PDZ - únor	101
C.7	Dodávka FV - únor	101
C.8	Energetické toky AKU - únor	102
C.9	Stupeň nabití AKU - únor	102
C.10	Dodávka z externích zdrojů - únor	103
C.11	Odběr PDZ - březen	105
C.12	Dodávka FV - březen	105
C.13	Energetické toky AKU - březen	106
C.14	Stupeň nabití AKU - březen	106
C.15	Odběr PDZ - duben	108
C.16	Dodávka FV - duben	108
C.17	Energetické toky AKU - duben	109
C.18	Stupeň nabití AKU - duben	109
C.19	Odběr PDZ - květen	111
C.20	Dodávka FV - květen	111
C.21	Energetické toky AKU - květen	112
C.22	Stupeň nabití AKU - květen	112

Seznam tabulek

1.1	Beaufortova stupnice rychlosti větru na souši	32
2.1	Typy palivových článků	48
4.1	Měsíční souhrny toků energie	70
4.2	Porovnání nákladů na pořízení a provoz	73
4.3	Výpočet vah kritérií - Saatyho metoda	74
4.4	Výsledek hodnocení různých variant Saatyho metodou	75
C.1	Měsíční odběrový diagram - leden	96
C.2	Měsíční odběrový diagram - únor	100
C.3	Měsíční odběrový diagram - březen	104
C.4	Měsíční odběrový diagram - duben	107
C.5	Měsíční odběrový diagram - květen	110
D.1	Rozpad nákladů - var. S/N1 - 3 měsíce	113
D.2	Rozpad nákladů - var. S/N2 - 3 měsíce	114
D.3	Dílčí matice - Saatyho metoda	115

Úvod

Práce se zabývá návrhem soupravy, která umožní využití obnovitelných zdrojů energie k napájení proměnných dopravních značek. Tyto značky se používají pro liniové řízení dopravy. Cílovým místem určení jsou silnice a dálnice, kde je kvůli absenci síťového napětí problém s napájením značek. V současné době se pro napájení používají olověné akumulátory, které jsou vždy po vybití měněny za nové a odváženy k nabití do střediska údržby. Náklady na veškerou agendu s tím spojenou jsou enormní a je tedy žádoucí je jakkoli snížit.

V první části je zpracována problematika obnovitelných zdrojů a možností jejich využití. Jsou popsány možnosti čerpání energie ze slunečního záření, vody, větru, biomasy a geotermální energie. Z uvedených informací vyplývá, že pro mobilní zařízení je vhodné využít k napájení právě fotovoltaiku, a také to, že je nezbytné použít nějaký způsob akumulace energie.

Možnostmi akumulace energie se zabývá druhá kapitola, kde jsou uvedeny různé možnosti, jak energii ukládat. Nejprve je popsána akumulace elektrochemická, jsou rozebrány nejběžnější typy akumulátorů, což jsou akumulátory na bázi olova, niklu a lithia. Zmíněny jsou také průtokové baterie a palivové články. Dále jsou popsány možnosti mechanické akumulace energie jejím převedením na energii kinetickou, nebo potenciální gravitační či tlakovou. V poslední části kapitoly jsou uvedeny možnosti akumulace v magnetickém poli supravodivých cívek a v superkondenzátorech.

Další část je již zaměřena na problematiku napájení mobilních proměnných dopravních značek. Je vysvětlen stávající stav věci a problémy, které je zapotřebí řešit. Následuje vlastní návrh soupravy pro vytvoření zásobovacího místa elektrickou energií a nezbytné výpočty pro zajištění stability při zatížení větrem.

V poslední kapitole jsou zpracovány výsledky měření na zkušební soupravě zásobovacího místa a následně je provedeno ekonomické zhodnocení navrženého řešení.

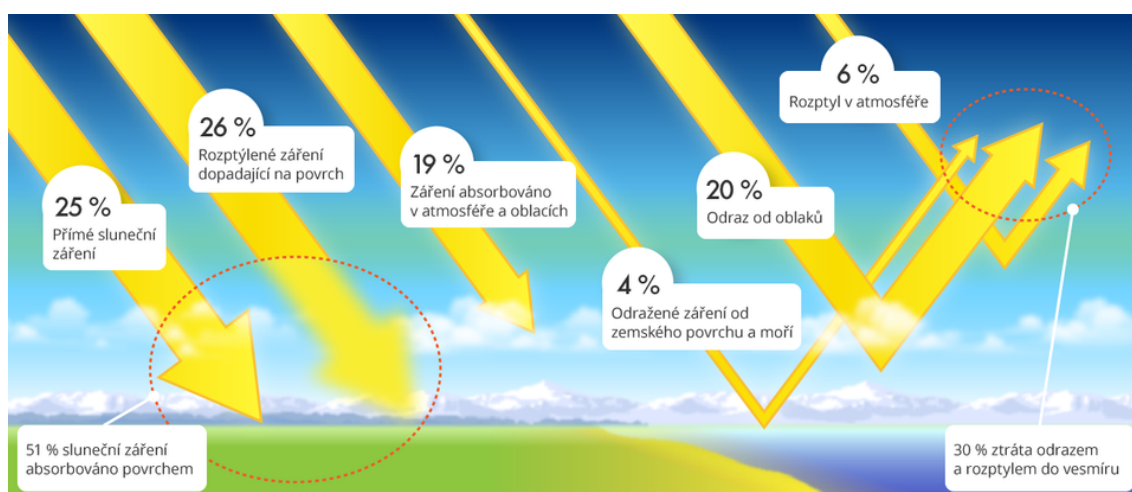
1 Obnovitelné zdroje energie

Obnovitelné zdroje energie jsou takové zdroje, které mají při postupném spotřebovávání schopnost částečného, nebo úplného obnovování. Hlavním zdrojem energie na zemi je slunce, které je příčinou celé řady procesů, z nichž můžeme energii čerpat. Příkladem takového procesu může být třeba vítr, který vzniká vlivem nerovnoměrného ohřevu zemského povrchu od slunečního záření. Dalším příkladem budiž biomasa, což je sluneční energie přeměněná v rostlinách pomocí fotosyntézy do chemické vazby.

Hlavní výhodou používání obnovitelných zdrojů je jejich nevyčerpatelnost a malý dopad na životní prostředí, hlavní nevýhodou pak zejména nestálost dodávky energie a malá účinnost přeměny. Z důvodu kolísání množství dodávané energie je zapotřebí tuto akumulovat pro potřeby pozdějšího využití.

1.1 Energie slunce

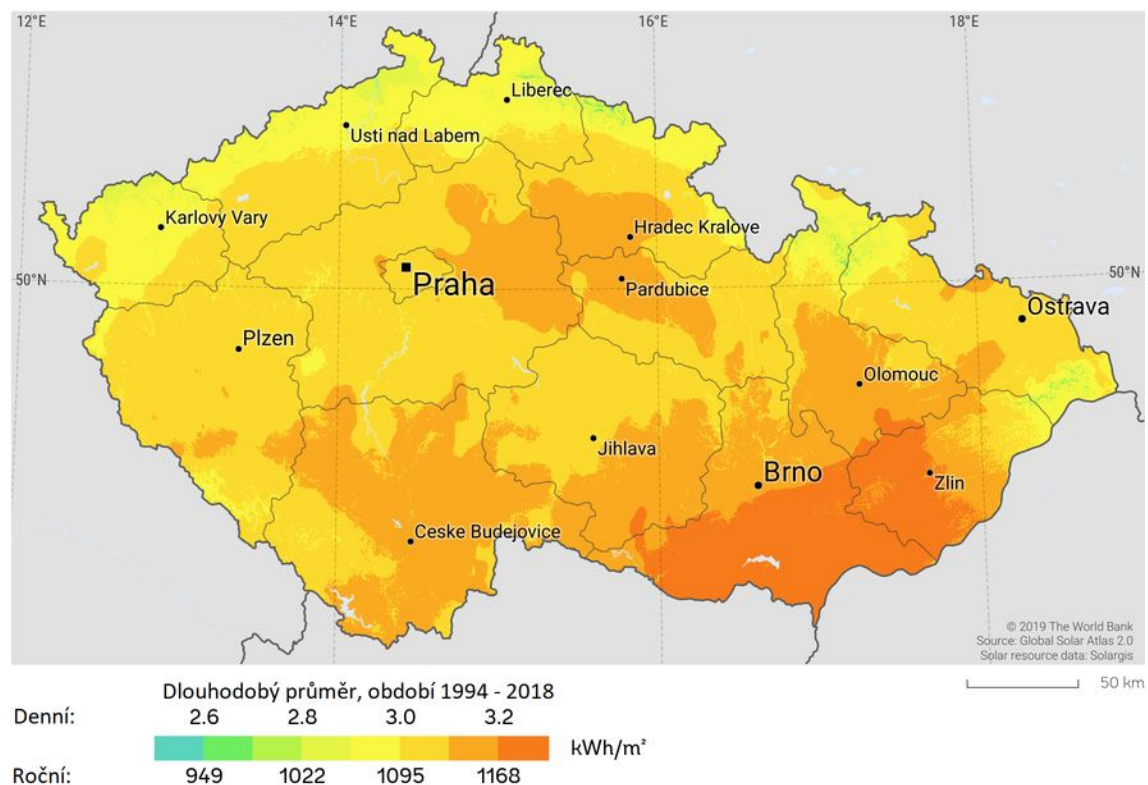
Slunce je největším tělesem naší sluneční soustavy. Je to koule žhavého plazmatu o průměru přibližně $1,4 \cdot 10^6$ km a průměrné hustotě $1400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Teplota v jádru je $14 \cdot 10^6$ K, na povrchu pak 5780 K. Skládá se z vodíku (73,46 %), helia (24,85 %), kyslíku (0,77 %), uhlíku (0,29 %) a dalších prvků. V jádru slunce probíhají termojaderné reakce, při kterých dochází k přeměně vodíku na helium, při současném uvolnění energie. Výkon slunce je asi $3,8 \cdot 10^{26}$ W, z toho na zemi dopadá přibližně $1,7 \cdot 10^{17}$ W. Energie, která dopadá na jeden metr čtvereční zemské atmosféry se nazývá solární konstanta I_0 a její hodnota činí $1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ [1][2]. Přibližně polovina této hodnoty je odražena zpět do vesmíru, případně absorbována atmosférou země, a druhá polovina pak absorbována zemským povrchem, jak je vidět na obr. 1.1.



Obr. 1.1: Sluneční záření [3]

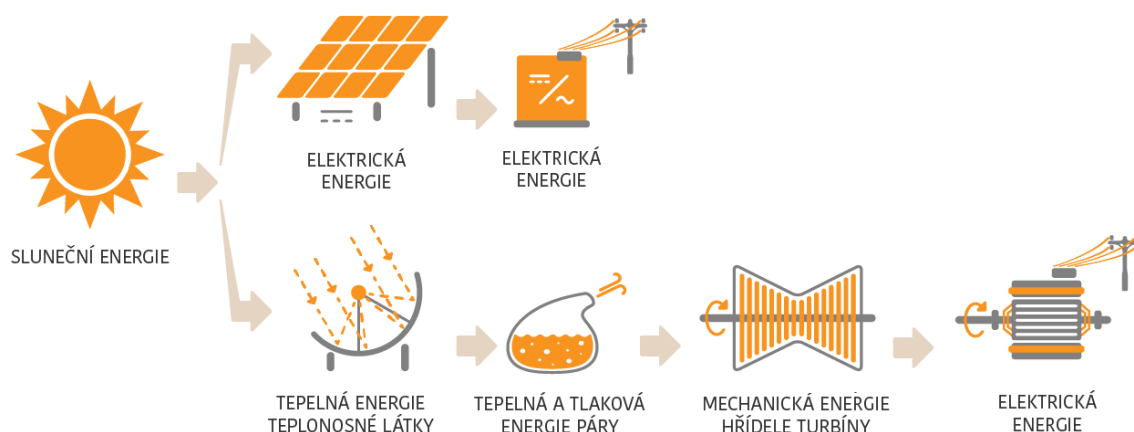
Sluneční záření, které dopadá na zemský povrch se skládá ze dvou složek. Jde o přímé sluneční záření a difúzní sluneční záření, což je světlo rozptýlené odrazem od molekul plynů a prachu. Hodnota difúzního záření je ovlivněna tzv. součinitelem znečištění Z [-].

Roční úhrn energie, který je na zemi k dispozici činí $1,5 \cdot 10^{18}$ kWh, přičemž celosvětová spotřeba je jen asi $100 \cdot 10^{12}$ kWh. Z toho vyplývá, že dostupná energie převyšuje spotřebu lidstva přibližně 15 000krát [2]. Množství dopadajícího záření se mění v průběhu dne i roku, na území České republiky je průměrná roční hodnota přibližně $1000 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$, jak je vidět na obr. 1.2. Nejvíce slunečního záření dopadá na jihu Moravy, nejméně na severu Čech.



Obr. 1.2: Průměrná hodnota slunečního záření v ČR [4]

Ačkoli je slunce hybnou silou pro většinu dále popisovaných systémů, bude na tomto místě upřena pozornost pouze na přímé využití zářivého toku dopadajícího na zemský povrch. Ostatní formy energie budou pro jejich specifčnost popsány samostatně. Aktivní využívání slunečního záření je možné rozdělit do dvou oblastí, viz. obr. 1.3. Tou první je výroba elektřiny pomocí fotovoltaických systémů, druhá možnost je termická přeměna. Teplo získané termickou přeměnou lze dále využít pro výrobu elektrické energie skrze Rankin-Clausiusův oběh, případně pro přímé využití k vytápění a ohřevu vody.



Obr. 1.3: Přeměna slunečního záření [3]

1.1.1 Fotovoltaické systémy

Tyto systémy slouží k přímé přeměně slunečního záření na elektrickou energii. Základem je fotovoltaický článek, pracující na principu fotoelektrického jevu. Protože výstup takového článku není většinou možné použít přímo, zapojují se tyto články do různých sério-paralelních kombinací, jejichž výstup je dále upravován pomocí regulátorů, nebo střídačů na hodnoty, které můžeme využít.

Fotoelektrický jev

Fotoelektrický jev poprvé pozoroval francouzský fyzik Alexandre Edmond Becquerel v roce 1839, další pokusy prováděl německý fyzik Heinrich Rudolf Hertz v roce 1887. Vysvětlit fotoelektrický jev však dokázal až Albert Einstein, který za to roku 1921 získal Nobelovu cenu za fyziku.

Fotoelektrický jev je fyzikální jev, při kterém v důsledku absorpce elektromagnetického záření látkou dojde k uvolnění elektronu z obalu atomu. Velikost energie E [J] závisí na frekvenci podle vztahu

$$E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (1.1)$$

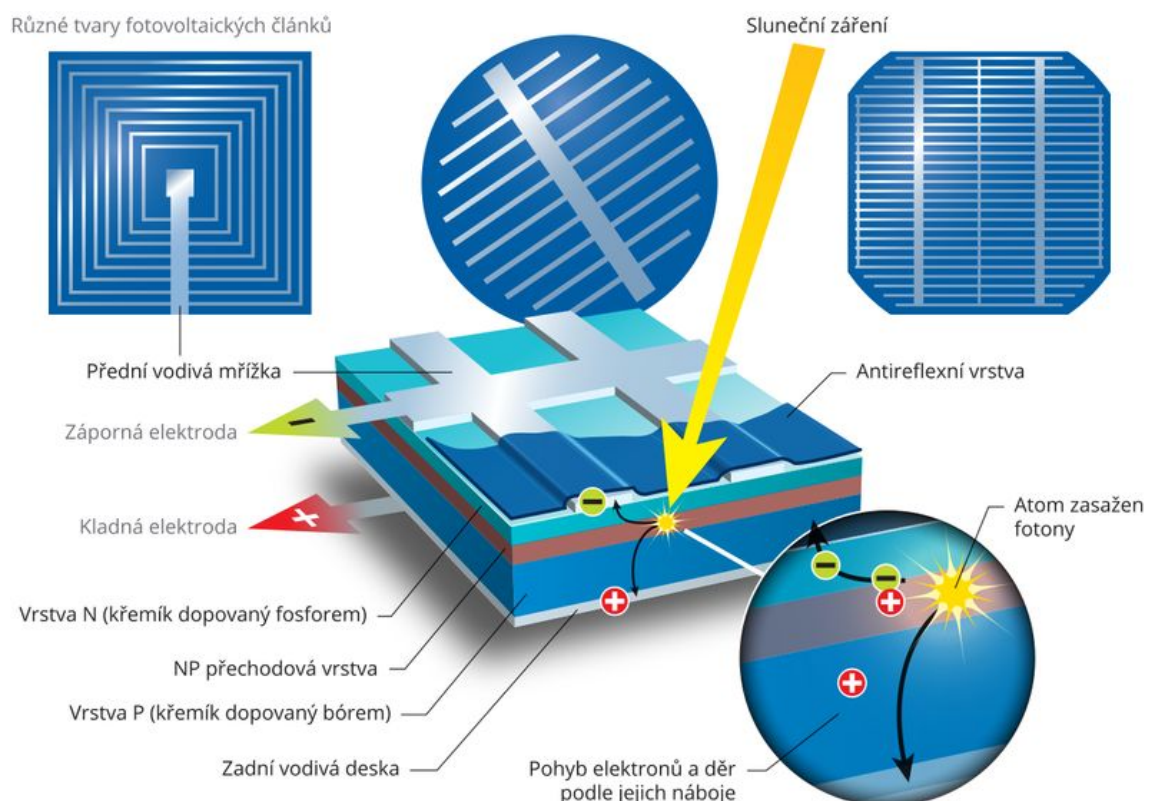
kde h [J · s] je Planckova konstanta, f [Hz] je kmitočet záření, c [m · s⁻¹] je rychlost světla ve vakuu, a λ [m] je vlnová délka. Záření při dopadu předá energii elektronům a pokud je jeho vlnová délka λ dostatečně malá, pak může být předaná energie dostatečná k překonání výstupní práce elektronu z látky, čímž dojde k vyražení elektronu. Pro vyvolání fotoelektrického jevu je tedy důležitá vlnová délka záření, nikoli jeho intenzita. Pokud je však vlnová délka dostatečná pro excitaci elektronu, pak intenzita takového záření ovlivňuje množství vyražených elektronů.

Aby bylo možné vygenerované elektrony využít, je zapotřebí je z látky odvést. Toto není možné například v kovech, protože dojde ihned k rekombinaci, ale je to

snadno proveditelné u polovodičů, kde se vygenerovaný pár elektron-díra separuje elektrickým polem přechodu PN. Po dopadu záření s energií větší než je šířka zakázaného pásu příslušného polovodiče dojde s velkou pravděpodobností k vygenerování páru elektron-díra. Pronikne-li foton tohoto záření do oblasti přechodu, nebo do jeho těsné blízkosti, jsou vygenerované nosiče rozděleny elektrickým polem na přechodu; elektrony jsou odsávány do oblasti N a díry do oblasti P. Pokud spojíme obě části přechodu vnějším obvodem, bude jím protékat elektrický proud úměrný intenzitě osvětlení. Maximální proud bude protékat v případě zapojení do zkratu. Ve stavu naprázdno se na přechodu objeví napětí, jehož velikost roste přibližně logaritmicky s intenzitou osvětlení a při intenzivním osvětlení dosahuje hodnoty difúzního napětí [5].

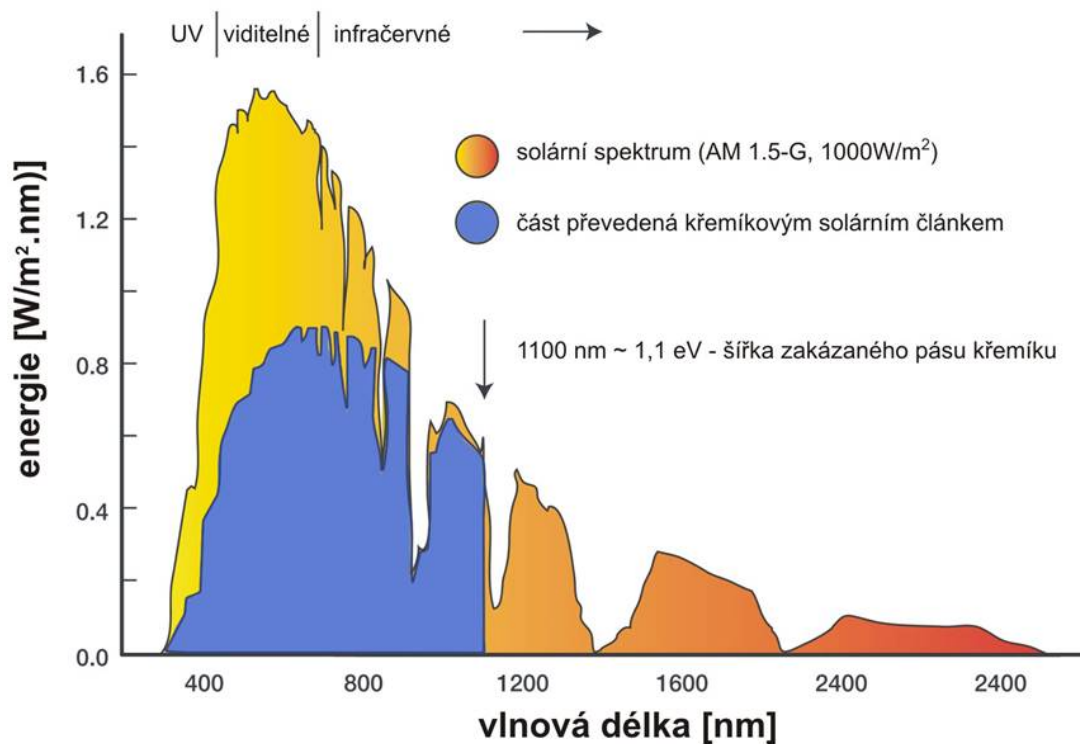
Fotovoltaický článek

Fotovoltaické články se vyrábí z polovodičových materiálů. Konstrukčně jsou články tvořeny destičkou základního materiálu, na kterém je nanášena kovová mřížka tvořící elektrodu. Pro snížení odrazivosti je dále nanášena antireflexní vrstva, případně bývá na povrchu vytvořena textura [6]. Struktura článku je vidět na obr. 1.4.



Obr. 1.4: Fotovoltaický článek [3]

O vhodnosti polovodičového materiálu pro použití v solárních článcích rozhoduje šířka zakázaného pásu energií pro daný materiál. Tato hodnota by měla ležet v rozmezí od 1,1 eV do 1,7 eV. Vyžaduje se také, aby se použité materiály vyznačovaly vysokou pohyblivostí a dlouhou dobou života minoritních nosičů náboje. Existuje mnoho polovodičových materiálů, které splňují uvedené požadavky. Jsou to zejména Si, GaAs, CdTe, InP, AlSb a další, z cenových důvodů je však využíván převážně křemík [7][8][9]. Na obr. 1.5 je znázorněna využitelná část spektra slunečního záření pro křemíkové články.



Obr. 1.5: Spektrální citlivost Si článku [1]

Vlastnosti článků se měří při tzv. standardních testovacích podmínkách (STC), které jsou definovány takto:

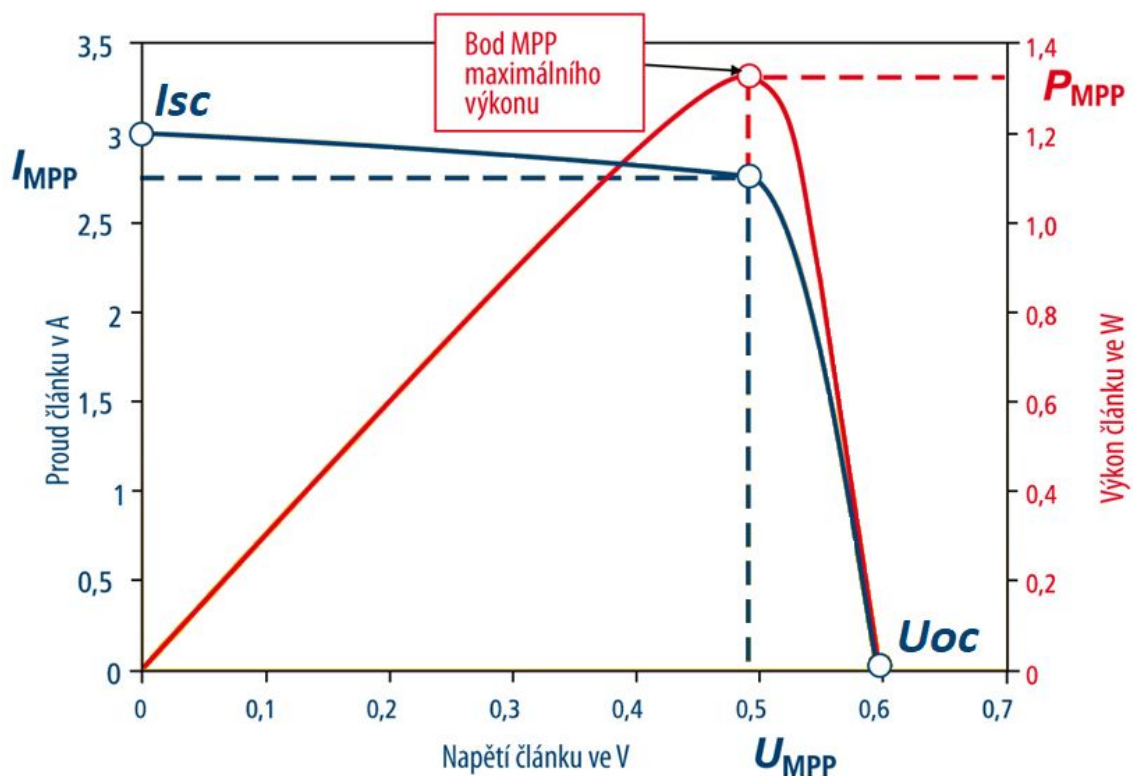
- teplota 25 °C
- intenzita slunečního záření $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
- AM 1,5

Součinitel AM [-] (z angl. Air Mass) je poměr mezi hmotou atmosféry, kterou prochází sluneční záření ke hmotě, kterou by prošlo, kdyby slunce bylo v zenitu (nadhlavníku). Vypočítá se podle vzorce [10]:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (1.2)$$

kde θ_z [°] je úhel sklonu slunce od zenitu. Důvodem pro stanovení STC je skutečnost, že intenzita záření i teplota výrazně ovlivňují průběh voltampérové charakteristiky článku.

Z voltampérové charakteristiky naměřené při STC lze odvodit parametry konkrétního článku. Maximální hodnoty jsou ohraničeny napětím naprázdno U_{OC} a proudem nakrátko I_{SC} . Zkratováním článku začne téct proud nakrátko, který je téměř ekvivalentní fotoproudu, přičemž svorkové napětí je nulové. Pokud není použita zátěž, je na svorkách napětí naprázdno. V obou případech je výstupní elektrický výkon roven 0 W. Při ozáření poskytuje článek výstupní výkon pro napětovou oblast mezi 0 V a U_{OC} . Operační bod je preferován tam, kde je maximální výstupní výkon. Příklad voltampérové charakteristiky FV článku je na obr. 1.6.



Obr. 1.6: Zatěžovací a výkonová charakteristika FV článku

- Zkratový proud I_{SC} [A] teče fotovoltaickým článkem při napětí 0 V.
- Napětí na solárním článku naprázdno U_{OC} [V] je měřeno při proudu 0 A.
- Maximální proud I_{MPP} [A], při kterém solární článek dodává maximální výkon.
- Maximální napětí U_{MPP} [V], při kterém článek dodává maximální výkon.

Výkon solárního článku je dán součinem napětí a proudu. Zařízení, odebírající energii ze solárních článků, by mělo zatěžovat článek takovým způsobem, aby pracoval právě v okolí bodu maximálního výkonu (MPP). Jen tak může fotovoltaický článek využít sluneční energii optimálně [7].

Maximální možná plocha pro danou voltampérovou charakteristiku určuje faktor plnění (Fill Factor) FF [-], který je tím větší, čím pravoúhlejší je voltampérová charakteristika. Faktor plnění je definován jako [7]:

$$FF = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (1.3)$$

Dále je možno vyjádřit účinnost článku η [-] jako podíl výkonu článku v bodě MPP a příkonu dopadajícího záření P_{in} [W] [7]:

$$\eta = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot U_{OC} \cdot I_{SC}}{P_{in}} \quad (1.4)$$

Maximální účinnost článku s jedním PN přechodem je omezena tzv. Shockleyho-Queisserovým limitem, který je závislý na spektru záření a šířce zakázaného pásu použitého polovodiče. Za ideálních podmínek je tato hodnota pro křemík přibližně 32 %, maximálně lze dosáhnout účinnosti 33,7 % při šířce zakázaného pásu 1,34 eV. Z toho vyplývá, že při STC je u fotovoltaiky maximální výtěžnost $337 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Pro zvýšení účinnosti je možné použít vícevrstvé články, kde různé vrstvy budou mít různou šířku zakázaného pásu. Pak lze při použití koncentrovaného slunečního záření dosáhnout teoretické maximální účinnosti 86,8 % [11].

Fotovoltaické panely

Fotovoltaický panel je tvořen sestavou několika článků, které jsou navzájem propojeny a to buďto sériově, paralelně, či sério-paralelně. Panely musí odolat působení okolního prostředí, zejména je nutné počítat s působením vody a větru. Plocha, kterou panely zaujímají, je poměrně značná a je proto vhodné zpracovat statický posudek na zatížení větrem, aby byly panely při montáži řádně uchyceny. Pro ochranu před vnějšími vlivy je celá sestava zapouzdřena pod tvrzené ochranné sklo s vysokou propustností pro sluneční záření. Panel je pak uložen do rámečku, který je většinou z hliníkové slitiny a slouží k mechanickému upevnění panelu. Zadní strana panelu je tvořena vícevrstvou plastovou fólií a opatřena svorkovnicí pro připojení kabeláže.

Nejstarší vyráběné články, tzv. články první generace, jsou vyráběny z desek monokrystalického křemíku. Mají vysokou účinnost pro přímé sluneční záření, reálně asi 14–18 %. Nevýhodou je nutnost použít větší množství vysoce čistého křemíku a z toho plynoucí vyšší cena. Monokrystalický panel je vidět na obr. 1.7 vlevo.

Články druhé generace jsou tenkovrstvé, vyrábí se z polykrystalického, nebo amorfního křemíku. Dosahuje se tak nižší spotřeby materiálu a tím nižší ceny, ovšem za cenu nižší účinnosti pro přímé sluneční záření. Články jsou lehčí a mechanicky odolnější, navíc jsou schopny pracovat i s difúzním, případně odraženým zářením.

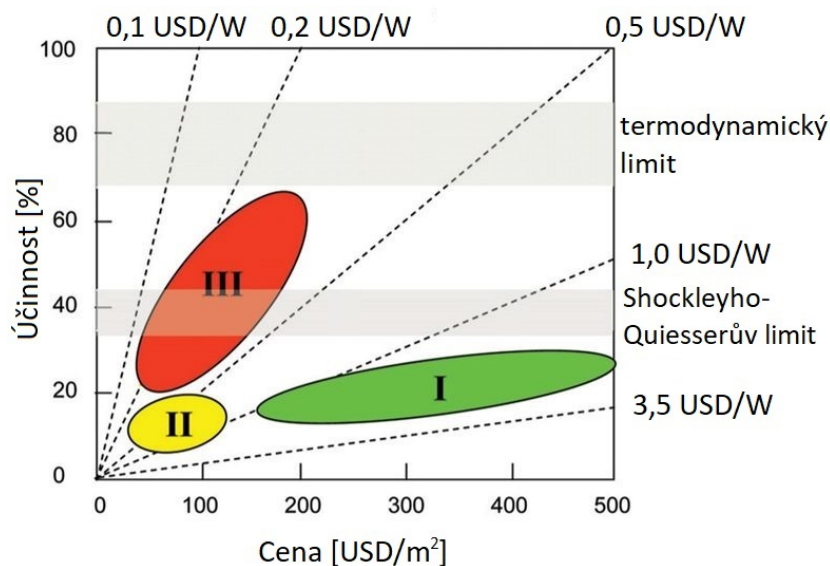
Účinnost polykrystalických panelů se pohybuje kolem 12–17%, u amorfních je to 7–9%. Polykrystalický panel je zobrazen na obr. 1.7 vpravo.



Obr. 1.7: Monokrystalický panel (vlevo) a polykrystalický panel (vpravo) [13]

Třetí generace článků se pokouší o zvýšení účinnosti a prolomení Shockleyho-Queisserova limitu, ideálně při udržení nízké výrobní ceny. Nadějí jsou tandemové články, kdy se využívá několika tenkých vrstev různých polovodičů nad sebou. Každá z těchto vrstev má jinou šířku zakázaného pásu a přeměňuje tedy fotony s různou energií [12].

Srovnání ceny a účinnosti jednotlivých generací je na obr. 1.8. Cena je zde vyjádřena v amerických dolarech.



Obr. 1.8: Účinnost a cena jednotlivých generací FV panelů [12]

1.1.2 Tepelné systémy

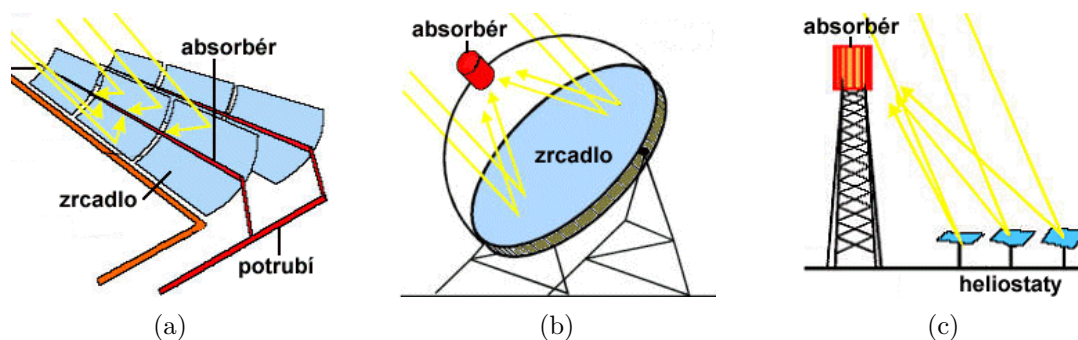
Tepelné systémy využívají termické přeměny slunečního záření. Takto získané teplo se často využívá pro vytápění a ohřev teplé vody. Termickou přeměnu je možné využít také skrze Rankin-Clausiusův oběh, tedy ke generování páry a pohonu turbogenerátoru, zde je však zapotřebí vyšších teplot, k čemuž se používají koncentrátoři slunečního záření. Další možností je využít termoelektrickou přeměnu a generovat potenciál pomocí Seebeckova jevu.

Solární koncentrátoři

Koncentrátoři slouží k soustředění slunečního záření z velké plochy do plošky co nejmenší. K tomu se využívá různě tvarovaných a vhodně orientovaných zrcadel. Běžně používaná jsou následující provedení [14]:

- Žlabový sběrač – parabolické zrcadlo ve tvaru dlouhého žlabu, v jehož ohnisku je umístěn absorbér, což je trubice s teplotnosnou kapalinou. Ta se zahřívá na teplotu několika stovek °C. Zrcadlo je automaticky natáčeno za sluncem tak, aby maximálně využívalo dopadající záření (obr. 1.9a).
- Diskový sběrač – parabolické zrcadlo ve tvaru disku. V ohnisku je opět umístěn absorbér, kde se zahřívá teplotnosná kapalina, případně je zde Stirlingův motor (obr. 1.9b). Pro velké průměry se zrcadlo sestavuje z vícero menších zrcadel.
- Heliostaty – soustava rovinných zrcadel automaticky natáčených tak, aby soustředila sluneční záření do vrcholu věže, kde je umístěn absorbér (obr. 1.9c).

Dosahovaná účinnost je u žlabového koncentrátoru 10–16 %, u diskového 16–29 %, u heliostatů 10–22 % [15].



Obr. 1.9: Koncentrátoři záření (a) žlabový, (b) diskový, (c) heliostaty [14]

Termoelektrické generátory

Termoelektrický generátor, který umožňuje přímou přeměnu rozdílu teplot na elektrickou energii je založen na principu Seebeckova jevu. Tento jev objevil německý

fyzik Thomas Johan Seebeck. Je založen na teplotní závislosti potenciálové bariéry, bránící výstupu elektronu z kovu, která je u různých materiálů odlišná. Spojením dvou odlišných kovů („A“ a „B“) na dvou místech se při konstantní teplotě obou konců rozdílné potenciálové bariéry navzájem ruší. Pokud budou spoje na rozdílných teplotách T_1 [K] a T_2 [K], začne v uzavřeném obvodu protékat proud, jestliže obvod přerušíme, objeví se v místě přerušení tzv. termoelektrické napětí U [V], dané vztahem [10]:

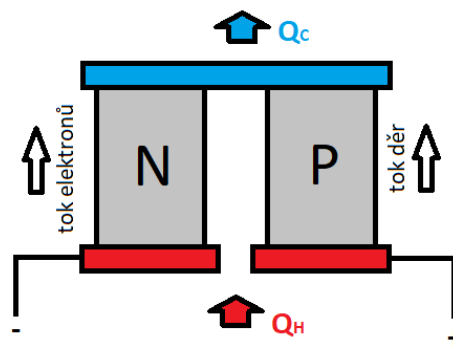
$$U = \alpha(T_1 - T_2) \quad (1.5)$$

kde α [$V \cdot K^{-1}$] je Seebeckův koeficient. Pro malé rozdíly teplot je tento vztah lineární, při větších rozdílech se zpřesňuje podle kvadratické funkce zavedením Seebeckova koeficientu β [$V \cdot K^{-2}$] [10]:

$$U = \alpha(T_1 - T_2) + \frac{1}{2}\beta(T_1 - T_2)^2 \quad (1.6)$$

Opačným jevem je tzv. Peltierův jev. Ten objevil francouzský fyzik Jean Charles Athanase Peltier, který pozoroval efekt pohlcování a uvolňování tepla při průchodu stejnosměrného proudu. Nosiče náboje prochází z prostředí o vyšší střední energii do prostředí o nižší střední energii a naopak. Jestliže přechází nosič náboje z prostředí o vyšší střední energie do nižší, vyzáří přebytečnou energii ve formě tepla a dochází k zahřívání, v opačném případě je nosič náboje nucen přijmout energii na úkor energie tepelné a dochází k ochlazení. Takovéto chování platí pro materiály, kde jsou nosiči náboje elektrony, tj. kovy a polovodiče typu N. U polovodičů P je chování opačné. Opačného chování lze dosáhnout také změnou směru proudu [10].

Jako termoelektrický generátor lze použít Peltierův článek, který je složen z velkého množství termoelektrických dvojic tvořených polovodiči typu N a P (obr. 1.10). Tyto dvojice se pravidelně střídají a jsou propojeny do série tenkými kovovými



Obr. 1.10: Peltierův článek

můstky. Při průchodu tepelného toku Peltierovým článkem bude tento pracovat jako zdroj elektrické energie. Ze spodní strany je přivedeno teplo Q_H [W] a z horní

strany je odváděno teplo Q_C [W]. Vzniká tak teplotní rozdíl mezi horkou a studenou stranou dvojice. Majoritní nosiče se pohybují od horkého konce k studenému, tedy v polovodiči N elektrony a v polovodiči P díry.

Výkon P [W] je závislý na počtu termoelektrických dvojic, provedení, vlastnostech materiálu, přechodových odporech a teplotním rozdílu. Lze jej vypočítat ze vztahu [16]:

$$P = \frac{\alpha^2 N A (T_H - T_C)^2}{2\rho (l + n) \left(1 + 2r \frac{l_c}{l}\right)^2} \quad (1.7)$$

kde α [$V \cdot K^{-1}$] je Seebeckův koeficient, N [-] počet termoelektrických dvojic, A [m^2] plocha příčného řezu, T_H [K] a T_C [K] teploty teplé a studené strany, ρ [$\Omega \cdot m$] je odpor použitého termoelektrického materiálu, l [m] délka termoelementu, n [-] a r [-] elektrický a tepelný kontaktní parametr a l_c [m] tloušťka kontaktní vrstvy. Parametry n a r se vypočítají podle vztahů [16]:

$$n = \frac{2\rho_c}{\rho} \quad (1.8)$$

$$r = \frac{\lambda}{\lambda_c} \quad (1.9)$$

kde ρ_c [$\Omega \cdot m$] je přechodový odpor, λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] tepelná vodivost termoelementů a λ_c [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] tepelná vodivost kontaktní vrstvy. Pro ideální článek lze při zanedbání kontaktních odporů použít zjednodušený vztah [16]:

$$P = \frac{\alpha N A (T_H - T_C)^2}{2\rho l} \quad (1.10)$$

Účinnost termoelektrických generátorů dosahuje maximálně 3–10%. Závisí na použitém materiálu, který musí mít malou tepelnou a velkou elektrickou vodivost.

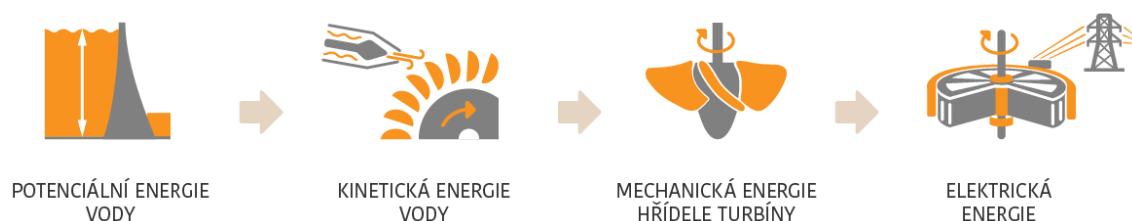
1.2 Energie vody

Voda pokrývá většinu zemského povrchu. Vlivem slunečního záření dochází k jejímu odpařování, a následně dopadá zpět ve formě srážek. Historicky byla energie vody využívána už od pradávna. Lidé využívali vodní kola např. k mletí obilí, pohonu hamrů a dalších strojů. Vynález vodní turbíny pak umožnil používat energii vody ještě efektivněji, její spojení s generátorem umožnilo rozvoj vodních elektráren. Vodní energii lze rozdělit následovně:

- energie vodních toků,
- energie moří,
 - vlny
 - slapové jevy
 - proudy
- teplo uchované ve vodě.

1.2.1 Turbíny

Srdcem každé vodní elektrárny je turbína. Skládá se z oběžného kola, zařízení pro přívod a odvod vody. Voda se přivádí z výše položeného místa k turbíně, potenciální energie vody se změní na energii kinetickou, tu voda předá turbíně, která se roztočí. Rotační pohyb oběžného kola turbíny se přes hřídel přenese na rotor generátoru a ten na základě elektromagnetické indukce vyrábí elektřinu. Princip činnosti ilustruje obr. 1.11.



Obr. 1.11: Konverze energie vodní elektrárny [3]

Podle tlakových poměrů a způsobu předání energie se turbíny dělí na:

- rovnotlaké,
- přetlakové.

U rovnotlakých (akčních) turbín se celý spád, působící prostřednictvím hydrostatického tlaku, transformuje v kanálech s rozváděcími lopatkami na energii kinetickou, která je předána lopatkám oběžného kola. Tlak se při průchodu oběžným kolem nemění. Po odevzdání energie lopatkám oběžného kola turbíny voda padá pod turbínu a odpadním kanálem je odvedena bez užitku mimo elektrárnu. Mezi zástupce rovnotlakých turbín patří Peltonova a Bánkiho turbína [17].

U přetlakových (reakčních) turbín se část tlakové energie mění v kinetickou v rozváděcích kanálech a část při průchodu oběžným kolem. Voda má při vstupu do oběžného kola přetlak oproti tlaku na výstupu. V zařízení pro odvod vody z oběžného kola dochází ke snižování rychlosti proudění vody. Součástí odváděcího zařízení je savka, která umožňuje snížení tlaku pod oběžným kolem, což může mít za následek zvýšení účinnosti. Typickými zástupci přetlakových turbín jsou Kaplanova a Francisova turbína [17].

Další členění turbín lze zavést podle směru vstupu nebo výstupu vody z oběžného kola turbíny. Rozlišují se turbíny [3]:

- radiální – tok vody kolmý k hřídeli,
- axiální – tok vody rovnoběžný s osou hřídele,
- radiaxiální – tok vody mění svůj směr z radiálního na axiální,
- tangenciální – proud vody je nasměrován tečně k obvodu oběžného kola.

Výkon P [W] vodní elektrárny závisí na výšce spádu H [m] a na průtoku vody Q [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$], která projde turbínou. Dále závisí také na hustotě vody ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] a gravitačním zrychlení g [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$], což jsou však téměř konstantní hodnoty. Vztah pro výpočet má následující tvar [3][17] :

$$P = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q \cdot \eta \quad (1.11)$$

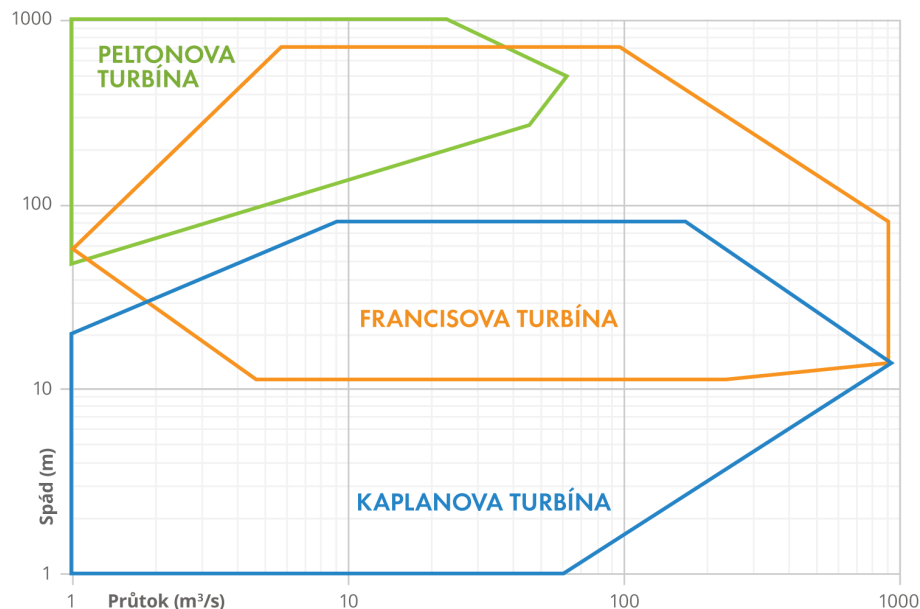
Proměnná η [-], která ve vztahu vystupuje, udává účinnost elektrárny. Při jejím provozu vznikají ztráty, jež mají následující složky [3]:

- Objemové ztráty – snížení výstupního výkonu z důvodu zmenšení užitečného průtoku vody turbínou. Část vody proteče mimo turbínu a nevykoná žádnou práci. Objemovým ztrátám odpovídá objemová účinnost η_V .
- Hydraulické ztráty – vznikají překonáváním průtokových odporů v potrubí (ohyby, víření, tření). Těmto ztrátám odpovídá hydraulická účinnost η_H .
- Mechanické ztráty – vznikají v mechanických převodech a ložiskách. Odpovídá jim mechanická účinnost η_m .
- Elektrické ztráty – vznikají při konverzi na elektrickou energii v generátoru a odpovídá jim elektrická účinnost η_e .

Celková účinnost je pak součinem všech těchto složek:

$$\eta = \eta_V \cdot \eta_H \cdot \eta_m \cdot \eta_e \quad (1.12)$$

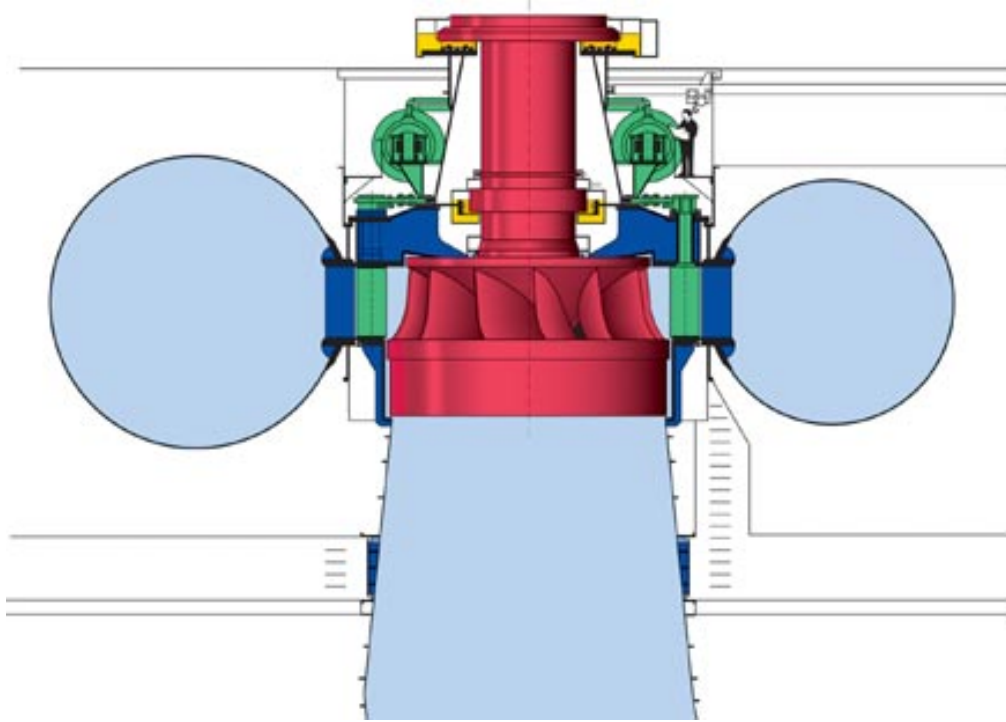
Při volbě typu turbíny hraje klíčovou roli průtok a spád. Vhodnost jednotlivých typů turbín popisuje obr. 1.12.



Obr. 1.12: Využitelnost turbín podle průtoku a spádu [3]

Francisova turbína

Francisova turbína (obr. 1.13) patří mezi reakční přetlakové radiální turbíny a v energetice je jednou z nejpoužívanějších turbín. Voda během průchodu mění svůj tlak. S poklesem tlaku je spojena i transformace tlakové energie v kinetickou energii, část se mění v rozváděcích kanálech a část při průchodu oběžným kolem, které má pevné lopatky. Může být použita pro poměrně široký rozsah průtoků i spádů. Pro zajištění stálých otáček při změně průtoku se provádí regulace natáčením lopatek rozváděcího kola, umístěných po celém obvodu turbíny.



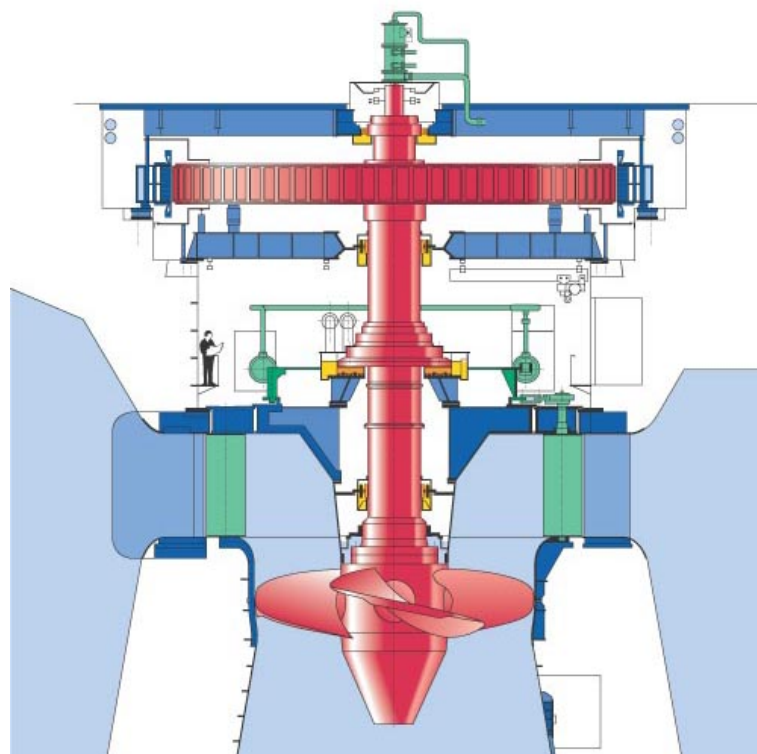
Obr. 1.13: Francisova turbína [19]

Voda přitéká z přivaděče do vstupní spirální skříně turbíny, která ji rovnoměrně rozdělí do všech mezilopátkových kanálů. Nastavením rozváděcích lopatek se profilují průtočné kanály a voda v nich získává potřebnou rychlost a směr, aby optimálně dopadala na lopatky oběžného kola a mohla mu odevzdat maximum své energie. Po výstupu z oběžného kola je voda odváděna savkou, jejíž vodotěsnost zvyšuje využitelnost spádu až ke spodní hladině.

Účinnost Francisových turbín dosahuje přes 90 %, dokáží zpracovat spády i několik stovek metrů. Velkou výhodou je jejich snadná použitelnost v přečerpávacích elektrárnách. Reverzní soustrojí se při výrobě elektřiny používá jako turbína, v čerpadlovém provozu při změně směru otáčení slouží jako čerpadlo [3].

Kaplanova turbína

Kaplanova turbína (obr. 1.14) je rovněž přetlakovou reakční turbínou. Je určena pro menší až střední spády a větší průtoky. Díky natáčivým lopatkám rozváděcího i oběžného kola dokáže pracovat se stejnou účinností i při sníženém nebo proměnlivém průtoku. Voda prochází turbínou rovnoběžně s osou, jde tedy o axiální typ turbíny.



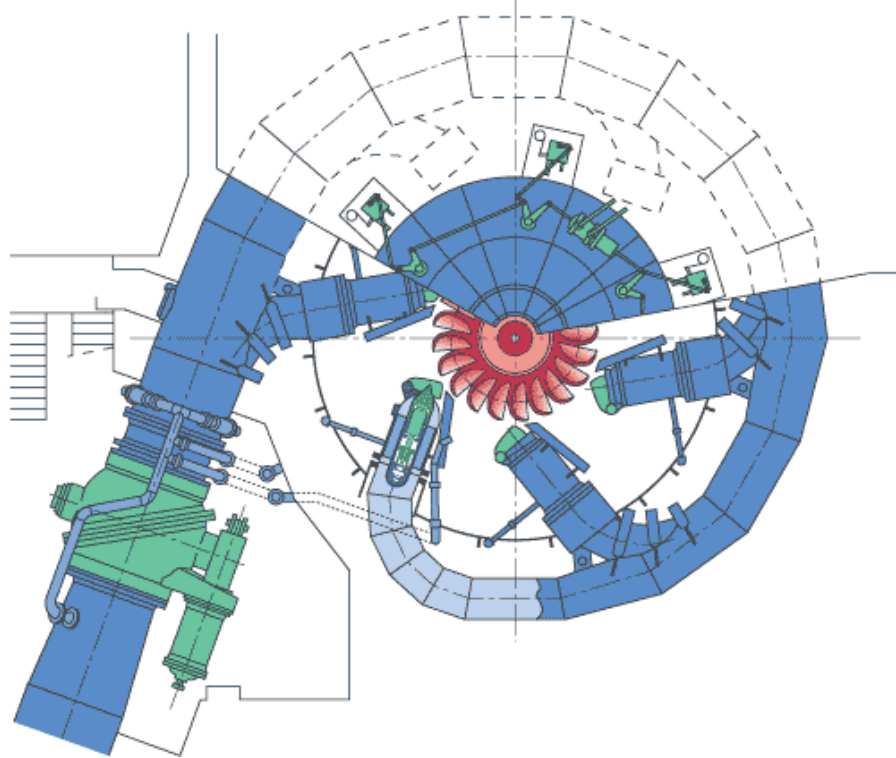
Obr. 1.14: Kaplanova turbína [20]

Přívod a rozvedení vody k oběžnému kolu a odvod vody od turbíny je stejný, jako u Francisovy turbíny, principiální rozdíl je v tvaru a profilu lopatek oběžného kola. Rotor Kaplanovy turbíny připomíná lodní šroub s natáčecími listy. Voda urychlená a nasměrovaná lopatkami rozváděcího kola je přivedena k lopatkám oběžného kola v nejužším místě turbíny. Při průchodu oběžným kolem odevzdává svou energii a odvádí se savkou, která zvyšuje podtlak za turbínou.

Účinnost Kaplanových turbín dosahuje přes 90%. Konstrukčně je o něco složitější kvůli mechanismu natáčení lopatek, který prochází centrální částí rotoru. To zvyšuje její pořizovací cenu i náklady na údržbu. Výhodou je naopak dobrá výkonová charakteristika při malém spádu a kolísavém průtoku. Pracuje s téměř stejnou účinností v širokém rozsahu zatížení. Pro malé vodní elektrárny mohou být v rámci úspor vyráběny s pevnými lopatkami rozváděcího nebo oběžného kola, poté ale pracují s nižší účinností [3].

Peltonova turbína

Peltonova turbína (obr. 1.15) je rovnotlaká akční turbína. Voda je přiváděna jen na část obvodu oběžného kola, a to tangenciálním ostřikem. Je určena pro velké spády a malé průtoky vody, čímž je předurčena pro práci zejména v horských oblastech.



Obr. 1.15: Peltonova turbína [21]

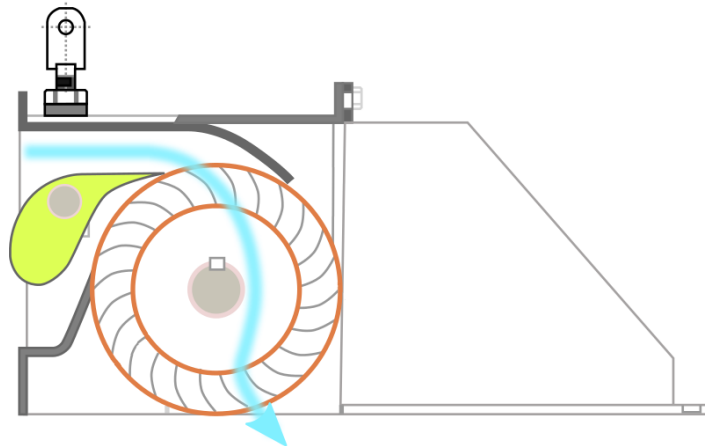
Voda je přiváděna tlakovými přivaděči, na konci kterých je osazena jedna nebo několik ostřikových dýz. V dýzách se tlaková energie vody mění na kinetickou energii vodního paprsku a ten je nasměrován na oběžné kolo s dvojitými lžícovitými lopatkami. Tlak vody se při průchodu oběžným kolem již nemění. Lopatka oběžného kola paprsek rozdělí na dvě poloviny a otočí o 180° , čímž absorbuje téměř veškerou jeho energii. Po opuštění lopatky voda padá s minimální zbytkovou rychlostí volně do odpadu pod turbínu.

Účinnost Peltonovy turbíny dosahuje až 95 %, menší turbíny mají účinnost nižší. Regulace se provádí zavíráním, nebo otevíráním výtakového otvoru dýzy zasouváním regulační jehly [3].

Bánkiho turbína

Bánkiho turbína (obr. 1.16) je dalším typem rovnotlaké akční turbíny. Oběžné kolo tvoří dvě kruhové desky, mezi kterými jsou upevněny lopatky ve tvaru lamel. Lopatky jsou obtékány vodou ve dvou směrech. Voda vtéká přes lopatky dovnitř kola

a opět přes lopatky vytéká ven. Při každém průchodu přes lopatky odevzdá část své energie. Účinnost Bánkiho turbíny dosahuje 70–80 %. Používá se u malých vodních elektráren zejména kvůli nízké pořizovací ceně [17].

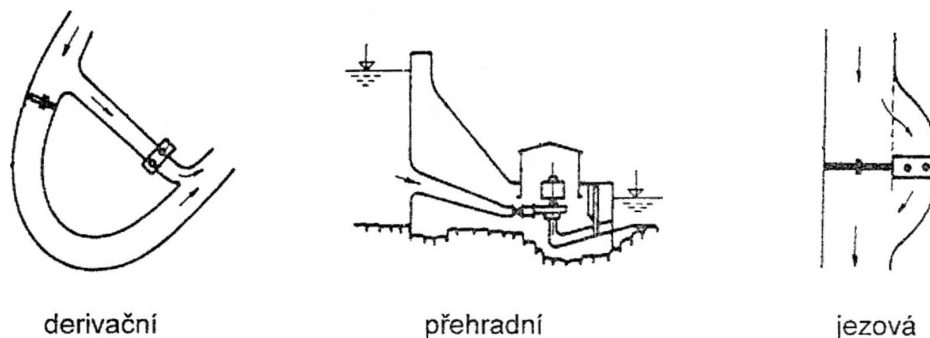


Obr. 1.16: Bánkiho turbína [22]

1.2.2 Energie vodních toků

Energie vodních toků se využívá pomocí přehrazení vodního toku a tím vytvoření rozdílných výšek hladin před a za hrází. Toho lze dosáhnout pomocí přehrady, nebo jezu. Princip ilustruje obr. 1.17. Elektrárny lze rozdělit na [17]:

- přehradní – spád je vytvořen přehradou,
- jezové – spád vytvořen jezem,
- derivační – umělé vedení vody mimo vodní tok pomocí kanálu, nebo potrubí.



Obr. 1.17: Základní varianty vodních elektráren [17]

Dalším typem jsou elektrárny přečerpávací, které budou podrobněji popsány v části o akumulaci energie, v kapitole 2.2.2.

1.2.3 Energie moří

Energii moří není možné v České republice využívat, proto budou možnosti uvedeny jen stručně, aby byl přehled ucelený. K získání energie z moře lze využít:

- energii vln,
- energii přílivu a odlivu (tzv. slapové jevy),
- energii mořských proudů.

1.2.4 Teplo uchované ve vodě

Další forma energie, kterou lze z vody čerpat, je tepelná energie, která je ve vodě uložena. Je možné využít teplotního rozdílu mezi teplou vodou při hladině a studenou vodou v hloubce. Vzhledem k poměrně malé hloubce vodních nádrží u nás se takové využití nabízí opět spíše na mořích.

Principiálně se využívá nízkovroucí teplotnosné kapaliny, která se zahřívá teplou vodou. Dochází k jejímu odpařování a par se využívá k pohonu turbíny. Po průchodu turbínou dochází opět ke kondenzaci za pomoci chladné hlubinné vody.

1.2.5 Osmotická energie

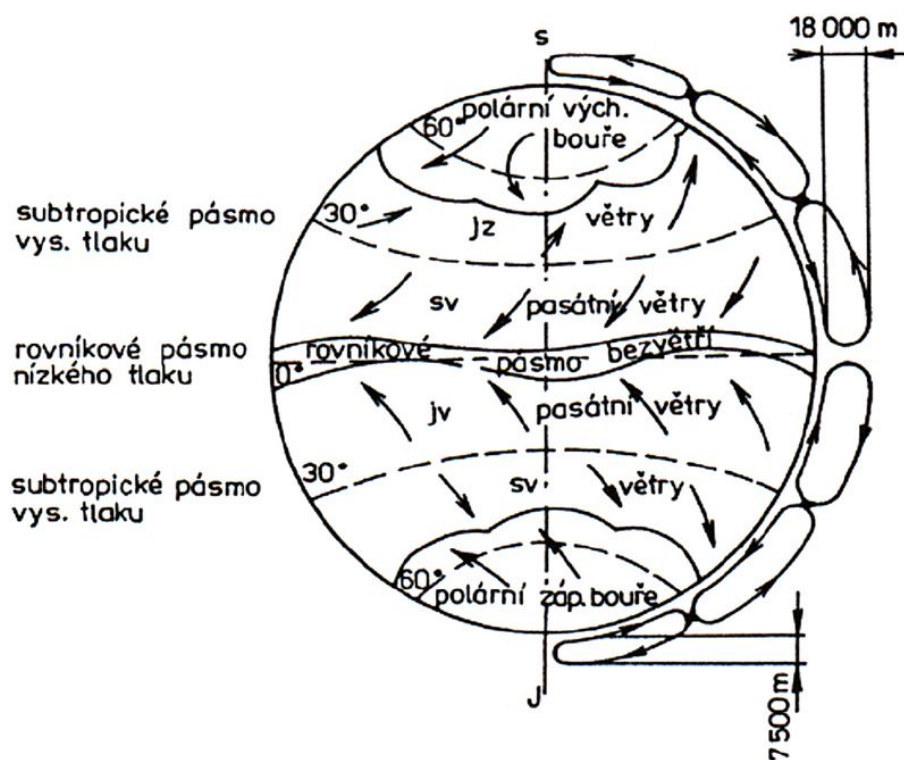
Do uceleného výčtu patří i využití osmotického tlaku. Je to tlak toku rozpouštědla pronikajícího přes polopropustnou membránu do roztoku, ve kterém je vyšší koncentrace látek než v pronikajícím rozpouštědle. Pronikání rozpouštědla trvá tak dlouho, až je dosaženo stejné koncentrace látek na obou stranách polopropustné membrány. Dochází postupně k ředění roztoku s původně vyšší koncentrací rozpuštěných látek.

Pokud je membrána prostupná pro rozpouštědlo i pro rozpuštěné látky, na obou stranách membrány se po jisté době ustaví rovnováha. Koncentrace rozpuštěných látek a výšky obou hladin se nakonec vyrovnají. Je-li ale bariéra polopropustná, tedy propustná pouze pro rozpouštědlo, rozpuštěné látky přes ní neprojdou a membránou prochází pouze rozpouštědlo, dokud se koncentrace na obou stranách bariéry nevyrovnají. K průchodu rozpouštědla dochází přes rostoucí gravitační sílu na straně s vyšší koncentrací látek, kde hladina roztoku stoupá. Osmotická síla je schopna vytvořit tlak až 1,2 MPa, což odpovídá výšce vodního sloupce 120 metrů [2].

Osmotická elektrárna se skládá ze dvou nádrží oddělených polopropustnou membránou. Do jedné nádrže přitéká slaná mořská voda a do druhé nádrže sladká voda z řeky. Sladká voda postupně proniká membránou do nádrže s mořskou vodou a membrána zabraňuje zpětnému toku vody. V nádrži s mořskou vodou roste výška vodního sloupce, a zvyšuje se tak potenciální energie. Následně je voda vedena na turbínu k výrobě elektrické energie.

1.3 Energie větru

Vítr je pohyb vzduchu, který vzniká vlivem nerovnoměrného ohřívání zemského povrchu slunečním zářením. Od zemského povrchu se ohřívá přilehlá vrstva vzduchu. Ohřátý vzduch má nižší měrnou hmotnost, proto stoupá vzhůru a na jeho místo se přesouvá chladnější vzduch z míst s chladnějším povrchem. Vznikají tak tlakové výše a tlakové níže. Tyto tlakové rozdíly jsou vyrovnávány vznikem větru, který vane vždy od tlakové výše k tlakové níži. Celý proces je ovlivněn rotací země a střídáním dne a noci. V globálním měřítku teplý vzduch na rovníku stoupá vzhůru, ochlazuje se a vane směrem k obratníkům, kde opět klesá a vane při zemském povrchu zpět k rovníku. Podobně cirkuluje vzduch za obratníky, čímž vznikají pravidelné vzdušné proudy, které se stáčí vlivem rotace země [1]. Princip vzniku větru ilustruje obr. 1.18.



Obr. 1.18: Princip vzniku větru [1]

Při využívání energie větru hraje důležitou roli jeho rychlost, která je ovlivňována členitostí zemského povrchu. Ve větších výškách, kde není pohyb větru brzděn překážkami, je jeho rychlost vyšší. Pro měření rychlosti větru se používají měřicí přístroje – anemometry, lze ji však přibližně určit i bez použití měřicích přístrojů pomocí Beaufortovy stupnice. Tu sestavil kontradmírál britského Královského námořnictva Sir Francis Beaufort. Stupnice přiřazuje rychlosti větru působení na různé objekty, viz. tabulka 1.1.

Tab. 1.1: Beaufortova stupnice rychlosti větru na souši [17]

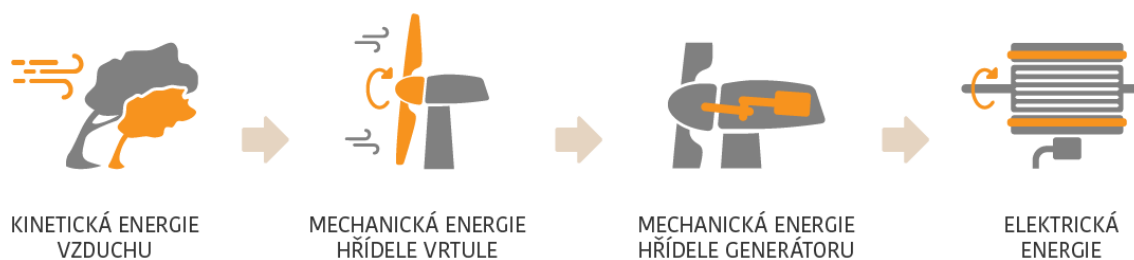
Stupeň	Vítr	Rychlost (km/h)	Popis
0	Bezvětří	< 1	Kouř stoupá kolmo vzhůru
1	Vánek	1–5	Směr větru poznatelný podle pohybu kouře
2	Větřík	6–11	Listí stromů šelestí
3	Slabý vítr	12–19	Listy stromů a větvičky v trvalém pohybu
4	Mírný vítr	20–28	Zdvihá prach a útržky papíru
5	Čerstvý vítr	29–39	Listnaté keře se začínají hýbat
6	Silný vítr	40–49	Telegrafní dráty sviští, používání deštníků je nesnadné
7	Mírný vichr	50–61	Chůze proti větru je nesnadná, celé stromy se pohybují
8	Čerstvý vichr	62–74	Ulamují se větve, chůze proti větru je normálně nemožná
9	Silný vichr	75–88	Vítr strhává komíny, tašky a břidlice ze střech
10	Plný vichr	89–102	Vyvrací stromy, působí škody na obydlích
11	Vichřice	103–114	Působí rozsáhlá pustošení
12-17	Orkán	> 117	Ničivé účinky (odnáší střechy, hýbe těžkými předměty)

Pro výkon větru protékajícího jednotkovou plochou P_v [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] je možné odvodit následující rovnici [1]

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (1.13)$$

kde ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] je hustota vzduchu a v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] jeho rychlost. Výkon je tedy přímo úměrný hustotě vzduchu a třetí mocnině rychlosti. energii větru je možné využít krom jiného k přímé přeměně na elektrickou energii. K tomu se používají větrné motory, což jsou zařízení měnící kinetickou energii větru na energii mechanickou, která je následně pomocí generátoru převedena na energii elektrickou, viz. obrázek 1.19.

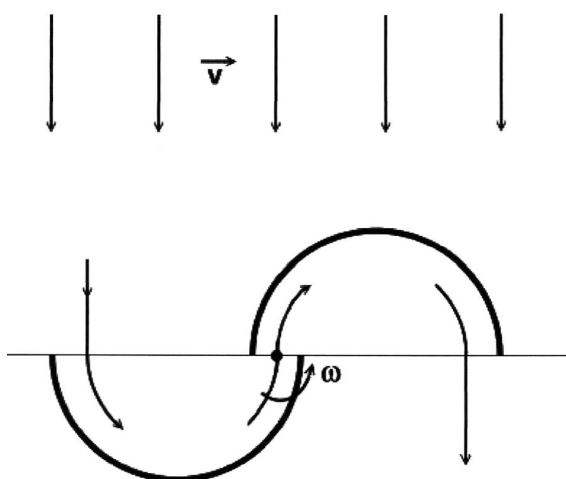
Podle aerodynamického principu využití kinetické energie vzduchu se rozlišují větrné motory odporové a vztlakové [1].



Obr. 1.19: Konverze větrné energie [3]

1.3.1 Odporové motory

Odporové větrné motory využívají tlaku proudícího vzduchu na překážku. Jejich podstatou je, že plocha nastavená proti větru klade aerodynamický odpor, čímž se vyvozuje síla, která se přeměňuje obvykle na rotační pohyb. Tyto motory patří mezi nejstarší a mohou mít osu otáčení jak vodorovnou, tak i svislou. K typickým zástupcům patří Savoniův motor (obr. 1.20). Jeho výhodou je jednoduchá konstrukce, nezávislost na směru větru a použitelnost i při nízké rychlosti větru. Nevýhodou je malá účinnost, která dosahuje 15–23 % [1][18].

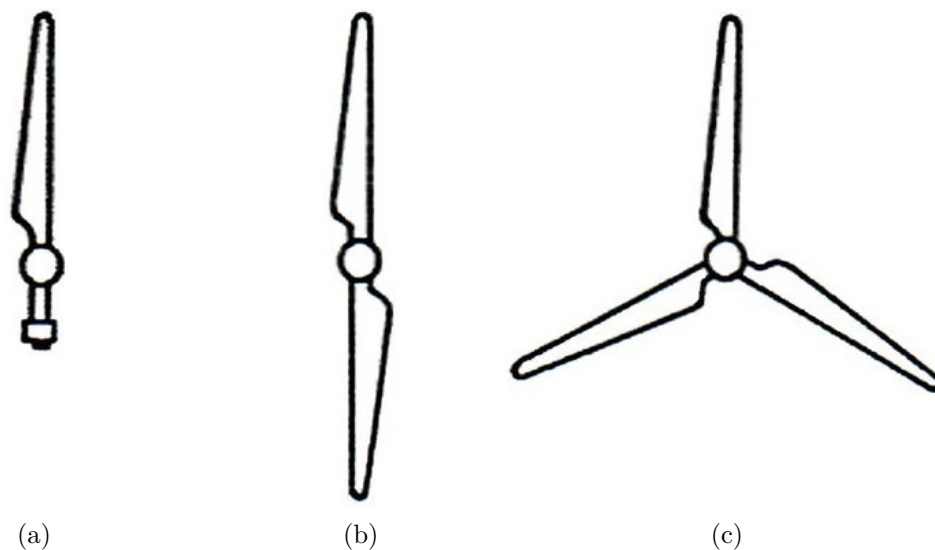


Obr. 1.20: Savoniův motor [1]

1.3.2 Vztlakové motory

Větší a modernější větrné motory vrtulového typu pracují na vztlakovém principu. Listy rotoru mají tvar aerodynamického křídla a jsou obtékány proudícím vzduchem. Při správném nastavení listu vzniká na jedné jeho straně podtlak a na druhé přetlak v důsledku různých rychlostí proudění vzduchu. Působením těchto tlaků vzniká vztlaková síla orientovaná kolmo vůči směru proudění vzduchu a otáčející celou vrtulí větrného motoru. Nejčastější je provedení vrtule se třemi listy, vyskytují se však

i provedení s jedním, dvěma, nebo čtyřmi listy [1]. Různá provedení rotorů jsou na obrázku 1.21.



Obr. 1.21: Vztlakové rotory: a) jednolisté, b) dvoulisté, c) třílisté provedení [1]

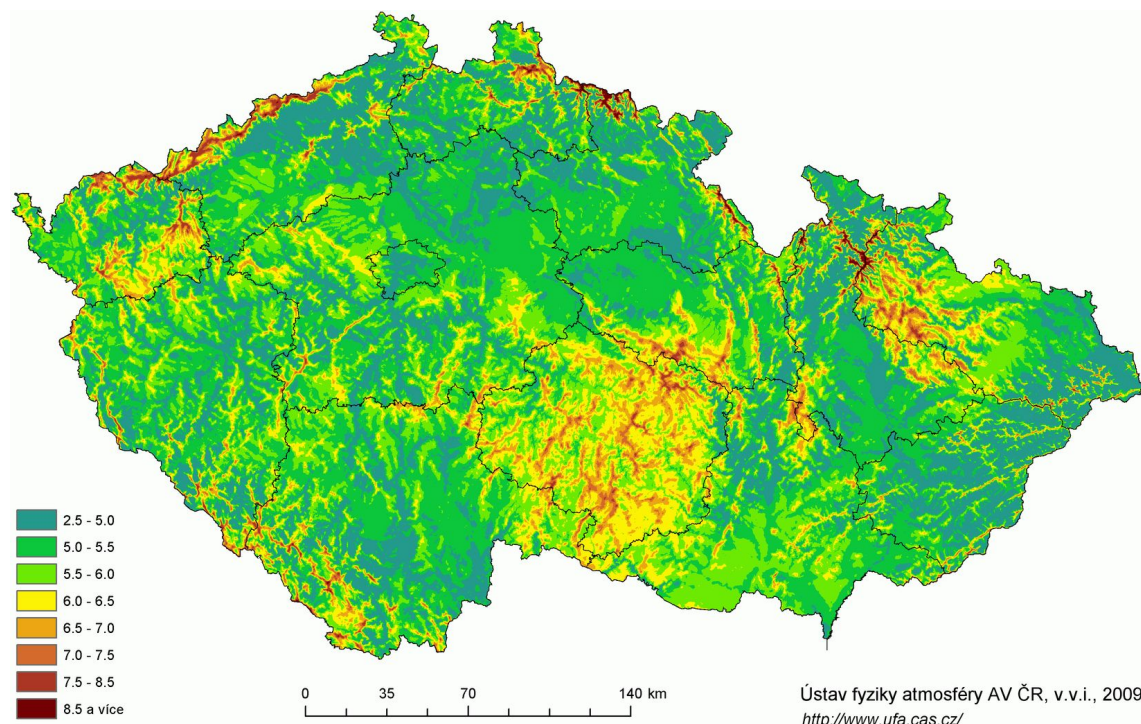
Výhodou vztlakového principu je nízká hmotnost a vyšší účinnost oproti odporovému principu. Nevýhodou je vyšší rozběhová rychlost, která se pohybuje kolem $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Tyto rotory jsou vhodné pro výrobu elektrické energie [1].

Lopatkám větrné turbíny odevzdává vítr jen část své energie. Teoreticky maximálně dosažitelnou účinnost větrné turbíny vypočítal německý fyzik Albert Betz na 59,26 %. Optimálního výkonu je dosaženo, když se rychlost vzduchu při průchodu turbínou sníží přibližně o třetinu. Pro stanovení výkonu reálného větrného motoru je třeba rovnici výkonu větru (1.13) vynásobit plochou rotoru o průměru D [m] a součinitelem výkonnosti cp [-], který udává, kolik energie z proudícího vzduchu se využívá. Jeho maximální hodnota může teoreticky podle Betzova pravidla dosahovat $cp = 0,59$ [1]. Reálná účinnost větrné elektrárny obvykle dosahuje přes 40 % a je ovlivněna konstrukčním řešením stroje, ztrátami na tření, nastavením úhlu lopatek a dalšími faktory. Výkon větrného motoru P_m [W] tedy bude:

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot cp \quad (1.14)$$

Minimální rychlost větru pro výrobu elektrické energie ve větrných elektrárnách je v rozmezí $3,0\text{--}5,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Jmenovitý výkon je obvykle dosahován při rychlostech větru $13\text{--}15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a při rychlostech převyšujících $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ jsou větrné elektrárny odstavovány, aby nedošlo k jejich poškození [1]. Na obrázku 1.22 je mapa, zobrazující průměrné rychlosti větru ve výšce 100 m nad povrchem na území ČR. Povětrnostní

podmínky na našem území nejsou tedy z hlediska využití pro výrobu elektrické energie příliš vhodné.

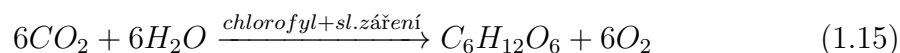


Obr. 1.22: Mapa průměrné rychlosti větru [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] v ČR ve výšce 100 m [23]

1.4 Další druhy energie

1.4.1 Biomasa

Biomasa je veškerá organická hmota na zemi, která vznikla z anorganických látek díky působení slunečního záření při reakci nazývané fotosyntéza. Při ní z oxidu uhličitého a vody vzniká glukóza a kyslík. Pro reakci je důležitá přítomnost zeleného barviva – chlorofylu, proto probíhá pouze u zelených rostlin. Tento způsob přijímání energie se nazývá autotrofní a je to primární způsob tvorby biomasy. Reakci fotosyntézy popisuje následující vzorec [17]:



Nezelené rostliny a živočichové musejí přijímat energii v potravě. Jde o příjem heterotrofní, který je sekundárním zdrojem tvorby biomasy.

Biomasu pro energetické účely lze rozdělit na:

- cíleně pěstovanou – obiloviny, olejnin, rychle rostoucí dřeviny;

- odpadní – rostlinné zbytky ze zemědělské výroby a údržby krajiny, odpady z živočišné výroby, organické komunální odpady, lesní odpad.

Další rozdělení je podle původu, a sice:

- rostlinná biomasa,
- živočišná biomasa.

Důležitým parametrem, který určuje kvalitu a využití biomasy je vlhkost. Biomasa se zpracovává mokrymi a suchými procesy, přičemž hranicí vhodnosti využití v těchto procesech je 50 % obsah sušiny. Procesů pro zpracování biomasy je celá řada. Dochází při nich buďto k přeměně biomasy na jiný druh paliva, nebo ji přímo mění na tepelnou energii. Možnosti zpracování jsou následující [1]:

- termochemická přeměna biomasy (suché procesy);
 - spalování,
 - zplyňování,
 - pyrolýza,
- biochemická přeměna biomasy (mokré procesy);
 - alkoholové kvašení,
 - metanové kvašení,
- fyzikální a chemická přeměna biomasy;
 - mechanicky (štípání, drcení, lisování, peletování),
 - chemicky (esterifikace surových bioolejů),
- získávání odpadního tepla při zpracování biomasy;
 - kompostování ,
 - aerobní čištění odpadních vod,
 - anaerobní fermentace pevných organických odpadů.

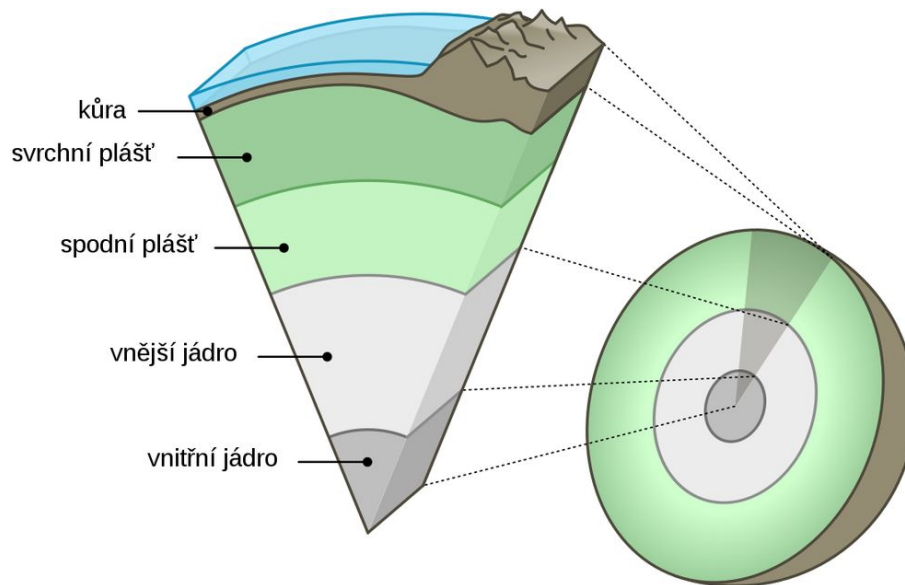
Nejvyšší účinnosti se dosahuje při využití biomasy pro produkci tepla – více než 90 %. Při použití v kogenerační výrobě, tedy kombinované výrobě elektřiny a tepla je dosahovaná účinnost 50–90 %, při čisté výrobě elektřiny je účinnost pod 50 % [24].

1.4.2 Geotermální energie

Geotermální energie je tepelnou energií zemského nitra. Tato energie pochází částečně z doby vzniku naší planety, částečně vzniká jadernými pochody v nitru země, pohyby litosférických desek a působením slapových sil [1].

Země se skládá ze zemské kůry, pláště a jádra, viz. obrázek 1.23. Zemské jádro se skládá z vnější tekuté a vnitřní pevné části a obsahuje převážně železo a nikl. Má dvakrát větší hustotu, než zemský plášť, a teplota uvnitř jádra dosahuje přes 6000 °C při tlaku až 400 GPa [25].

Využitelnost tepelné energie závisí na teplotě, tepelném gradientu, tepelném toku a tepelné vodivosti hornin. Průměrný výkon ze zemské kůry je $0,057 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, v oblastech se zvýšenou sopečnou činností až $300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Gradient teploty se zvyšuje



Obr. 1.23: Složení planety Země [25]

směrem k zemskému jádru o 20–30 °C na 1 km hloubky. Využití geotermální energie lze rozdělit do dvou oblastí, a sice využití nízkopotenciální energie (většinou pomocí tepelných čerpadel) a vysokopotenciální energie. Pro přeměnu na elektrickou energii je vhodná pouze druhá zmiňovaná možnost, kterou lze aplikovat následujícími způsoby [1]:

- metoda suchých par,
- metoda mokrých par,
- metoda Hot Dry Rock.

Metoda suchých par

Tato metoda je založena na přímém získávání páry z hlubin země pomocí vrtu. Pára se využívá k pohonu turbíny a zkondenzovaná voda se zavádí zpět, čímž se dosahuje lepší účinnosti celého cyklu. Problémy způsobují různé nekondenzovatelné plyny, které snižují výkon turbíny [1].

Metoda mokrých par

Z vrtu se čerpá voda o teplotě alespoň 160 °C, která na povrchu při nižším tlaku expanduje a následně je vyráběna pára. Ta se pomocí Rankin-Clausiova oběhu využívá k výrobě elektrická energie, případně může být získávána i tepelná energie [1].

Hot Dry Rock

Metoda využívá suché horniny nepropustné pro kapaliny. V nich jsou uměle vytvářeny praskliny, čímž vzniká prostor tepelného výměníku. Do tohoto prostoru je injektážním vrtem vháněna voda, která odebírá teplo okolní hornině. Následně je tato voda na povrchu buď přeměněna v páru nebo je její tepelná energie odebrána ve výměníku. Vrtky jsou hluboké 5–6 km, teplota dosahuje okolo 200 °C a tlak do 165 MPa. Nevýhodou je velký únik vody a značné namáhání podloží, které se projevuje jako mikro zemětřesení na povrchu [1].

1.5 Shrnutí

Jednoznačným kladem je u obnovitelných zdrojů jejich nevyčerpatelnost, k hlavním negativům patří horší dostupnost, nestálost dodávky energie a vyšší náklady na pořízení technologie. Charakteristické vlastnosti budou popsány v následujících odstavcích.

Sluneční energie

Fotovoltaika vhodná pro malé i velké zdroje energie, dobrá dostupnost zařízení, relativně nízké pořizovací náklady. Lze postavit téměř kdekoli, takže je vhodná i jako mobilní zdroj. Nevýhodou je relativně malá účinnost solárních panelů, která je podle typu přibližně 12–18 %, a v našich zeměpisných šířkách také nestálost dodávek energie. Pro velké zdroje značný zásah do rázu krajiny, malé zdroje lze snadno integrovat do budov a infrastruktury.

Teplo ze slunce je na tom podobně. Pro menší objekty snadno dostupné solární kolektory, pro větší energetiku výhodnější využití koncentračních systémů při dosažené účinnosti do 30 %.

Vodní energie

Energie vodních toků vhodná pro velkou energetiku, jinak obtížně dostupná. Velkou výhodou je zde stálost dodávky a vysoká účinnost vodních turbín přes 90 %. Nevýhodou je vazba na vodní tok, je tedy nemožné univerzální mobilní použití.

Energie z moře je také docela stálá, případně dobře predikovatelná (příboj, vlny, slapové jevy). Opět je zde vazba na konkrétní lokalitu, je tedy hůře dostupná. U nás pochopitelně nelze využít vůbec.

Obdobně to platí pro využití osmózy, která je kromě lokality u moře navíc omezena potřebou přítoku sladké vody, lze ji tedy aplikovat pouze u ústí řek. Značnou

nevýhodou je u osmózy prozatím velice malý výkon membrán, což snižuje celkovou účinnost systému na max 80 %.

K čerpání tepla uloženého ve vodě je potřebný velký rozdíl teplot na hladině a v hloubce, proto opět omezeno převážně k provozu na moři, případně u velkých vodních nádrží. Lze jej případně využít k provozu tepelného čerpadla, ovšem je zde stále problém s dostupností, pro mobilní zařízení je tedy nevhodné.

Větrná energie

Výrazně omezeno vhodnou lokalitou, lze však využít pro malé i velké zdroje energie. Pro velkou energetiku výhradně vztlakové motory z důvodu vyšší účinnosti kolem 40 %. U malých zdrojů snadná dostupnost technologie – využití odporových motorů s účinností okolo 20 %. Nevýhodou nestálost dodávek energie, u větších zdrojů zásah do rázu krajiny.

Biomasa

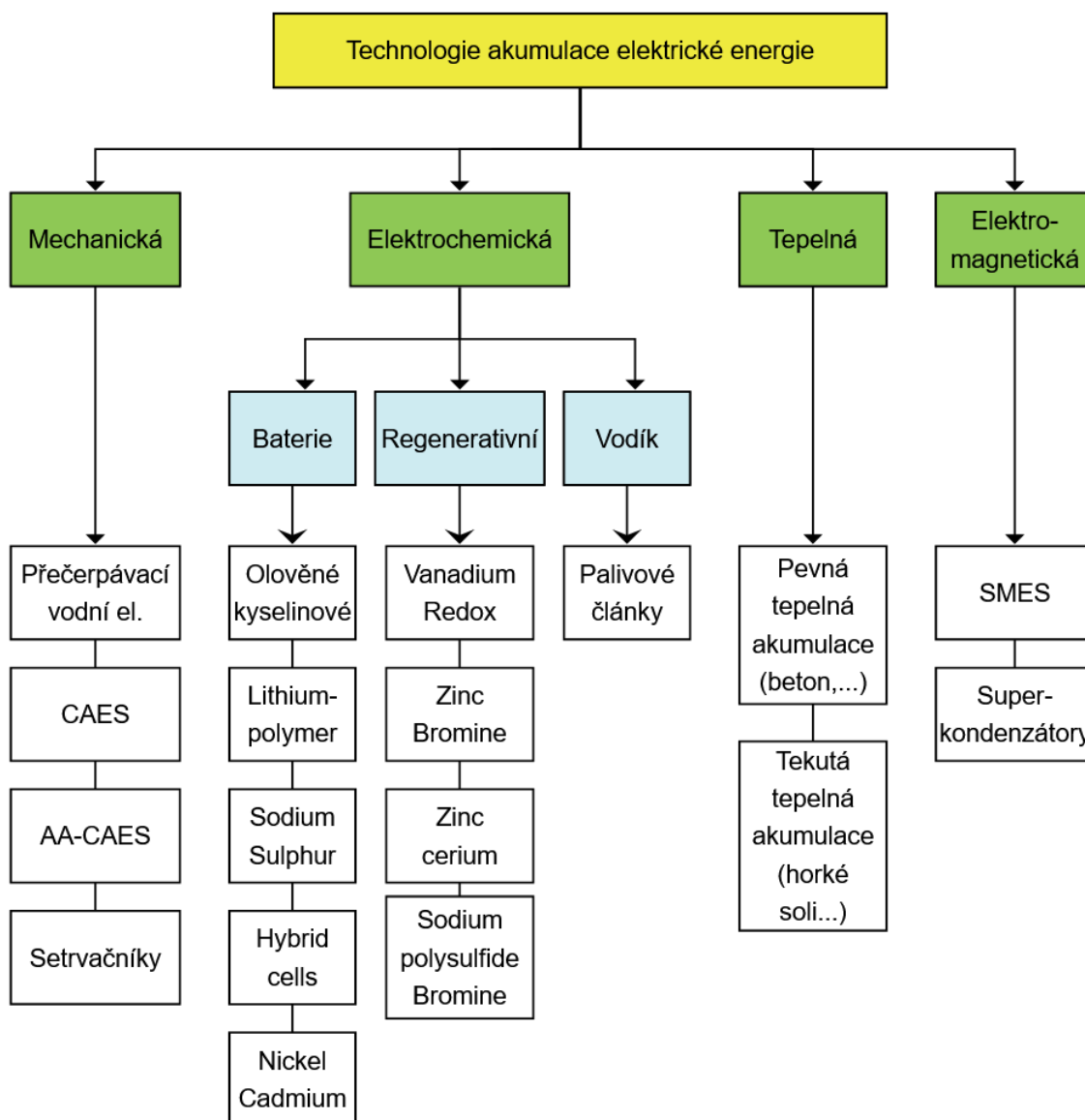
Vhodná zejména tam, kde vzniká větší množství biologického odpadu - zemědělství, dřevozpracující průmysl apod. Na rozdíl od ostatních zdrojů vyžaduje obsluhu, je zapotřebí přivážet zpracovávaný materiál. Nepříliš vhodné pro menší zdroje a také pro mobilní aplikace. Dosahovaná účinnost přibližně 50–90 %, podle způsobu využití.

Geotermální energie

Výhodou je opět stálost dodávky energie, naopak nevýhodou špatná dostupnost – silná vazba na vhodnou lokalitu. Pro mobilní použití zcela nevhodné. Dosahovaná účinnost 12–25 %.

2 Akumulace energie

Vzhledem k časově proměnlivému výkonu obnovitelných zdrojů energie a nestálosti dodávky energie z těchto zdrojů, je zapotřebí energii v době přebytku akumulovat, aby ji bylo možné v době nedostatku opět čerpat. Systémů pro akumulaci energie existuje celá řada. Liší se jednak fyzikálním principem uchování energie, ale také kapacitou, výkonem, počtem cyklů, účinností a v neposlední řadě také cenou. Principiálně jde vždy o přeměnu energie na jinou formu, ve které může být efektivněji uskladněna. Z hlediska fyzikálního lze rozdělit akumulací systémy dle diagramu na obr. 2.1 [1].



Obr. 2.1: Rozdělení akumuláčních soustav [1]

2.1 Elektrochemická akumulace

Elektrochemické akumulátory uchovávají energii ve formě chemické vazby. Na rozdíl od primárních elektrochemických článků je možné jejich opakované nabíjení a vybíjení. Při nabíjení se reakční produkty v akumulátoru převedou elektrickým proudem na původní reaktanty a dodávaná elektrická energie se tak přemění na energii chemickou. Při vybíjení se akumulovaná chemická energie opět mění na elektrickou energii, která je dodávána do obvodu.

Záporná elektroda je při vybíjení anodou, při nabíjení katodou. Při vybíjení zde dochází k oxidaci reaktantů a volné elektrony jsou předávány elektrodě. Kladná elektroda je při vybíjení katodou, při nabíjení anodou. Při vybíjení je zde redukován reaktant, při čemž přijímá volné elektrony z elektrody [26][27].

Sklon materiálu k příjmu, nebo odevzdání elektronů ve vztahu k jinému materiálu je označován jako jeho elektrodový potenciál. Materiály s kladným elektrodovým potenciálem se používají pro kladné elektrody, materiály se záporným elektrodovým potenciálem pro záporné elektrody. Čím větší je rozdíl mezi elektrodovým potenciálem anody a katody, tím větší je elektromotorické napětí článku, a tím větší je množství energie, kterou může článek produkovat.

Protože napětí jednotlivého článku je pro praktické použití nedostatečné, zapojují se pro dosažení vyššího napětí články do série. Sestava jednoho, nebo několika článků se nazývá baterie. Články je možné zapojovat také paralelně, zejména z důvodu dosažení vyšších vybíjecích proudů a také vyšší kapacity. Kapacita akumulátoru se udává obvykle jako náboj v ampérhodinách (množství náboje, které je akumulátor schopen pojmout), nebo jako akumulační energie ve watthodinách. Charakterizuje tedy schopnost daného uspořádání nahromadit v sobě elektrické náboje [1].

Dalším důležitým pojmem je energetická hustota. Udává množství energie vztažené na jednotku objemu [Wh/l], nebo hmotnosti [Wh/kg]. Akumulátory lze rozdělit podle použitého elektrochemického systému, přičemž majoritní zastoupení mají:

- akumulátory Pb,
- akumulátory Ni,
- akumulátory Li.

2.1.1 Akumulátory Pb

Olověné akumulátory lze podle způsobu používání dále rozdělit do tří kategorií. V každé z nich jsou kladeny jiné nároky na jejich vlastnosti a pracovní cyklus. Rozlišují se akumulátory:

- Startovací - označují se též jako SLI (Starting, Lighting, Ignition). Jsou navrženy tak, aby dokázaly krátkodobě dodávat vysoký proud, potřebný k nastartování motoru. Nemohou být hluboce cyklovány, po většinu času zůstávají ve stavu vysokého nabití. Díky mnoha tenkým elektrodám s pórovitou strukturou mají větší povrchové plochy a velmi nízký vnitřní odpor.
- Staniční - podobně jako startovací akumulátory jsou po většinu času udržovány v nabitém stavu. Používají se v aplikacích s nepřerušovaným napájením jako záloha při výpadku.
- Trakční - jsou konstruovány pro vysokou odolnost při opakovaném hlubokém vybíjení a nabíjení. Požadavkem je vysoká kapacita a velký počet nabíjecích cyklů.

Mezi nevýhody při použití olověných akumulátorů patří zejména velká hmotnost olova a s tím související nižší měrná energie. Mezi výhody patří nízká cena a dostupnost olova, dobrá spolehlivost, relativně vysoké jmenovité napětí a vysoká elektrochemická účinnost. Jejich životnost je v závislosti na typu a použití až několik tisíc cyklů.

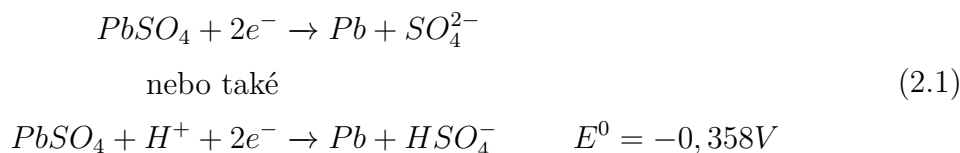
Zaplavené akumulátory

Původní konstrukce tzv. zaplaveného olověného akumulátoru sestává z nádoby s vodným roztokem kyseliny sírové, ve které je ponořena dvojice olověných elektrod. Nejběžnější design používá elektrody ve formě plochých desek, na které je nanášena pasta z oxidů olova a kyseliny sírové. Desky mají formu mřížky a slouží jako proudový kolektor. Mezi sebou jsou desky odděleny separátorem, který slouží k jejich elektrickému oddělení. Musí umožnit co nejlepší průchod iontů a zabránit průchodu částic aktivní hmoty. Používají se buďto ve tvaru listů, které přesahují ze všech stran okraje elektrod, nebo ve tvaru obálek, do kterých je zasunuta kladná elektroda. Další možností je použití kladné elektrody s aktivní hmotou uloženou v trubiciích, v centru s proudovým kolektorem. Tyto tzv. trubkové elektrody zabraňují opadávání aktivní hmoty během cyklování. Při ponoření dvou stejných olověných desek do zředěné kyseliny sírové, začnou probíhat následující děje [7][26]:

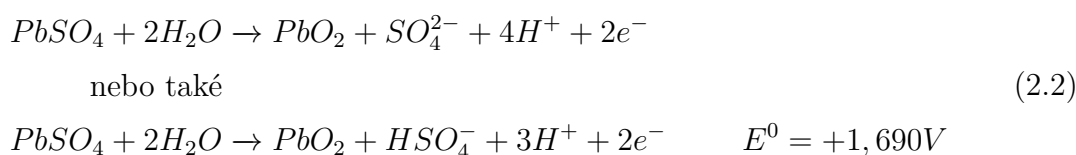
- ve vodném roztoku jsou disociovány mnohé molekuly kyseliny sírové H_2SO_4 na anionty SO_4^{2-} , HSO_4^- a kationty H^+ ,
- z olověných desek se uvolňují dvojmocné kationty olova Pb^{2+} a desky samotné tak získávají stejný záporný náboj,
- v blízkosti desek se kationty olova a anionty SO_4^{2-} slučují na síran olovnatý $PbSO_4$ a na obou deskách se vytvoří jeho vrstva.

Elektrické napětí mezi deskami je nulové, akumulátor je prozatím nenabitý. Na-

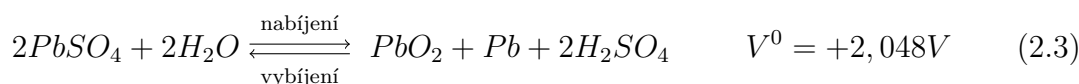
bití se provede připojením zdroje stejnosměrného napětí k oběma olověným deskám. V tomto okamžiku začne probíhat elektrolýza. Kationty H^+ se pohybují k desce připojené k zápornému pólu zdroje, zatímco anionty HSO_4^- a SO_4^{2-} ke kladnému pólu. Na záporné elektrodě začne probíhat reakce [7][26]:



a na kladné elektrodě:



Celková reakce v akumulátoru je:



Během nabíjení se v roztoku vytvářejí další molekuly kyseliny sírové a zvyšuje se hustota elektrolytu. Po nabití je záporná elektroda potažena vrstvou houbovitého olova, kladná elektroda vrstvou oxidu olovičitého. Napětí jednoho článku se pohybuje v rozmezí 2,0–2,1 V. Množství látek obsažených v elektrolytu a vyloučených na elektrodách zůstává nezměněno, ale vložená elektrická energie se přeměnila na energii chemickou [7].

Na konci nabíjení po přeměně většiny síranu výrazně vzroste napětí akumulátoru a na záporné elektrodě se začne vyvíjet vodík, na kladné elektrodě se uvolňuje malé množství kyslíku již v průběhu nabíjení. K získání plné kapacity je ale nutné dodat ještě další náboj, což je doprovázeno mohutným vývinem kyslíku a vodíku. Takové plynování je však pro akumulátor nepříznivé a výrazně snižuje jeho životnost. Plynování lze omezit například úpravou nabíjecího režimu, kdy se místo nabíjení konstantním proudem použije režim konstantního napětí s hodnotou blízkou plynovacímu napětí, což je cca 2,45 V na článek [7].

Akumulátory VRLA

Novější konstrukce olověných akumulátorů, tzv. VRLA (Valve Regulated Lead Acid) přinesla zlepšení vlastností díky vnitřnímu kyslíkovému cyklu. Tyto akumulátory jsou bezúdržbové, není tedy nutné kontrolovat u nich hladinu elektrolytu a dolévat vodu. VRLA akumulátory mohou být dvojího typu - AGM, nebo gelové. Kyslík, který se při nabíjení uvolňuje na kladné elektrodě, se dostává přes plynové póry

v separátoru k záporné elektrodě, kde je redukován na vodu. Kyslíkový cyklus, posouvá potenciál záporné elektrody k méně negativním hodnotám a tím pádem klesá rychlost vývoje vodíku. Pokud přebíjecí proud není příliš vysoký, nabíjecí a rekombinační reakce zůstávají v rovnováze a je uvolňováno jen zanedbatelné množství plynu. Případný přetlak v článku je vypuštěn ven přetlakovým ventilem.

Akumulátory AGM (Absorbent Glass Mat) používají mezi deskami elektrod separátor, tvořený ze skelných mikrovláken, ve kterých je nasáknut elektrolyt. V akumulátorech gelových je elektrolyt transformován do formy gelu. Jako gelatizační činidlo se používá oxid křemičitý SiO_2 , jehož částičky vytvářejí v elektrolytu trojrozměrnou síťovanou strukturu, díky tomu směs ztuhne a vytvoří pevný gel. Ve srovnání s AGM akumulátory mají gelové akumulátory vyšší vnitřní odpor.

Když je separátor ve VRLA článku zpočátku plně zaplaven elektrolytem, kyslíkový cyklus nemůže fungovat, protože transport kyslíku ve vodném roztoku je přibližně o čtyři řády pomalejší, než transport kyslíku ve volných prostorách separátoru nezaplavených elektrolytem. Článek se pak chová jako konvenční (zaplavený) typ. Na konci nabíjení jsou uvolňovány nejprve kyslík (na kladné) a poté vodík (na záporné elektrodě), a při přetlaku mohou být vypouštěny pomocí ventilu. Tato ztráta vody nakonec otvírá mezery (póry) díky vysychání gelu, nebo poklesu objemu elektrolytu v AGM separátoru, a umožní následně transfer kyslíku z kladné elektrody k záporné [7].

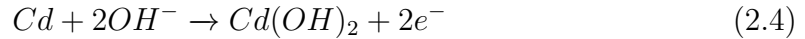
2.1.2 Akumulátory Ni

Do této skupiny patří akumulátory, které mají kladnou elektrodu na bázi niklu. K hlavním představitelům patří akumulátory nikl-kadmiové Ni-Cd a nikl-metal hydridové Ni-MH. Existují i akumulátory Ni-Fe a Ni-Zn, jejich zastoupení na trhu je však nepatrné. Napětí naprázdno plně nabitého Ni-Cd článku je přibližně 1,35 V. Článek se pokládá za vybitý, klesne-li napětí pod 1,0–1,1 V. Ke kladným vlastnostem Ni akumulátorů patří dlouhá skladovatelnost a životnost, možnost přebíjení, rychlého nabíjení a vybíjení, schopnost pracovat za nízkých teplot, robustní konstrukce a téměř konstantní vybíjecí napětí. Nevýhodou u Ni-Cd technologie je použití toxického kadmia, které je navíc špatně dostupné a tedy drahé, články navíc trpí tzv. paměťovým efektem, který způsobuje pokles kapacity. Počet nabíjecích cyklů může být více než tisíc [7].

Ni-Cd

Elektrody Ni-Cd akumulátoru sestávají z mřížky, na níž je nanesen aktivní materiál. Tím je u kladné elektrody oxihydroxid niklu NiOOH, zápornou elektrodu tvoří houbovitě kadmium. Elektrolytem je roztok hydroxidu draselného KOH. Při vybíjení

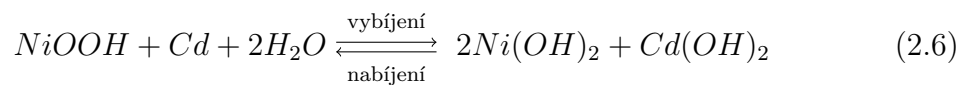
se oxihydroxid mění na hydroxid nikelnatý $Ni(OH)_2$ a kadmium se přeměňuje na hydroxid kademnatý $Cd(OH)_2$. Při nabíjení probíhá reakce opačně, přičemž se na kladné elektrodě vyvíjí kyslík a na záporné vodík. Na záporné elektrodě probíhá při vybíjení reakce [7][26]:



na kladné elektrodě probíhá reakce:

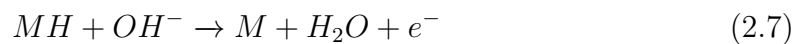


souhrnná rovnice má pak tvar:



Ni-MH

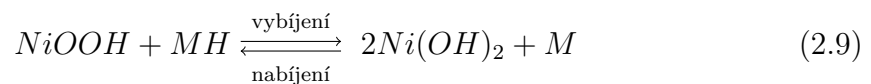
Princip \u010dinnosti Ni-MH akumul\u00e1tor\u016f je podobn\u00fd, jako u Ni-Cd, toxick\u00e9 kadmium je v\u0161ak nahrazeno slitinou kov\u016f, kter\u00e9 jsou schopn\u00e9 absorbovat vod\u00edk do sv\u00e9 krystalov\u00e9 m\u0159\u00ed\u017dky. Maj\u00ed mal\u00fd vnit\u0159n\u00ed odpor, co\u017e umo\u017e\u0148uje z nich odebr\u00e1t proud a\u017e n\u00e9kolika-n\u00e1sobku jejich kapacity. Aktivn\u00edm materi\u00e1lem kladn\u00e9 elektrody je op\u011bt NiOOH, materi\u00e1lem z\u00e1porn\u00e9 elektrody pak slitina kov\u016f, obsahuj\u00edc\u00ed nap\u0159. Pd, V, Ti, Zr, Ni, Cr, Co, Sn, Fe a dal\u0161\u00ed. Na z\u00e1porn\u00e9 elektrod\u011b p\u0159i vyb\u00edjen\u00ed prob\u00edh\u00e1 za \u00fa\u010dasti disociovan\u00fdch molekul vody reakce [7][26]:



na kladn\u00e9 elektrod\u011b prob\u00edh\u00e1 reakce:



souhrnn\u00e1 rovnice m\u00e1 pak tvar:

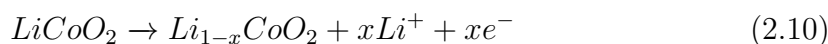


2.1.3 Akumul\u00e1tory Li

Akumul\u00e1tory na b\u00e1zi lithia pat\u0159\u00ed k v\u00fdvojov\u011b mlad\u0161\u00edm, komer\u010dn\u011b dostupn\u00e9 jsou od devades\u00e1t\u00fdch let 20. stolet\u00ed. Nejv\u00edce se roz\u0161\u00ed\u0159ily zejm\u00e9na typy Li-ion a Li-pol. Z dnes dostupn\u00fdch akumul\u00e1tor\u016f maj\u00ed největ\u0161\u00ed hustotu energie, a d\u00edky pou\u017eit\u00e9mu lithiu jsou velice lehk\u00e9.

Li-ion články tvoří dvě elektrody, iontově vodivý elektrolyt a separátor. Jako aktivní materiál pro zápornou elektrodu se obvykle používá grafit, pro kladnou elektrodu pak některý z fosfátů, nebo oxidů přechodových kovů ($LiCoO_2$, $LiMnO_2$, $LiMn_2O_4$, $LiNiO_2$). Uvedené látky musí být dostatečně porézní, musí dobře přijímat ionty lithia a opět je snadno uvolňovat. Aktivní materiál elektrod je nanášen na kolektorech, které tvoří měděná fólie pro zápornou a hliníková fólie pro kladnou elektrodu. Separátor je zpravidla vyroben z polypropylenu nebo polyethylenu a je naplněn kapalným elektrolytem s lithnou solí, např. $LiPF_6$, rozpuštěnou v organickém rozpouštědle. Separátor zabraňuje elektrickému kontaktu mezi elektrodami a současně musí umožnit průchod lithných iontů. Mechanické provedení je často ve formě válcových článků, kde jsou elektrody svinuty a vloženy do kovového pouzdra s tlakovou pojistkou. Nabitý článek má obvykle napětí naprázdno 3,6–3,7 V. Články Li-ion obsahují lithium pouze v podobě iontů, nikoliv v kovové formě a jsou tedy relativně bezpečné, mají malý vnitřní odpor a dlouhou životnost [7].

Pochody v článku při nabíjení a vybíjení spočívají pouze v transportu iontů lithia, nedochází zde k chemické reakci. Kapalným elektrolytem je pro lithiové ionty vodivý, a ty putují mezi elektrodami, kde se ukládají. Reakce při nabíjení je na kladné elektrodě [7][26]:



na záporné elektrodě:



přičemž hodnota x nabývá hodnot od 0 do 1. Při vybíjení probíhají reakce opačně.

Lithium-polymerové články mají elektrolyt v podobě polymerní sloučeniny. Polymerový elektrolyt je nehořlavý a tudíž bezpečnější, než kapalně elektrolyty. Mají vyšší počet nabíjecích cyklů a vyšší energetickou hustotu než Li-ion články. Zapouzdřeny jsou většinou v obalu z hliníkové fólie a mohou být i velmi tenké. Elektrody článku jsou pokládány na sebe, ne svinovány, a mohou mít nejrůznější tvar [28].

Dalším typem jsou články lithium-železo-fosfátové, označované $LiFePO_4$. Jejich jmenovité napětí je 3,2 V, proto mají nižší energetickou hustotu v porovnání s Li-ion. Výhodou je naopak vyšší proudová zatížitelnost a lepší odolnost proti hlubokému vybití, které však zkracuje životnost. Lze je s výhodou použít jako přímou náhradu olověných akumulátorů, protože čtyřčláneková sada má podobné napětí jako 12V Pb akumulátor [28].

2.1.4 Palivové články

Palivové články konvertují chemickou energii paliva a oxidovačla přímo na elektrický proud. Aktivní materiály se přivádějí na elektrody, kde reagují. Elektrody se však

neúčastní chemické reakce, díky tomu mohou být články v provozu teoreticky neomezenou dobu, prakticky je jejich životnost omezena životností elektrod. Reakce palivového článku na změnu zátěže je velmi pomalá, článek není schopen dostatečně rychlé odezvy. Pro praktické uplatnění se proto paralelně k článku řadí kondenzátory, nebo akumulátory. Článků existuje vícero typů, lze je rozdělit podle několika kritérií [7]:

- podle složení a skupenství reagujících materiálů;
 - s plynným palivem a plynným oxidovadlem ($H_2 + O_2$, $H_2 + Cl_2$, $CO + O_2$),
 - s kapalným palivem a plynným oxidovadlem ($CH_3OH + O_2$, $N_2H_2 + O_2$),
 - s kapalným palivem a kapalným oxidovadlem ($CH_3OH + H_2O_2$),
 - s pevným palivem a plynným oxidovadlem ($Zn + O_2$, $C + O_2$),
 - s pevným palivem a kapalným oxidovadlem ($Zn + CrO_3$),
 - s pevným palivem a pevným oxidovadlem ($Zn + MnO_2$),
- podle složení a skupenství elektrolytu;
 - s vodným roztokem kyseliny (H_2SO_4 , H_3PO_4),
 - s vodným roztokem hydroxidu (KOH , $NaOH$),
 - roztaveným alkalickým elektrolytem ($K_2CO_3 + LiCO_3 + Na_2CO_3$),
 - s kyselým elektrolytem v pevné fázi (iontoměničové membrány),
 - s alkalickým elektrolytem v pevné fázi ($ZrO_2 + Y_2O_3$),
- podle pracovní teploty;
 - nízkoteplotní (do 200 °C),
 - středněteplotní (200–600 °C),
 - vysokoteplotní (více než 600 °C),
- podle pracovního tlaku;
 - nízkotlaké (do 0,5 MPa),
 - střednětlaké (0,5–1 MPa),
 - vysokotlaké (více než 1 MPa).

Funkce elektrod je v elektrochemické reakci pouze katalytická. Katalyzátor je látka, která může reakci vyvolat, měnit její rychlost a vést ji určitou cestou, ale není třeba ho uvádět ve výsledné formulaci chemické přeměny. Nejprve reaguje jedna z přítomných látek s katalyzátorem za vzniku labilního meziprojektu. Ten pak reaguje s další výchozí látkou za vzniku výsledného produktu a regenerace katalyzátoru. U palivových článků dochází k heterogenní katalýze, což znamená, že reagující látky jsou v jiné fázi než katalyzátor. Na elektrodách dochází ke kontaktu všech tří fází – plynného paliva či okysličovadla, kapalného elektrolytu a katalyzátoru v pevné fázi. Elektroda musí mít porézní strukturu, aby umožnila takovýto kontakt. Část pórů je vyplněna elektrolytem, část plynem, a reakce probíhají v místech, kde se setkávají všechny tři fáze. Existuje 6 typů palivových článků, jejich vlastnosti shrnuje tabulka 2.1 [7].

Tab. 2.1: Typy palivových článků [7]

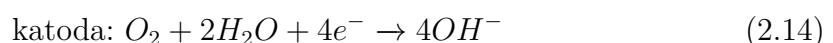
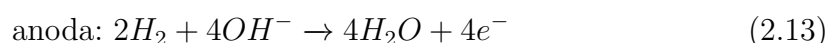
Typ	Pracovní teplota	Elektrolyt	Palivo	Účinnost
AFC	do 90 °C	KOH	Čistý vodík	60 %
PEFC	do 100 °C	Polymerní membrána	Vodík, methanol	40 %
DMFC	120-150 °C	Polymerní membrána	Methanol	40 %
PAFC	130-220 °C	Koncentrovaná kyselina fosforečná	Vodík, zemní plyn	40 %
MCFC	600-800 °C	Roztavené Li/K uličitany	Vodík, zemní plyn	55 %
SOFC	700-1000 °C	Tuhé keramické oxidy	Vodík, zemní plyn	55 %

Nejčastěji používaným palivem je čistý vodík, který může v palivovém článku přímo reagovat za vývoje elektrického proudu. Vodík však není vhodným palivem pro všechny aplikace palivových článků, proto jsou používána i tzv. nepřímá paliva, ze kterých je vodík uvolňován reformovacím procesem. Mezi hlavní nepřímé zdroje vodíku patří zemní plyn, methan, methanol, ethanol, případně čpavek. Tyto se reformují vodní parou nebo tzv. parciální oxidací při vysokých teplotách, přičemž vzniká vodík s oxidy uhlíku. Ve většině palivových článků jsou používány katalyzátory na bázi platiny, je proto zapotřebí po reformaci odstranit CO , který způsobuje otravu těchto katalyzátorů [29].

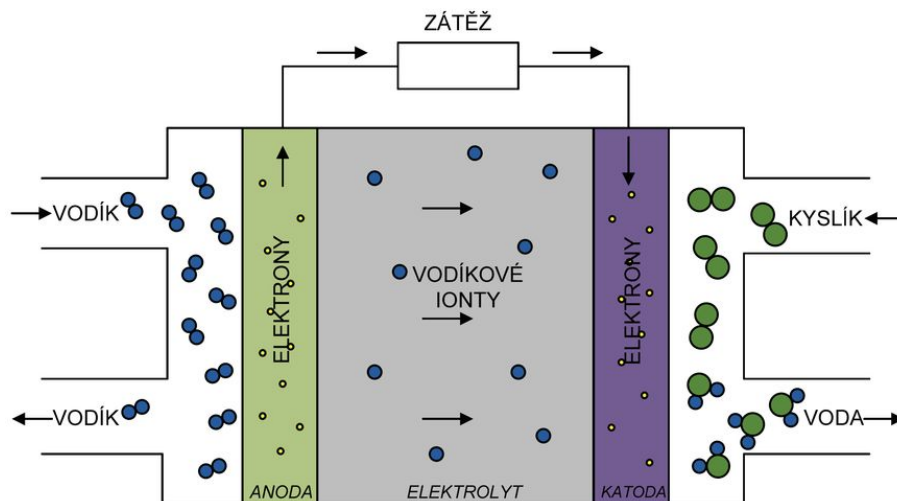
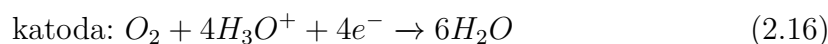
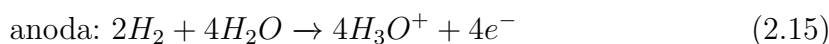
Základní princip transformace energie je pro všechny palivové články stejný, jednotlivé typy se však liší materiálem elektrod, použitým elektrolytem a pracovní teplotou i konkrétními chemickými reakcemi na anodě a katodě. Princip funkce palivového článku (obr. 2.2) je děj inverzní k elektrolýze. Vysvětlen bude na článku kyslíko-vodíkovém, kde se jako palivo a okysličovadlo uvažuje čistý vodík a kyslík. V místě třífázového rozhraní dochází k elektrochemické oxidaci paliva a redukci okysličovadla. Souhrnná reakce má tvar [7][30][31]:



Dílní reakce závisí na pH elektrolytu. Pro alkalický elektrolyt je to:



Pro kyselý elektrolyt platí:



Obr. 2.2: Princip činnosti palivového článku [1]

AFC - Alkalické palivové články

Tyto články byly vyvíjeny od 50. let, zejména v programu Apollo. Využívají alkalického elektrolytu, především 30% roztok hydroxidu draselného KOH , možnost využití i $NaOH$. Mají vysokou energetickou hustotu a nejvyšší účinnost mezi palivovými články, ale vyžadují čistý vodík a kyslík. Vzdušný CO_2 totiž reaguje s elektrolytem za vzniku K_2CO_3 , což způsobuje otravu článku. Při provozu je vedlejším produktem voda, kterou je možné recyklovat, díky čemuž našly velké uplatnění v kosmických programech. Jsou to nízkoteplotní články, proto musí být povrch elektrod pokrytý silnou vrstvou platiny, která slouží jako katalyzátor a je důvodem vysoké ceny článků [7][10].

PEFC - Články s tuhými polymery

Jedná se o nízkoteplotní články, u nichž nahrazuje funkci elektrolytu kyselá membrána. Ta zároveň slouží jako nosič katalyzátoru, kterým je zde opět platina. Vyžadují čistý vodík, ale kyslík je možné čerpat ze vzduchu. Pro článek je nebezpečný oxid uhelnatý, který je absorbován platinou a ta se stává povrchově neaktivní. Z toho důvodu se někdy přidává ruthenium [10].

DMFC - Methanolové články

Jedná se vlastně o vylepšenou verzi PEFC. Tyto články jsou také vybaveny membránou ze syntetického materiálu na místě elektrolytu. Jako palivo používají kapalný, nebo plynný methanol, který je používán jako přímé palivo bez potřeby reformování. Nevýhodou těchto článků je komplikovanější a pomalejší anodová oxidace metanolu v porovnání s vodíkem. Jako katalyzátor anody se užívá platina, příp. ruthenium, které zabraňuje otravě CO . Velkou výhodou je použití methanolu namísto vodíku, zejména s ohledem na jeho skladování a přepravu [10][30].

PAFC - Články s kyselinou fosforečnou

Jako elektrolyt zde slouží koncentrovaná bezvodá kyselina fosforečná H_3PO_4 , která je nasáklá v porézním materiálu. Díky kyselině nemusí být použitý vodík ve vysoké čistotě a rovněž kyslík lze použít ze vzduchu. Pro elektrody je použit uhlíkatý materiál vázaný pojivem z plastu, obohacený o částičky platiny, nebo zlata. Palivem je vodík, vyráběný v předřazených konvertorech z uhlíkatých paliv. Pro články je opět otravou CO , ale ne tolik jako u PEFC [7][10].

MCFC - Články s roztavenými uhličitany

Jsou to vysokoteplotní články, pracující s teplotou kolem $600\text{ }^\circ\text{C}$. Vysoká teplota je nutná k dosažení potřebné vodivosti elektrolytu, kterým jsou roztavené uhličitany draslíku (K_2CO_3) a lithia (Li_2CO_3). Elektrody jsou vyrobeny z niklu a nevyžadují použití katalyzátoru z ušlechtilých kovů. Otravou pro tyto články je síra [7][10].

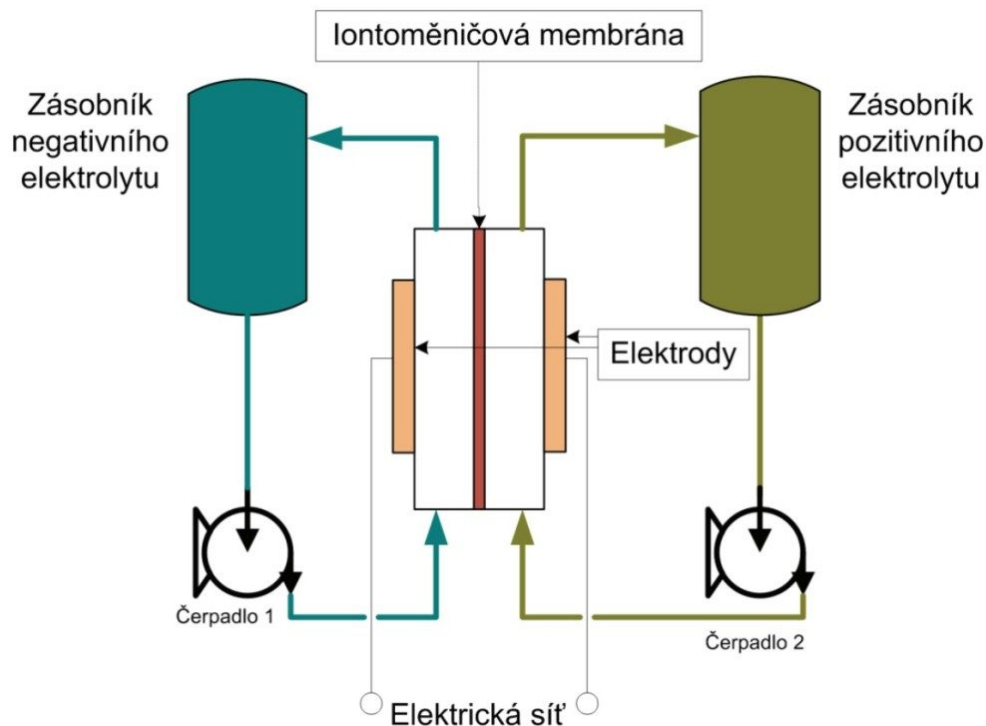
SOFC - Články s tuhými oxidy

Pracují při velmi vysoké teplotě, až kolem $1100\text{ }^\circ\text{C}$. Při takto vysoké teplotě dochází k vnitřnímu rozkladu CH_4 na CO_2 a vodík bez nutnosti samostatné jednotky pro separaci vodíku. Elektrolyty se používají keramické, např. tuhá směs oxidů yttria (Y_2O_3) a zirkonu (ZrO_2). Elektrody jsou ze speciálně upravených slitin některých kovů a jejich oxidů, např. niklu a chromu [7][10].

2.1.5 Průtokové baterie

Průtokové baterie se principiálně podobají klasickým elektrochemickým akumulátorům. Jsou tvořeny kladnou a zápornou elektrodou a elektrolytem. Rozdíl je ve způsobu uchovávání energie, která je u konvenčních baterií uvnitř článku, zatímco průtokové baterie uchovávají chemickou energii v elektrolytech umístěných ve dvou vnějších nádržích. Elektrolyty jsou pomocí čerpadel dopravovány do článku, který obsahuje iontoměničovou membránu, jež zabraňuje smísení elektrolytů. Současně na

ní dochází k chemickým reakcím, při kterých je jeden z elektrolytů oxidován a druhý redukován. Elektrody se neúčastní chemické reakce a slouží pouze jako proudový sběrač. Princip zachycuje obr. 2.3. Napětí článku se v závislosti na druhu elektrolytu pohybuje od 1,4 V do 1,8 V a účinnost dosahuje až 85 %. Akumulační kapacita závisí na množství elektrolytu, který lze i průběžně vyměňovat. Tyto baterie mají velmi malé samovybíjení, vydrží dlouho vybité a snesou velký počet nabíjecích a vybíjecích cyklů, aniž by došlo k degradaci, či významnému snížení kapacity [1].



Obr. 2.3: Princip průtokové baterie [1]

2.2 Mechanická akumulace

2.2.1 Setrvačníky

Setrvačníky ukládají energii ve formě kinetické energie otáčející se hmoty rotoru. Při nabíjení se aplikuje kroutící moment ve směru rotace, tím se setrvačnická rychlost urychlí a zvýší se jeho kinetická energie. Při vybíjení se aplikuje brzdící kroutící moment, čímž se zmenší rychlost setrvačnická a odebraná energie koná užitečnou práci.

Kinetická energie E_k [J] je úměrná momentu setrvačnosti J [kg · m²] a druhé mocnině úhlové rychlosti ω [rad · s⁻¹] podle vztahu [1]:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (2.17)$$

Moment setrvačnosti závisí na tvaru rotujícího objektu. Pro pevný disk je to:

$$J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 \quad (2.18)$$

a pro tenkostěnný dutý válec:

$$J = m \cdot r^2 \quad (2.19)$$

kde m [kg] je jeho hmotnost a r [m] jeho poloměr. Z toho vyplývá, že rozložení hmotnosti blížící se tvaru dutého válce je pro setrvačnický výhodnější, protože moment setrvačnosti je zde dvojnásobný. Setrvačnický se ukládají do pouzder, která jsou vakuována pro minimalizaci ztrát třením o vzduch, pro snížení ztrát v ložiscích se používají ložiska magnetická. Setrvačnický se vyznačují vysokým výkonem, dlouhou životností a velmi krátkou dobou náběhu [1].

2.2.2 Přečerpávací elektrárny

Přečerpávací elektrárna slouží k akumulaci energie v podobě potenciální energie vody. Je to soustava dvou nádrží, které jsou umístěny v rozdílných výškách a propojeny tlakovým potrubím. V dolní části je umístěna Francisova turbína, která může plnit i funkci čerpadla, viz. kapitola 1.2.1. V době přebytku elektrické energie je voda čerpána do horní nádrže a zvyšuje tak svou potenciální energii, v době potřeby je voda přivedena potrubím zpět k turbíně, která pohání generátor. Jedná se o nejčastější metodu akumulace velkého množství elektrické energie na delší dobu [2].

2.2.3 Stlačený vzduch

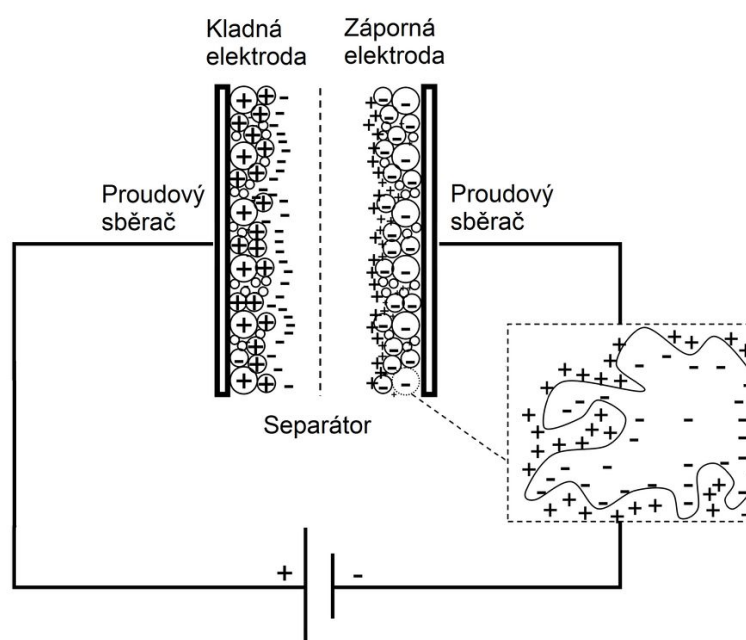
Systém CAES (Compressed Air Energy Storage) slouží k ukládání energie do stlačeného vzduchu, přičemž se elektrická energie mění na tlakovou potenciální energii. Vzduch se za pomoci kompresoru stlačuje do rezervoáru, což s ohledem na potřebný objem bývají nejčastěji dutiny pod povrchem země, např. přírodní podzemní jeskyně či důlní kaverny. K akumulaci stlačeného vzduchu lze využít rovněž vaky umístěné pod hladinou moře. Při potřebě energie se stlačený vzduch vhání do turbíny propojené s generátorem. Účinnost CAES systémů je snížena kvůli tepelným ztrátám. Při stlačení teplého vzduchu dojde k jeho ochlazení, čímž ztratí přibližně třetinu energie. Proto se začal využívat tzv. adiabatický způsob ukládání – AA-CAES. Při tomto způsobu se teplo stlačeného vzduchu odebere a dočasně uchová v zásobníku tepla, následně se opět použije k ohřátí vzduchu na teplotu potřebnou pro turbínu.

2.3 Elektromagnetická akumulace

2.3.1 Superkondenzátory

Superkondenzátor je kondenzátor s hodnotou kapacity dosahující o několik řádů výše, než u běžných kondenzátorů. Toho je dosaženo výrazným zvětšením plochy elektrod a zároveň zmenšením jejich vzdálenosti. Cenou za menší vzdálenost elektrod je ovšem menší maximální provozní napětí superkondenzátorů, které v praxi bývá okolo 2–3 V. Skládají ze dvou elektrod pokrytých vrstvou uhlíku, z elektrolytu a separátoru. Náboj uchovávají v elektrostatickém poli, podobně jako u běžného kondenzátoru [32].

Použitý elektrolyt může být buďto organický, nebo na bázi vody. Pro dosažení co největšího povrchu elektrod se používá uhlík, a to buď ve formě aktivního uhlíku, nanotrubiček, nebo aerogelu. V nenabitém stavu jsou ionty rovnoměrně rozloženy v elektrolytu, který je mezi elektrodami. Po přiložení napětí na elektrody se začnou záporné ionty pohybovat ke kladné elektrodě a kladné ionty k záporné elektrodě. Mezi elektrodou a elektrolytem však nedochází k přenosu náboje, který by způsobil rekombinaci, a tak na každé z elektrod vznikne dvojvrstva náboje, která sestává ze dvou opačně nabitých vrstev [32]. Struktura takového kondenzátoru je na obr. 2.4.



Obr. 2.4: Struktura superkondenzátoru [32]

Protože nedochází k přenosu náboje mezi elektrolytem a elektrodou, nedochází zde ani k žádné chemické reakci a tedy ani k chemickým změnám materiálu. Díky

tomu mají tyto kondenzátory dlouhou životnost a stálé nabíjecí a vybíjecí charakteristiky. Mezi jejich největší přednosti patří kromě velké kapacity také rychlost, jakou je možné je nabíjet a velká životnost. Počet nabíjecích cyklů je téměř neomezený. Oproti akumulátorům u nich není problém s hlubokým vybitím, ani přebíjením. Z napětí na kondenzátoru a známé kapacity lze snadno vypočítat, kolik energie v něm ještě zbývá. Mají také široký rozsah pracovních teplot. Mezi největší nedostatky patří malá hodnota provozního napětí. Dále sem lze zahrnout stále ještě menší hustotu energie na jednotku hmotnosti a vyšší cenu [32].

2.3.2 Supravodivé cívky

Metoda SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) využívá supravodivých cívek, kde je energie uložena ve formě magnetického pole vytvořeného cívkou, kterou protéká stejnosměrný proud. Supravodivost je dosažena silným schlazením vodiče na teplotu, kdy materiál vykazuje téměř nulový odpor, což umožňuje dlouhodobý průchod proudu při nepatrných ztrátách energie. K dosažení takto nízkých teplot bývá cívka chlazena kapalným heliem, nebo dusíkem. Výhodou tohoto způsobu akumulace je vysoká účinnost, která dosahuje až 95 %, dále pak velmi krátké časy nabíjení a vybíjení, a velký výkon, nevýhodou je nutnost použití kryogenní techniky pro dosažení supravodivosti [33].

2.4 Shrnutí

Akumulace energie je nezbytná s ohledem na nestálost dodávky z obnovitelných zdrojů. K akumulaci elektrické energie se používá její přeměna na jiný druh energie. V následujících odstavcích jsou shrnuty vlastnosti jednotlivých druhů akumulace.

Elektrochemická akumulace

Energie uložena ve formě chemické vazby buďto uvnitř (akumulátory Pb, Ni, Li), nebo vně (palivové články a průtokové baterie).

- Pb akumulátory - relativně levné a spolehlivé, vysoká účinnost konverze energie (až 90 %). Životnost stovky, až tisíce cyklů v závislosti na typu a způsobu použití. Nelze je dlouhodobě skladovat (nutné dobíjení), kvůli použitému olovu mají vyšší hmotnost. Při přebíjení dochází k vývinu plynů. Problematický provoz za nízkých teplot.
- Ni akumulátory - dlouhá skladovatelnost, bez problému pracují i za nízkých teplot, možnost přebíjení, více než tisíc nabíjecích cyklů. U Ni-Cd toxické kadmium a paměťový efekt. Energetická účinnost až 85 %.

- Li akumulátory - nejvyšší hustota energie a nízká hmotnost, až 3000 nabíjecích cyklů. Problematické při hlubokém vybití i při přebíjení - nutné balancování napětí. Energetická účinnost až 99 %.
- Palivové články - pomalá odezva na změny zátěže, nutné relativně čisté palivo (otrava článku CO, CO₂, S - podle typu). Rychlé doplnění paliva za provozu - není nutno čekat na dobití. Účinnost dle typu 40–60 %.
- Průtokové baterie - velký počet cyklů (>15 000), malé samovybití, vydrží dlouho vybité. Energetická účinnost až 80 %.

Mechanická akumulace

K uložení elektrické energie se využívá její převod na mechanickou energii kinetickou, nebo potenciální.

- Setrvačníky - energie uložena ve formě kinetické energie rotoru. Vysoký výkon a rychlý náběh, ale malá kapacita - vhodné k vykrývání špiček. Účinnost přes 90 %.
- Přečerpávací elektrárny - energii ukládají v podobě potenciální energie vody. Ideální k akumulaci velkého množství energie na delší dobu, vhodné zejména pro velkou energetiku. Účinnost okolo 80 %.
- Stlačený vzduch - energie uložena ve formě tlakové potenciální energie. Účinnost 60–75 %.

Elektromagnetická akumulace

- Supravodivé cívky - energie uložena ve formě magnetického pole. Vysoká účinnost (až 95 %), krátké časy nabíjení a vybíjení, a velký výkon. Nutná kryogenní technika pro chlazení.
- Superkondenzátory - uchování náboje v elektrostatickém poli. Malé provozní napětí, nutnost balancování. Rychlé nabíjení a vybíjení, počet nabíjecích cyklů v řádu 10⁶, účinnost > 90 %.

3 Praktická část

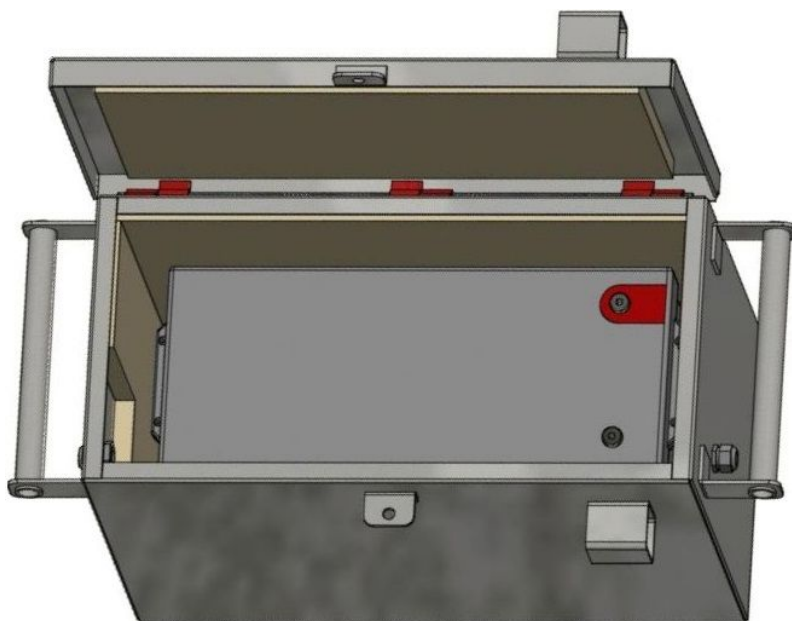
Zásobovací místo má sloužit primárně pro použití k napájení dopravní světelné signalizace a mobilních proměnných dopravních značek pro liniové řízení dopravy. Současně by mělo umožnit krátkodobé připojení dalších zařízení, jako například elektrického ručního náradí, s příkonem nejvýše několik stovek wattů.

3.1 Současný stav

Mobilní liniové řízení dopravy se používá na dopravních uzávěrách v rámci oprav pozemních komunikací, převážně na dálničních tazích. Slouží ke zvýšení plynulosti dopravy při omezeních nutných pro provádění oprav.

Pro informování řidičů jsou zde používány proměnné dopravní značky (PDZ) s LED zobrazovací maticí o rozměru přibližně $1\text{ m} \times 1\text{ m}$, na kterých jsou dle aktuální potřeby zobrazovány dopravní značky a informační texty. Každé řízené omezení se skládá z několika řezů, vzdálených od sebe přibližně jeden kilometr, ve kterých jsou PDZ umístěny po obou stranách komunikace. Na dálnicích je v rámci jednoho omezení použito obvykle 8–10 ks PDZ.

Vzhledem k nedostupnosti síťového napájení jsou PDZ napájeny z olověných akumulátorů s napětím 12 V DC. Použité akumulátory jsou v provedení VRLA a jejich kapacita je většinou 200 Ah, přičemž pro každou PDZ jsou použity 1–2 ks těchto akumulátorů [34]. Každý akumulátor je umístěn v oceloplechové skříni opatřené průchodkami pro přívodní kabely. Provedení skříně ilustruje obr. 3.1.



Obr. 3.1: Stávající skříň akumulátoru

Příkon značky je závislý na konkrétním zobrazovaném symbolu, a kvůli použité automatické regulaci jasu také na úrovni okolního osvětlení, přičemž obvykle se pohybuje v rozmezí cca 10–100 W. Z toho vyplývá, že k úplnému vybití jednoho akumulátoru dojde v rozmezí 1–10 dní, přičemž reálně je to maximálně 2–3 dny, protože značka svítí velkou část dne maximálním jasem.

Před vybitím akumulátoru je zapotřebí servisní zásah, při kterém se na místo dopraví nabitý akumulátor, provede se výměna a vybitý kus se odveze za účelem opětovného nabití. Hloubka vybíjení ovlivňuje životnost akumulátorů [34], proto se jejich výměna v praxi realizuje před úplným vybitím, což ještě zvyšuje frekvenci nutných výjezdů. Reálně dosahuje hloubka vybíjení hodnoty přibližně 80 %, takže akumulátory zvládnou maximálně několik stovek nabíjecích cyklů. Poté dochází k poklesu jejich kapacity a tím také doby, po kterou jsou schopny připojené zařízení napájet, což má za následek další zvýšení frekvence servisních výjezdů.

Z ekonomických důvodů jsou při výjezdu vždy měněny akumulátory u všech značek, bez ohledu na aktuální stav nabití. Vzhledem k relativně velkým dojezdovým vzdálenostem, které činí mnohdy přes 100 km, je provoz zařízení finančně velice nákladný, a pro zákazníka je pronájem takového zařízení citelným zásahem do rozpočtu.

Dalším problémem je samotná konstrukce akumulátorových skříní, do kterých je kabeláž zaústěna přes kabelové průchodky a připojena napevno k akumulátorům. Samotná výměna akumulátoru se tak výrazně podepisuje na potřebném času a zvyšuje náklady na provoz zařízení.

Problémem je také celá agenda s nabíjením akumulátorů, a s jejich neustálým transportem do místa potřeby a zpět. K zabezpečení nepřetržitého provozu značek jsou zapotřebí dvě sady akumulátorů, z nichž jedna je vždy v provozu a druhá je nabíjena.

V neposlední řadě je zapotřebí zmínit také ekologické aspekty provozu zařízení ve stávajícím režimu. Vzniká při něm poměrně velké množství opotřebovaných akumulátorů, které již nestačí svou kapacitou k rozumně ekonomickému provozu značek, nejsou však ještě zcela nefunkční. Ačkoli je recyklace olovených akumulátorů v dnešní době již velice dobře zvládnuta, vzniká nutně určitá část nerecyklovatelných zbytků. Další ekologické dopady plynou z provozu vozidel, která jsou využívána k zabezpečení logistiky výměny akumulátorů.

Provoz zařízení ve stávajícím režimu je po ekonomické i ekologické stránce dlouhodobě neúnosný a je zapotřebí začít situaci řešit. Pro optimální návrh je nutné znát reálnou spotřebu značek. Bez této informace není možné vhodně dimenzovat alternativní způsob napájení a optimalizovat náklady na pořízení a provoz. V rámci práce bylo provedeno dlouhodobé měření spotřeby značek, včetně časového rozložení spotřeby. Vyhodnocení měření je provedeno v kapitole 4.1.1.

3.2 Navržené řešení

Pro omezení servisních zásahů na nezbytně nutnou míru se přímo nabízí využití obnovitelných zdrojů energie. S ohledem na oblast použití se jeví jako jediná možnost využití slunečního záření a jeho přímá konverze na elektrickou energii pomocí fotovoltaických panelů. Pro návrh byly stanoveny následující požadavky:

- mobilní zařízení, snadno převozitelné,
- instalace bez speciálních terénních úprav,
- lehká, ale stabilní konstrukce, která odolá povětrnostním vlivům a dynamickým rázům tlaku vzduchu od projíždějících vozidel,
- rozměrově musí umožnit instalaci mezi svodidla ve středovém pásu na dálnici,
- maximální využitelnost stávající technologie.

Akumulátory budou použity stávající olovené, použité konstrukce budou mít povrchovou úpravu žárovým zinkem, případně nátěr barvou RAL 7042 – dopravní šedá [35].

3.2.1 Potřebný příkon

Jak už bylo zmíněno, kolísá proudový odběr značky v závislosti na okolních podmínkách a na typu zobrazovaného symbolu, proto je přesný výpočet spotřeby prakticky nemožný. Dlouhodobé zkušenosti z provozu však ukazují, že se průměrná denní spotřeba pohybuje okolo 1 kWh. Aktuálně není cílem zajistit zcela autonomní provoz pouze s využitím slunečního záření. Kvůli zachování rozumně malé zastavěné plochy byly pro prvotní testování použity pouze dva monokrystalické panely, každý o výkonu 325 Wp. Výsledky provedených měření následně ukázaly, že je výkon panelů dostatečný, viz. kapitola 4.1.1.

3.2.2 Záložní napájení

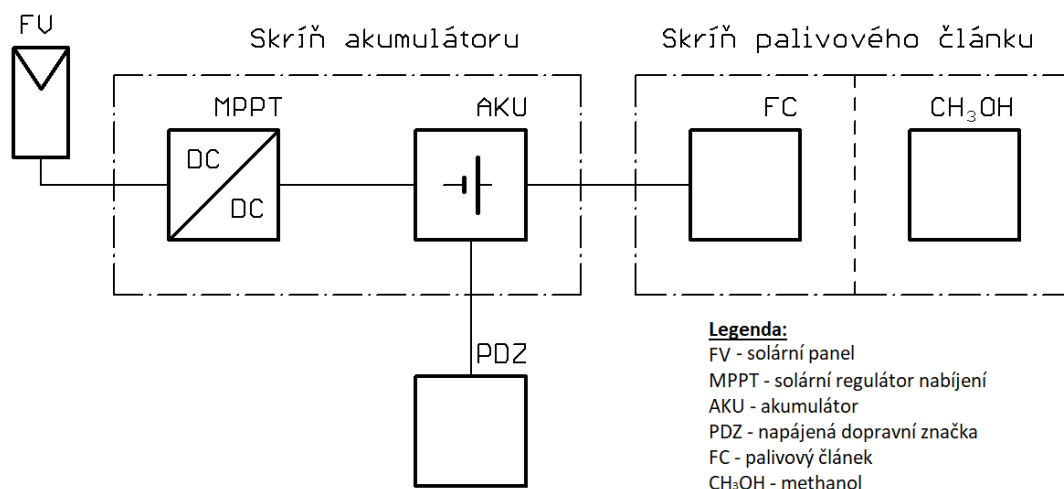
Aby byla jistá autonomnost provozu přeci jen zajištěna, byla sestava doplněna záložním zdrojem energie, který je tvořen palivovým článkem DMFC. Cílem bylo odzkoušení možností a vlastností palivového článku a nasbírání zkušeností z provozu. K testování byl použit palivový článek EFOY Pro 2400 o hmotnosti 9 kg, s rozměry 433 mm × 188 mm × 278 mm. Výrobce článku slibuje životnost nejméně 4500 hodin provozu, výkon 110 W a spotřebu paliva přibližně 0,9 l/kWh, rozsah pracovních teplot -20°C až $+50^{\circ}\text{C}$. Během garantované doby provozu by výkon neměl poklesnout pod 80 W [36]. Po skončení životnosti je možné článek repasovat a opět provozovat.

3.2.3 Vlastní návrh

Celková sestava je tvořena následujícími částmi:

- fotovoltaický panel včetně upevňovací konstrukce,
- skříň akumulátoru s elektrovýzbrojí,
- skříň palivového článku.

Na obr. 3.2 je blokové schéma propojení sestavy.



Obr. 3.2: Blokové schéma sestavy

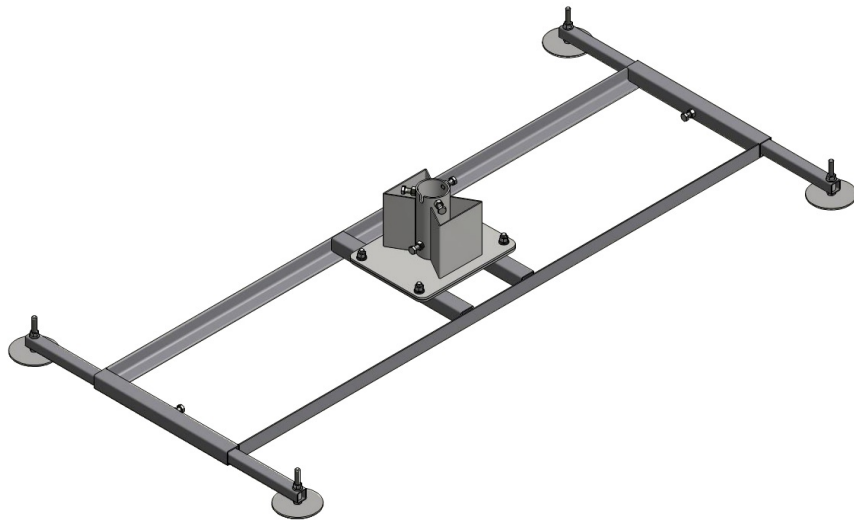
K zabezpečení proti zcizení jsou na všech dílech sestavy navařena oka pro protažení kaleného řetězu. Celá sestava se uzamkne bezpečnostním visacím zámek. Náhled na jednotlivé části je v příloze B. Kompletní dokumentace pro výrobu čítá více než sto výkresů, a je proto obsažena pouze v elektronické příloze práce.

FV panel

Použitý fotovoltaický panel má rozměry 1559 mm × 1046 mm × 46 mm [37]. Namontován je na rámečku svařeném z profilů L 30 mm × 30 mm × 3 mm. Ve středu svařence je příruba, která umožňuje natáčení panelu o 90°, sklon panelu je nastaven pevně na úhel 35°. Panel musí být orientován vždy tak, aby nepřesahoval svislý průmět svodidel. Konstrukce umožňuje rotovat panelem kolem svislé osy o 360° díky stojině tvořené trubkou \varnothing 70 mm × 3 mm × 1700 mm, která je uchycena v základně. Z bezpečnostních důvodů je mezi základnu a stojinu doplněna lámací spojka, aby v případě autonehody netvořila konstrukce pevnou překážku.

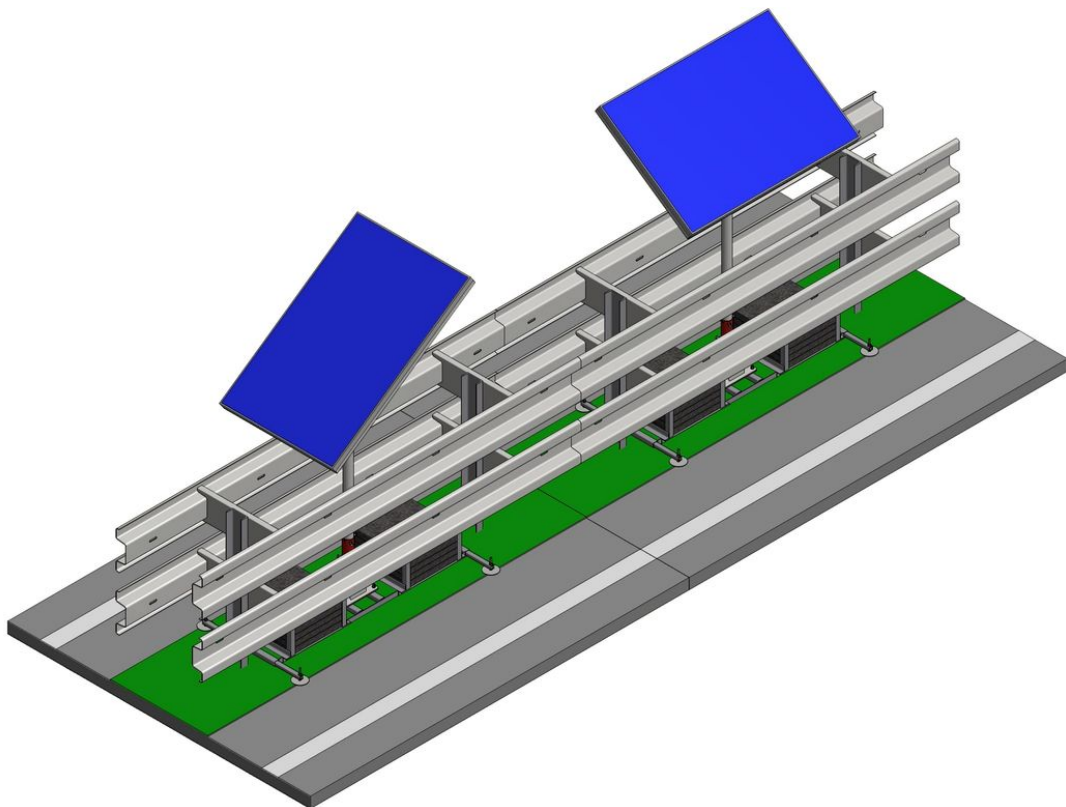
Základna je připravena pro osazení zátěže proti převrnutí a posuvu. Zátěž je realizována pomocí betonových dlaždic, kvůli jejich snadné dostupnosti a nízké ceně. Při vertikální orientaci solárního panelu lze jako zátěž využít také skříň akumulátoru.

Součástí základny jsou stavitelné nohy pro částečné vyrovnání terénních nerovností. Návrh základny je na obr. 3.3.



Obr. 3.3: Základna upevňovací konstrukce panelu

Vizualizace panelu nainstalovaného mezi svodidly ArcelorMittal OSNH4/H2 [38] je na obr. 3.4. Obrázek ilustruje horizontální i vertikální orientaci panelu.

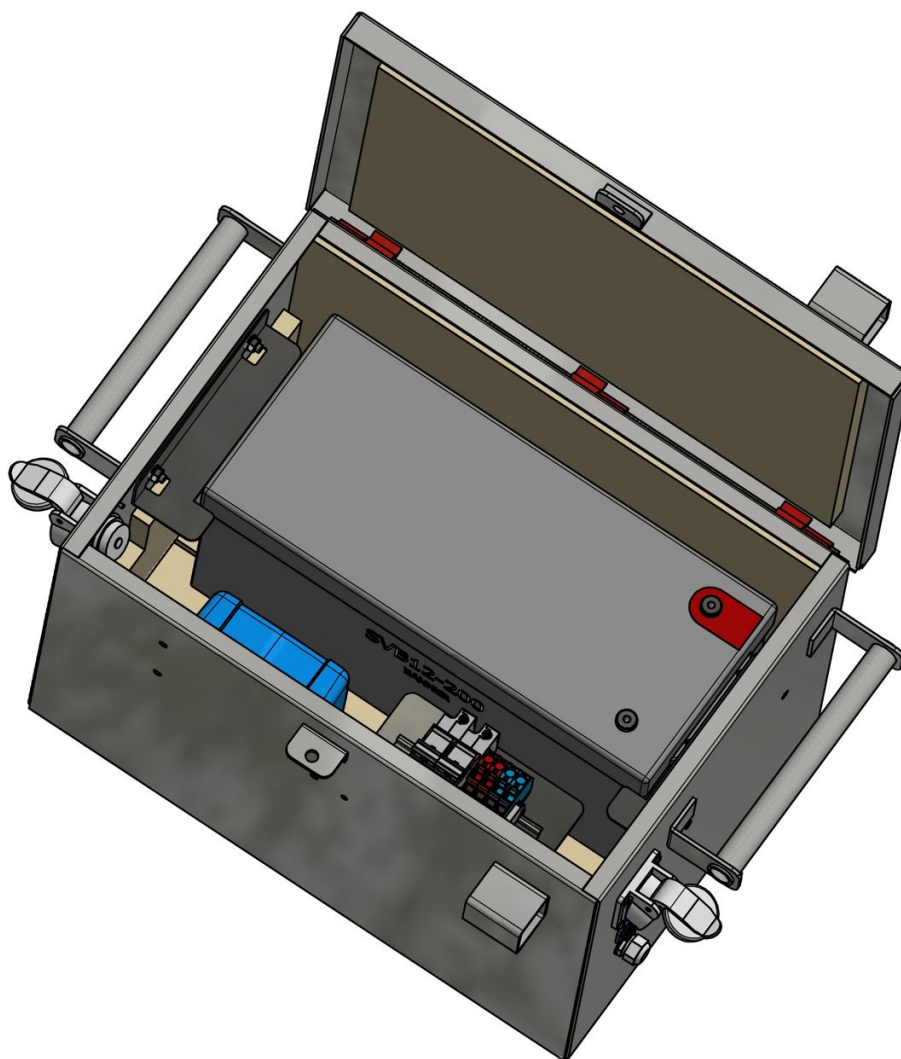


Obr. 3.4: FV panely mezi svodidly

Skříň akumulátoru

Stávající skříň akumulátoru neumožňuje svými rozměry vestavbu potřebných komponent, proto byla nahrazena novou skříní, která byla mírně zvětšena a z důvodu lepší modularity doplněna o zásuvky pro pohodlnější propojování.

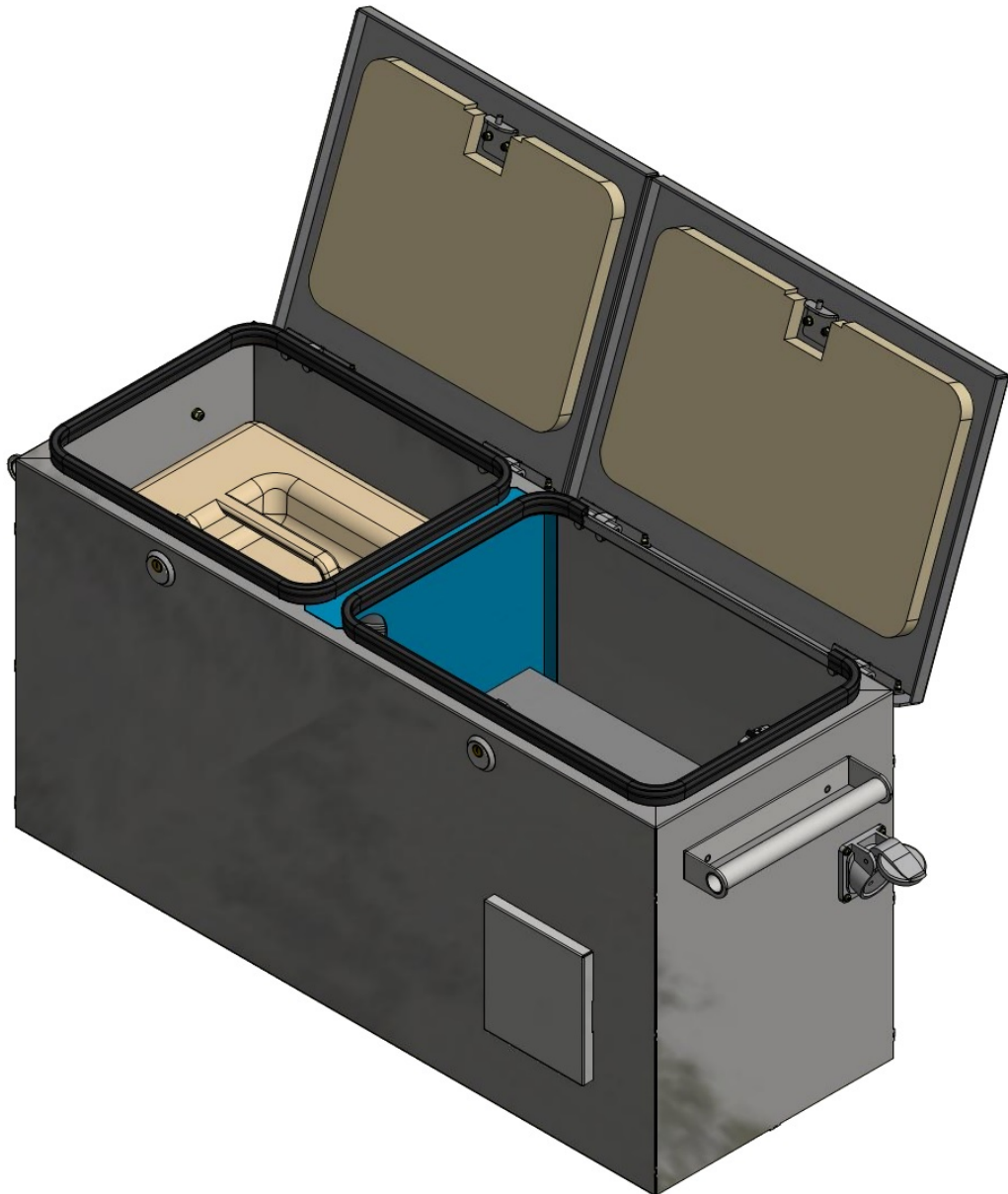
Uvnitř skříně přibyl panel pro osazení svorkovnic a jištění, na stěnu skříně byl namontován solární regulátor nabíjení MPPT [39]. Model skříně je na obr. 3.5. Nová skříň vychází konstrukčně ze stávajícího provedení. Je vyrobená z ocelového plechu s povrchovou úpravou žárovým zinkem. Stěny skříně jsou z vnitřní strany obloženy tepelnou izolací z extrudovaného polystyrenu tloušťky 20 mm. Rozměry skříně umožňují její využití též jako zátěže pro upevňovací konstrukci fotovoltaického panelu. Vzhledem k hmotnosti skříně přibližně 100 kg je však takové použití možné pouze při vertikální orientaci solárního panelu, viz statický výpočet v kapitole 3.2.4. Vnitřní zapojení skříně je v příloze A na obr. A.1.



Obr. 3.5: Nová skříň akumulátoru

Skříň palivového článku

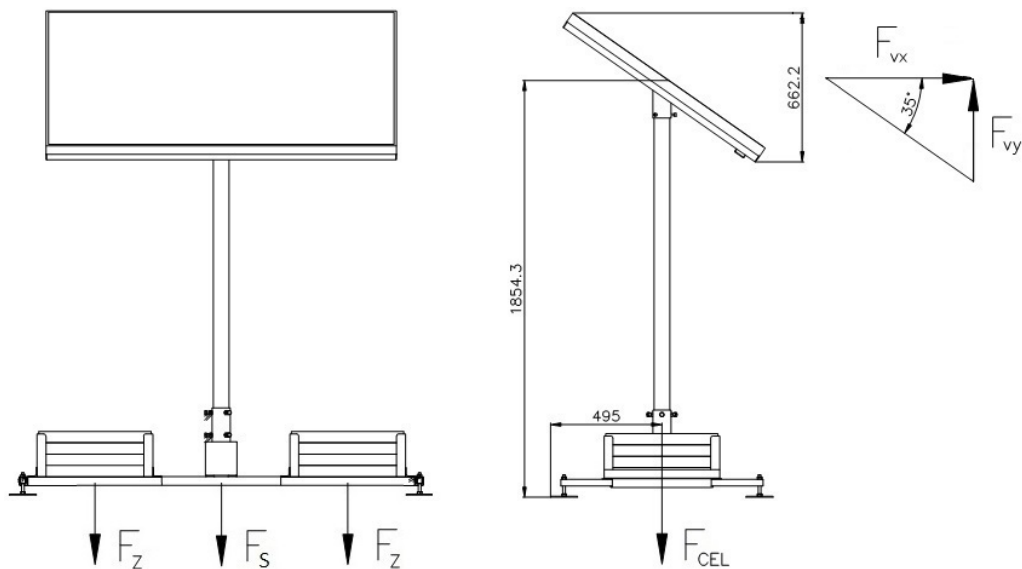
Palivový článek je umístěn v samostatné skříni, rozdělené přepážkou do dvou částí. V jedné části je krom samotného článku také prostor pro pomocnou elektrovýbavu a dva otvory s větracími mřížkami pro zajištění patřičné cirkulace vzduchu. Odpadní voda z článku je vyvedena ven ze skříně přes průchodku v boční stěně. Ve druhé části skříně je umístěn kanystr s methanolem o objemu 28 litrů [40]. Model skříně je na obr. 3.6, zapojení skříně je v příloze A na obr. A.2.



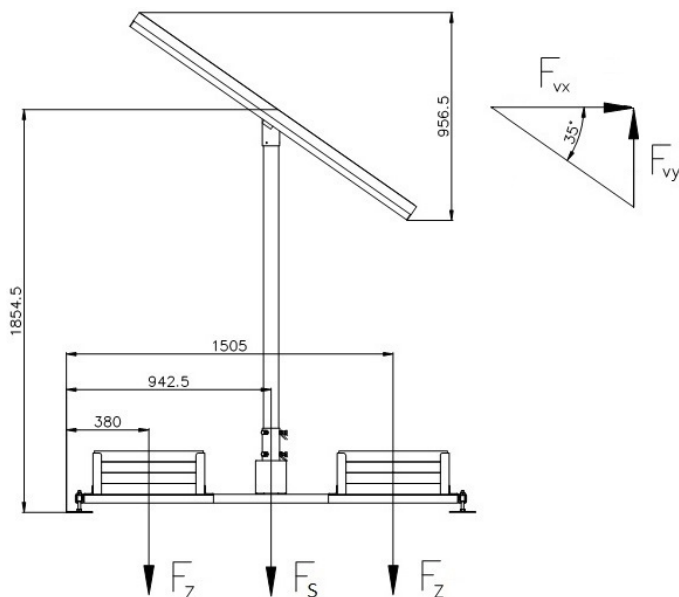
Obr. 3.6: Skříň palivového článku

3.2.4 Statický výpočet

Výpočet zatížení větrem vychází z požadavku ředitelství silnic a dálnic ČR, který je specifikován v pokynech PPK-PRE [41]. Zařízení musí odolat zatížení větrem nejméně $p = 0,8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$. Na obr. 3.7 je rozložení působících sil pro obě montážní polohy panelu. Montáž podle obr. 3.7a je z hlediska stability méně výhodná a bude vyžadovat větší zátěž, protože působící síla překlápí stojan přes kratší rameno.



(a)



(b)

Obr. 3.7: Rozložení působících sil - (a) panel horizontálně, (b) panel vertikálně

K zajištění stability proti překlopení při působení větru musí být splněno:

$$M_s \geq M_k \quad (3.1)$$

kde M_s je stabilizační moment a M_k klopný moment, přičemž moment je vždy součinem působící síly a délky ramene, na něž síla působí.

Síla F_{vy} může nabývat kladných i záporných hodnot, v závislosti na směru působení větru. Fotovoltaický panel je při působení větru z jedné strany přitlačován k zemi, čímž dochází ke zlepšení stability. Při působení větru z opačné strany je panel naopak nadzvedáván, čímž se stabilita zhoršuje. Při výpočtech tedy bude vždy použita záporná hodnota síly F_{vy} , neboť je z hlediska stability méně výhodná.

Pro výpočet budou použity následující hodnoty:

$p = 0,8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$	– tlak proudu vzduchu,
$\alpha = 35^\circ$	– úhel sklonu panelu od vodorovné roviny,
$\beta = 55^\circ$	– úhel sklonu panelu od svislé roviny,
$m_s = 75 \text{ kg}$	– hmotnost stojanu vč. FV panelu,
$m_{zV} = 95 \text{ kg}$	– hmotnost zátěže (3 dlaždice + rám),
$m_{zH} = 155 \text{ kg}$	– hmotnost zátěže (5 dlaždic + rám),
$r_y \doteq 1,86 \text{ m}$	– délka ramene ve směru osy y ,
$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	– tíhové zrychlení.

Dále při horizontální orientaci platí:

$a_H \doteq 0,67 \text{ m}$	– výška vodorovného průmětu panelu (vč. rámečku),
$b_H \doteq 1,56 \text{ m}$	– šířka panelu,
$r_x \doteq 0,49 \text{ m}$	– délka ramene ve směru osy x .

Při vertikální orientaci platí:

$a_V \doteq 0,96 \text{ m}$	– výška vodorovného průmětu panelu (vč. rámečku),
$b_V \doteq 1,05 \text{ m}$	– šířka panelu,
$r_{x1} = 0,38 \text{ m}$	} – délky ramen ve směru osy x .
$r_{x2} \doteq 0,94 \text{ m}$	
$r_{x3} \doteq 1,50 \text{ m}$	

Hodnoty byly zaokrouhleny tak, aby byly pro výpočet méně výhodné.

Výpočet klopného momentu pro horizontální montáž

Plocha, na kterou působí vítr:

$$S_H = a_H \cdot b_H = 0,67 \cdot 1,56 \doteq 1,05 \text{ m}^2$$

Síla větru, působící ve směru osy x:

$$F_{vx} = p \cdot S_H = 0,8 \cdot 1,05 = 0,84 \text{ kN}$$

Výsledný moment je:

$$M_k = F_{vx} \cdot r_y = 0,84 \cdot 1,86 \doteq \underline{\underline{1,56 \text{ kN} \cdot \text{m}}} \quad (3.2)$$

Výpočet stabilizačního momentu pro horizontální montáž

Stabilizační moment je dán sumou všech momentů, vyvozených silami působícími ve směru osy y:

$$M_s = \sum F_y \cdot r_x = F_{cel} \cdot r_x - F_{vy} \cdot r_x = r_x \cdot (F_{cel} - F_{vy})$$

kde:

$$F_{cel} = g \cdot (2 \cdot m_{zH} + m_s) = 9,81 \cdot (2 \cdot 155 + 75) \doteq 3,78 \text{ kN}$$

a ze sinové věty pro F_{vy} :

$$F_{vy} = \frac{F_{vx} \cdot \sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{0,84 \cdot \sin 35}{\sin 55} \doteq 0,58 \text{ kN}$$

Výsledný moment je:

$$M_s = 0,49 \cdot (3,78 - 0,58) \doteq \underline{\underline{1,57 \text{ kN} \cdot \text{m}}} \quad (3.3)$$

Dosazením 3.2 a 3.3 do 3.1 vyjde:

$$1,57 > 1,56 \Rightarrow \textit{konstrukce na překlopení vyhovuje.}$$

Výpočet posunutí pro horizontální montáž

Posouvající síla F_{vx} :

$$F_{vx} = \underline{\underline{0,84 \text{ kN}}}$$

Třecí síla F_t :

$$F_t = \mu \cdot \sum F_y = \mu \cdot (F_{cel} - F_{vy}) = 0,7 \cdot (3,78 - 0,58) = \underline{\underline{2,24 \text{ kN}}}$$

kde $\mu = 0,7$ je součinitel smykového tření v klidu pro pryž - beton.

$2,24 > 0,84 \Rightarrow \textit{konstrukce na posunutí na běžné vozovce se součinitelem tření 0,7 vyhovuje.}$

Výpočet klopného momentu pro vertikální montáž

Plocha, na kterou působí vítr:

$$S_V = a_V \cdot b_V = 0,96 \cdot 1,05 \doteq 1,01 \text{ m}^2$$

Síla větru, působící ve směru osy x:

$$F_{Vx} = p \cdot S_V = 0,8 \cdot 1,01 \doteq 0,81 \text{ kN}$$

Výsledný moment je:

$$M_k = F_{Vx} \cdot r_y = 0,81 \cdot 1,86 \doteq \underline{\underline{1,51 \text{ kN} \cdot \text{m}}} \quad (3.4)$$

Výpočet stabilizačního momentu pro vertikální montáž

Stabilizační moment je dán sumou všech momentů, vyvozených silami působícími ve směru osy y:

$$\begin{aligned} M_s &= \sum F_y \cdot r_x = F_z \cdot r_{x1} + F_s \cdot r_{x2} + F_z \cdot r_{x3} - F_{vy} \cdot r_{x2} \\ &= F_z \cdot (r_{x1} + r_{x3}) + (F_s - F_{vy}) \cdot r_{x2} \end{aligned}$$

kde:

$$F_z = g \cdot m_{zV} = 9,81 \cdot 95 \doteq 0,93 \text{ kN}$$

$$F_s = g \cdot m_s = 9,81 \cdot 75 \doteq 0,74 \text{ kN}$$

a ze sinové věty pro F_{vy} :

$$F_{vy} = \frac{F_{Vx} \cdot \sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{0,81 \cdot \sin 35}{\sin 55} \doteq 0,56 \text{ kN}$$

Výsledný moment je:

$$M_s = 0,93 \cdot (0,38 + 1,50) + (0,74 - 0,56) \cdot 0,94 \doteq \underline{\underline{1,92 \text{ kN} \cdot \text{m}}} \quad (3.5)$$

Dosazením 3.4 a 3.5 do 3.1 vyjde:

$$1,92 > 1,51 \Rightarrow \textit{konstrukce na překlopení vyhovuje.}$$

Výpočet posunutí pro vertikální montáž

Posouvající síla F_{Vx} :

$$F_{Vx} = \underline{\underline{0,81 \text{ kN}}}$$

Třecí síla F_t :

$$F_t = \mu \cdot \sum F_y = \mu \cdot (2 \cdot F_z + F_s - F_{vy}) = 0,7 \cdot (2 \cdot 0,93 + 0,74 - 0,56) = \underline{\underline{1,43 \text{ kN}}}$$

kde $\mu = 0,7$ je součinitel smykového tření v klidu pro pryž - beton.

$1,43 > 0,81 \Rightarrow \textit{konstrukce na posunutí na běžné vozovce se součinitelem tření 0,7 vyhovuje.}$

4 Měření, vyhodnocení

Pro ověření návrhu zásobovacího místa byla provedena dlouhodobá měření, s cílem zmapovat kompletní energetické toky v systému. Na základě provedených měření pak bylo možné zhodnotit také ekonomickou stránku návrhu.

4.1 Testovací souprava

V rámci práce byla vytvořena testovací souprava, na níž byla prováděna veškerá měření. Schéma zapojení testovací soupravy je v příloze A. Měřena byla spotřeba PDZ, dodávka energie do akumulátoru a odběr z něj. Samostatně byla měřena také energie vyrobená fotovoltaikou a palivovým článkem.

K měření byly využity stejnosměrné elektroměry EZG-S0 s impulsním výstupem [42] od firmy Müller Ziegler, které registrují zvláště odběr a dodávku energie. Tyto elektroměry umožňují přímé měření pro proud do 10 A, pro vyšší hodnoty proudu lze realizovat měření pomocí bočníku. Elektroměry pro PDZ a palivový článek byly zapojeny na přímo, ostatní elektroměry byly zapojeny přes bočníky s převodem 60 A/60 mV. Impulsy z elektroměrů byly logovány pomocí PLC s rozlišením měření na patnáct minut [43]. Z naměřených dat byly sestaveny odběrové diagramy z nichž bylo vyhodnoceno, zda je navržený výkon FV článků dostatečný, jaké je procentuální zastoupení výroby energie fotovoltaikou a jaké palivovým článkem.

Záložní nabíjení bylo z úsporných důvodů realizováno kromě samotného palivového článku také nabíječkou, která byla spínána pomocí kontaktu elektroměru pro palivový článek. Pokud tedy elektroměr zaznamenal činnost palivového článku, došlo k sepnutí nabíječky a akumulátor byl nabíjen souběžně z obou zdrojů. Dodávka energie z nabíječky byla rovněž registrována samostatným elektroměrem.

Dále bylo měřeno též napětí na akumulátoru, které bylo přes upravený převodník napětí/frekvence [44] logováno v PLC. Toto měření slouží jako doplňková informace k posuzování hloubky vybíjení akumulátoru.

Celá testovací souprava je složena z následujících částí:

1. Vnější (obr. A.3).
 - Skříň obsahující všechny měřicí části, palivový článek, solární regulátor nabíjení. Skříň byla doplněna o vyhřívání, aby v případě poruchy nedošlo k zamrznutí palivového článku a jeho zničení.
 - Stojan s fotovoltaickým panelem 325 Wp (2×).
 - Skříň s akumulátorem 200 Ah (2×).
2. Vnitřní (obr. A.4).
 - Skříň obsahující PLC a zařízení potřebné pro jeho provoz. Přes převodník je připojena do sítě LAN pro dálkový odečet dat.

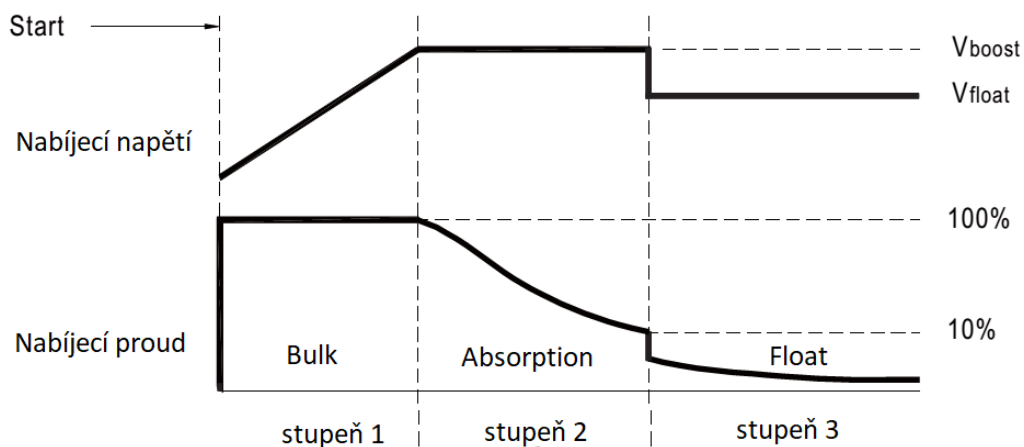
4.1.1 Výsledky měření

Samotné měření bylo spuštěno v prosinci 2020, avšak vzhledem k častým úpravám a zásahům do systému nejsou data z tohoto měsíce konzistentní, proto nebyly při vyhodnocení zohledněny. Připojená PDZ měla aktivní automatickou regulaci jasu. Jako referenční byl pro zobrazení zvolen symbol A 15 - práce na silnici, byly aktivovány blikače - symbol S 7 a zobrazena dodatková tabulka E 3a - vzdálenost 1500 m. Veškeré naměřené hodnoty jsou součástí elektronické přílohy práce, kde jsou zpracovány výsledky měření v rozsahu 1. 1. až 23. 5. 2021.

V průběhu zkušebního provozu byly obměněny některé elektroměry, protože se jejich přesnost ukázala jako nedostatečná. Původně použité přístroje měly výstupní impulsy s váhou 100 imp./kWh, nově použité EZG-S0 umožnily nastavit váhu 6000 imp./kWh, díky čemuž je možné lépe rekonstruovat průběh toků energie. V naměřených datech jsou jako doplňková informace uloženy také naměřené hodnoty venkovní teploty a teploty uvnitř skříně s palivovým článkem.

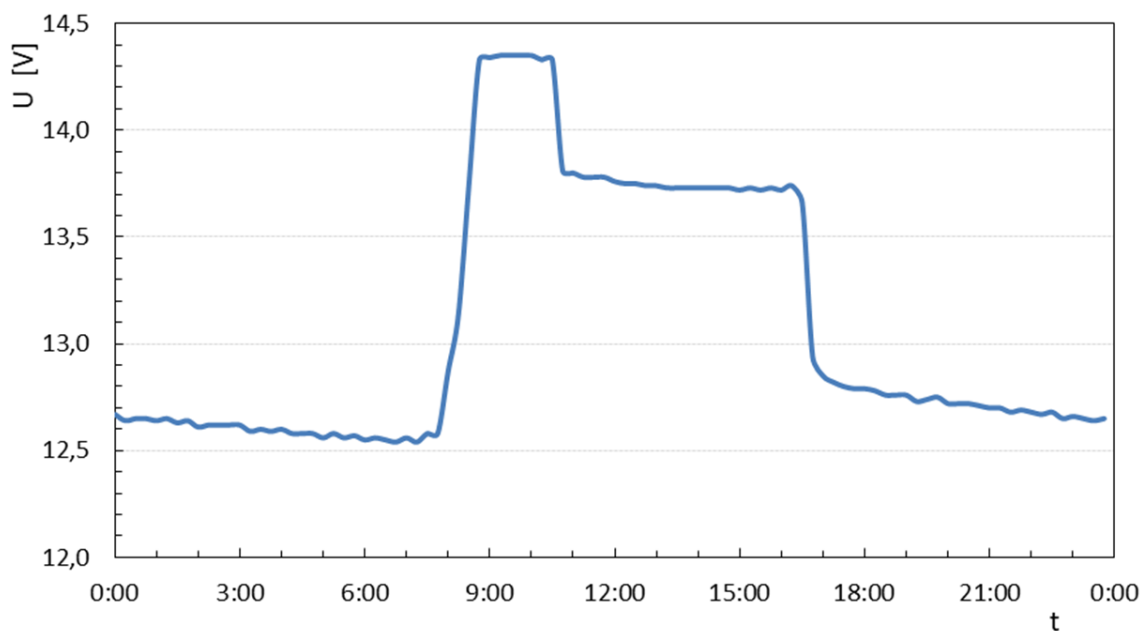
Použitý solární regulátor pracuje s třístupňovým režimem nabíjení akumulátoru, jednotlivé stupně ilustruje obrázek 4.1.

- 1. stupeň - označovaný jako „Bulk“, nebo „Boost“ - režim konstantního proudu. Nabíjecí proud má maximální hodnotu, napětí akumulátoru postupně roste, dokud nedosáhne hodnoty 14,4 V.
- 2. stupeň - „Absorption“ - režim konstantního napětí. Napětí akumulátoru již dosáhlo dané hranice, nadále bude udržováno na konstantní hodnotě. Nabíjecí proud postupně klesá.
- 3. stupeň - „Float“ - akumulátor je plně nabit, napětí je sníženo na hodnotu 13,8 V, aby se omezilo plynování. Nabíjecí proud klesne na zbytkovou hodnotu a jen nepatrně se mění tak, aby byla udržena konstantní hodnota napětí na akumulátoru.



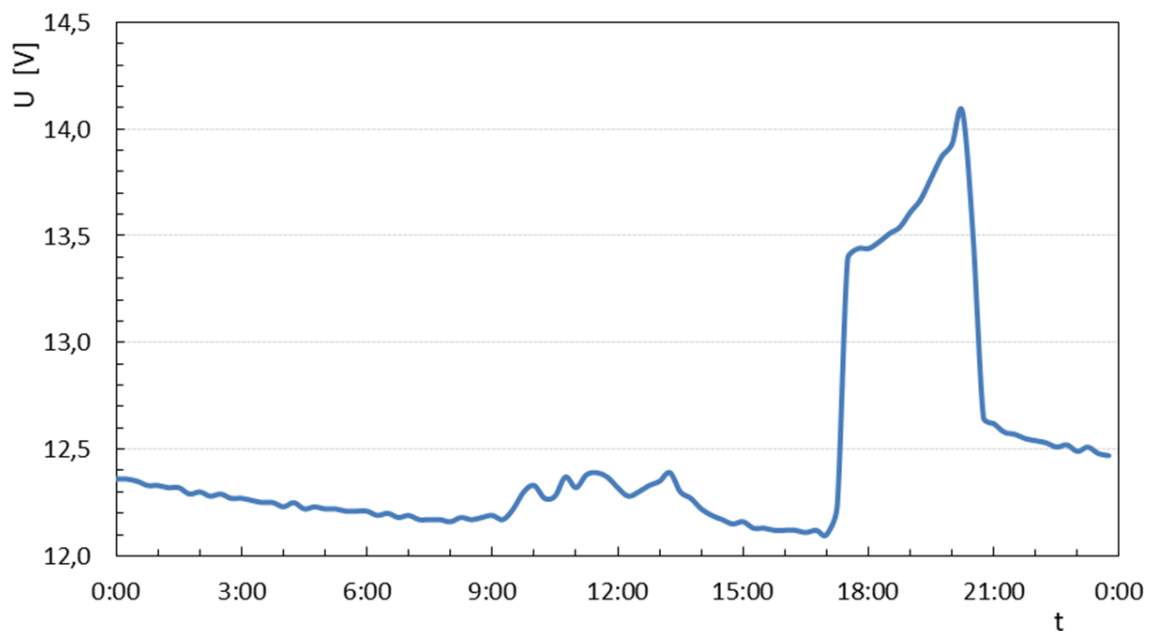
Obr. 4.1: Třístupňové nabíjení [45]

Reálný průběh napětí na akumulátoru při provozu za jasného dne ilustruje obr. 4.2. Jedná se o průběh ze dne 7.3.2021, kdy bylo nabíjení v 1. režimu po dobu 179 minut, ve 2. režimu 120 minut a ve 3. režimu 364 minut.



Obr. 4.2: Průběh napětí AKU 7.3.2021 - jasná obloha

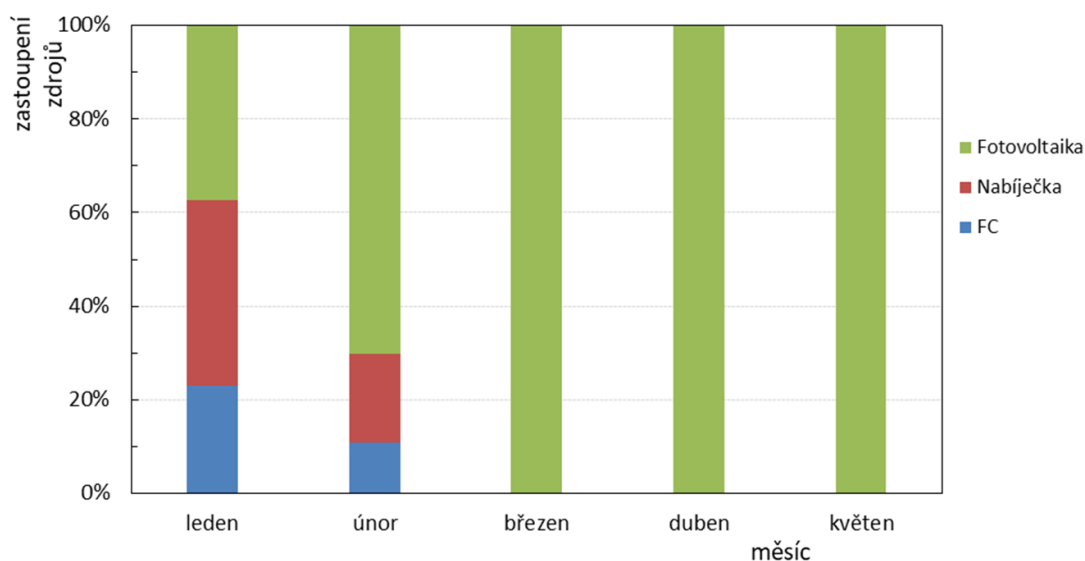
Průběh napětí na akumulátoru při dlouhodobém nedostatku slunečního záření je na obr. 4.3. Tento průběh je ze dne 28.1.2021, kdy byla celý den zatažená obloha



Obr. 4.3: Průběh napětí AKU 28.1.2021 - zatažená obloha

s občasným deštěm. Regulátor byl přepnut pouze do prvního režimu po dobu 433 minut. Dodávka energie z fotovoltaiky je na grafu patrná v oblasti mezi 9–15 hod., přibližně v 17 hodin pak došlo k aktivaci externího zdroje nabíjení. Limit pro aktivaci byl nastaven na hodnotu 12 V, pokles napětí na tuto hodnotu však není na grafu vidět, protože hodnoty napětí jsou v PLC ukládány jako průměr za danou čtvrt hodinu.

Poměr zastoupení jednotlivých zdrojů energie za celé měřené období je na obr. 4.4. Z grafu je patrné, že v zimním období nestačí použitá fotovoltaika pokrýt spotřebu značky a dochází k aktivaci záložního napájení. Od března pak již byla spotřeba kryta pouze z fotovoltaického zdroje. Podle energetické bilance za dané období lze usuzovat, že provoz v letních měsících bez problémů zabezpečí fotovoltaický zdroj.



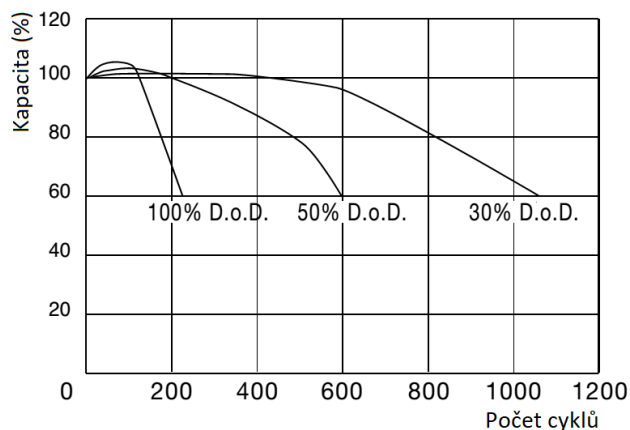
Obr. 4.4: Procentuální zastoupení zdrojů energie

Souhrny energetických toků za jednotlivé měsíce jsou v tabulce 4.1. Spotřeba palivového článku byla mimo rozlišovací schopnost elektroměru a data obsahují nulové hodnoty, proto není toto měření v tabulce zahrnuto. Kompletní měsíční odběrové diagramy jsou kvůli rozsahu umístěny v příloze C.

Tab. 4.1: Měsíční souhrny toků energie (kWh)

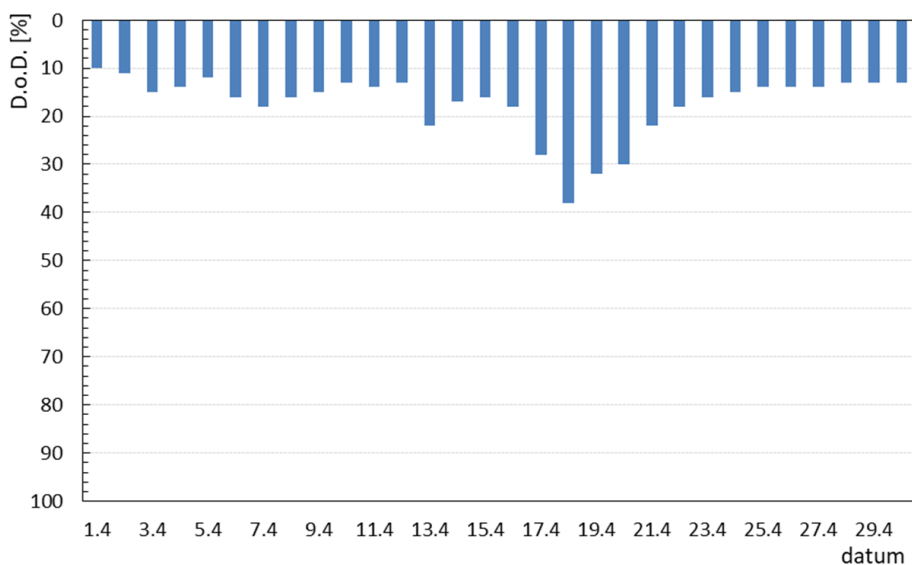
Měsíc	PDZ	FV	AKU vybíjení	AKU nabíjení	FC	Nabíječka
leden	31,28	12,15	21,24	24,33	7,48	12,97
únor	29,17	22,61	18,55	22,02	3,49	6,05
březen	31,55	35,06	17,48	20,36	0,00	0,00
duben	31,19	34,06	14,68	16,94	0,00	0,00
květen	24,10	26,23	10,26	12,29	0,00	0,00

Využití liniového řízení dopravy se předpokládá v období od jara do podzimu. Měření na zkušební soupravě proto probíhá i nadále s cílem zmapovat také chování zařízení během podzimních měsíců. Předmětem dalšího měření bude také zhodnotit, zda je možné provozovat značku pouze s jednou soupravou FV panel + skříň AKU. Energie v akumulátoru pokryje spotřebu značky po dobu přibližně dvou dnů, poté již dochází k hlubokému vybíjení akumulátoru. Na obr. 4.5 je zobrazena závislost kapacity použitých akumulátorů na počtu nabíjecích cyklů pro různé hloubky vybití.



Obr. 4.5: Závislost kapacity AKU na počtu cyklů [34]

Pro ilustraci je na obrázku 4.6 skutečná hloubka vybíjení akumulátoru během měsíce dubna. V extrémech bylo vyčerpáno téměř 40 % kapacity, přičemž medián z tohoto období je 15 %. V zimních měsících je pak situace pochopitelně ještě horší,



Obr. 4.6: Hloubka vybíjení AKU - duben

data z měření v tomto období však nejsou relevantní, protože v použité konfiguraci testovací soupravy došlo vždy k sepnutí záložního zdroje a dobití akumulátoru. Hloubku vybíjení tedy ovlivnilo nastavení mezí pro připojení záložního napájení. Testy autonomního provozu bez záložního zdroje budou teprve prováděny v následujících měsících.

V příloze C jsou také grafy, které vyjadřují stupeň nabití akumulátoru. Zatímco v lednu (obr. C.4) nebyl akumulátor prakticky nikdy zcela dobit a regulátor nabíjení byl téměř vždy pouze v režimu „bulk“, byla situace v dubnu (obr. C.18) zcela opačná a regulátor se skoro denně dostal až do režimu „float“. Uvedené chování je způsobeno polohou slunce na obloze. V zimních měsících je slunce níže nad obzorem a celková doba slunečního svitu je tak kratší.

S polohou slunce, potažmo s dobou slunečního svitu souvisí také grafy, které vyjadřují energetické toky akumulátoru. V lednu (obr. C.3) bylo z akumulátoru průměrně čerpáno téměř 0,7 kWh za den, zatímco v dubnu (obr. C.17) to bylo necelé 0,5 kWh. Odběr připojené značky byl tedy v dubnu vykrýván po delší dobu přímo z fotovoltaiky, čímž docházelo také k nižšímu opotřebení akumulátoru.

Prozatímní výsledky měření tedy ukázaly, že v konfiguraci dva akumulátory a dva FV panely je možné zařízení zcela autonomně provozovat od měsíce března, kdy již fotovoltaika zvládá pokrýt 100 % spotřeby značky. Předmětem dalšího měření bude zmapovat chování zařízení během podzimu.

4.2 Ekonomické zhodnocení

Náklady na provoz liniového řízení dopravy budou vyhodnoceny pouze s ohledem na energetickou část, která je předmětem této práce. Zcela pomínuty budou aspekty týkající se řízení provozu, komunikace se značkami a datového spojení, zajištění kontrolního dispečinku apod.

4.2.1 Porovnání nákladů

V tabulce 4.2 jsou porovnány náklady na pořízení a provoz původního a nového systému. Jednotlivé varianty mají následující skladbu:

- S - staré provedení bez jakýchkoli změn,
- N1 - nové provedení - 1× FV panel, 1× skříň AKU a 1× palivový článek,
- N2 - nové provedení - 2× FV panel, 2× skříň AKU, bez palivového článku.

Nasazení varianty N2 se předpokládá pouze v případě letního provozu. Pokud bude zapotřebí provozovat zařízení i v zimním období, pak je zapotřebí použít variantu N1, případně N2 částečně podpořenou servisními zásahy.

Porovnání je provedeno pro dobu provozu 1, 3 a 6 měsíců a zahrnuje veškeré náklady na pořízení, dopravu, montáž, servis a následnou demontáž zařízení.

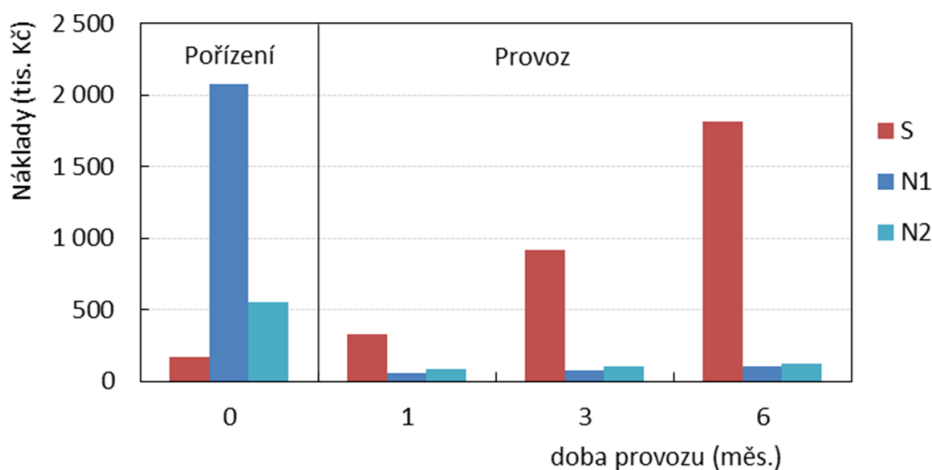
Ve výpočtu je uvažováno s provozem deseti souprav, při dojezdové vzdálenosti 100 km do místa instalace. Částky v tabulce jsou v tisících Kč. Pro přehlednost jsou uvedeny pouze celkové sumy, podrobnější zpracování je v příloze D, tab. D.1 a D.2. Součástí elektronické přílohy je také soubor s kalkulací, ve kterém jsou všechny použité výpočty.

Pro kalkulaci ceny ve variantě S byl uvažován dvoudenní interval výměny akumulátoru, pro variantu N1 je v kalkulaci zahrnuta výměna kanystru s methanolem 1× za měsíc, ve variantě N2 se počítá s jedním kontrolním výjezdem měsíčně.

Tab. 4.2: Porovnání nákladů na pořízení a provoz (v tis. Kč)

Doba provozu (měs.)	1			3			6		
	S	N1	N2	S	N1	N2	S	N1	N2
Počet FV	0	1	2	0	1	2	0	1	2
Počet FC	0	1	0	0	1	0	0	1	0
Pořizovací náklady	170	2 080	554	170	2 136	554	170	2 220	554
Provozní náklady	328	63	88	922	78	104	1 812	102	127
Celkem	498	2 143	642	1 092	2 214	658	1 982	2 322	681

Na následujícím obrázku (4.7) je totéž porovnání vyjádřeno graficky. Z celkové kalkulace vyplývá, že významnou částku představuje pořízení palivových článků. Pokud by byla sestava provozována ve variantě N2, tj. pouze se solárním zdrojem, začíná být rentabilní již po 1,5 měsíci provozu. V případě zvažované varianty N1,



Obr. 4.7: Porovnání nákladů na pořízení a provoz (v tis. Kč)

tedy kombinace solární + palivový článek, je návratnost investice více než půl roku. Je ale nutné vzít v úvahu, že zařízení má určitou životnost a bude se průběžně odepisovat. Pokud porovnáme pouze provozní náklady, je zřejmá návratnost investice již po několika dnech provozu.

4.2.2 Párové porovnání Saatyho metodou

Pro srovnání bylo dále provedeno párové porovnání Saatyho metodou [46]. Cílem párového porovnávání je výběr nejvhodnější varianty řešení tak, aby maximálně naplňovala požadované cíle.

Zařízení by mělo mít nízké provozní náklady, nemělo by však být zbytečně nákladné na pořízení a zároveň by měla být přiměřená cena jeho montáže. Montáž i servis by měly být co nejjednodušší. Jako kritéria hodnocení byly zvoleny následující vlastnosti:

- K1 - pořizovací náklady,
- K2 - náklady na montáž,
- K3 - náklady na servis,
- K4 - náročnost montáže,
- K5 - náročnost servisu.

Pro určení významnosti kritérií byla sestavena Saatyho matice (tab. 4.3) a vypočteny váhy kritérií [46][47]. K sestavení matice byla použita následující Saatyho škála preferencí:

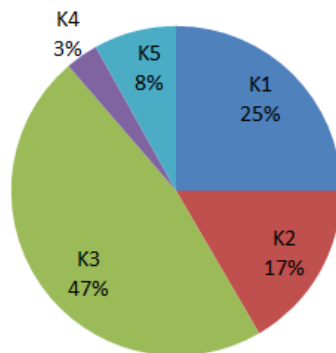
1. rovnocennost,
3. slabá preference,
5. silná preference,
7. velmi silná preference,
9. absolutní preference.

Tab. 4.3: Výpočet vah kritérií - Saatyho metoda

	K1	K2	K3	K4	K5	průměr	váha
K1	1	3	1/3	5	5	2,867	0,250
K2	1/3	1	1/5	5	3	1,907	0,166
K3	3	5	1	9	9	5,400	0,471
K4	1/5	1/5	1/9	1	1/3	0,369	0,032
K5	1/5	1/3	1/9	3	1	0,929	0,081

CR 0,059

Čím větší je váha daného kritéria, tím větší je jeho významnost. Graf na obr. 4.8 zobrazuje významnost kritérií vyjádřenou v procentech. Bylo také provedeno ověření konzistence matice a vypočten poměr konzistence CR. Hodnota $CR > 0,1$ by poukazovala na nekonzistenci matice [48].



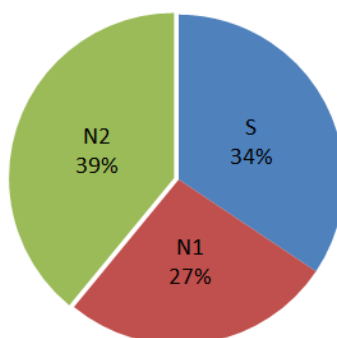
Obr. 4.8: Významnost kritérií dle Saatyho metody

Dále byly Saatyho metodou porovnány všechny tři zvažované varianty pro každé z uvedených kritérií. Výsledné hodnocení shrnuje tab. 4.4 a jednotlivé dílčí matice jsou v příloze D, tab. D.3.

Tab. 4.4: Výsledek hodnocení různých variant Saatyho metodou

varianta	K1	K2	K3	K4	K5	výsledek
S	0,174	0,116	0,026	0,022	0,006	0,344
N1	0,020	0,037	0,174	0,007	0,027	0,266
N2	0,056	0,013	0,271	0,003	0,048	0,391
suma	0,250	0,166	0,471	0,032	0,081	1,000

Graf na obr. 4.9 zobrazuje výsledek hodnocení Saatyho metodou vyjádřený v procentech.



Obr. 4.9: Výsledné hodnocení Saatyho metodou

Nejvyšší hodnocení získalo provedení N2, tedy sestava obsahující pouze fotovoltaický zdroj, proto jej lze podle Saatyho metody považovat za optimální variantu.

Závěr

V práci byla navržena souprava, která bude sloužit pro napájení mobilních proměnných dopravních značek s využitím obnovitelných zdrojů energie. Vzhledem k cílovému určení byla věnována pozornost především využití energie z fotovoltaiky. Způsob, jakým jsou značky v současné době napájeny je nevyhovující a napájení pomocí solárního zdroje se přímo nabízí, jako vhodná alternativa.

Navržená souprava sestává ze tří částí, a sice fotovoltaického panelu, skříně akumulátoru a skříně palivového článku. Součástí fotovoltaického panelu je upevňovací konstrukce, která byla konstrukčně uzpůsobena pro použití ve středovém pruhu dálnice mezi svodidly, neboť na tomto místě jsou největší prostorová omezení. Při návrhu byly zohledněny požadavky úřadů, které schvalují použití zařízení v silniční dopravě. Na základě těchto požadavků byly provedeny statické výpočty k zajištění stability při zatížení větrem, z nichž následně vychází rozměry zařízení.

Skříně akumulátoru vychází konstrukčně z původně používané skříně a počítá se také s použitím původních akumulátorů. Rozměry skříně byly upraveny kvůli nutnosti implementace další technologie a současně byla skříně doplněna o zásuvky, které usnadní a zrychlí propojování. Součástí skříně je nově solární regulátor nabíjení MPPT a přibýlo také patřičné jištění válcovými pojistkami.

Jako doplněk pro záložní napájení byla navržena skříně s palivovým článkem DMFC, která umožní také uložení kanystru s methanolem. Tato skříně je rovněž opatřena zásuvkou pro snadné propojování.

Ke všem částem soupravy byla vytvořena kompletní výrobní dokumentace, čítající více než sto výkresů. Podle této dokumentace byl vyroben zkušební vzorek, čímž bylo prověřeno, že je dokumentace použitelná k zavedení do výroby.

Kvůli kolísajícímu proudovému odběru napájené dopravní značky bylo pro ověření návrhu nezbytné provést dlouhodobější měření spotřeby značky a schopnosti pokrýt požadovaný příkon pomocí vyrobeného zařízení. K tomuto účelu byla vytvořena dvoudílná testovací souprava. Vnější část soupravy obsahovala stejnosměrné elektroměry s impulsními výstupy, které měřily veškeré energetické toky v systému. Měřena byla výroba energie fotovoltaikou a záložním zdrojem, a také energie ukládaná do akumulátoru i odběr z něj. Bylo měřeno také napětí akumulátoru, aby bylo možné posoudit hloubku jeho vybíjení. Všechny naměřené hodnoty byly přenášeny do druhé části měřicí soupravy. Ta sestávala z PLC, které zaznamenávalo energetické údaje s 15minutovým rozlišením, a dalšího příslušenství pro napájení a komunikaci. Na základě provedených měření byly sestaveny odběrové diagramy k posouzení celkového návrhu.

Cílem provedených měření bylo ověřit, zda bude navržené zařízení schopno autonomního provozu, případně zda bude nutné použití záložního napájení. Na základě

provedených měření lze konstatovat, že při uvažovaném nasazení zařízení v období od jara do podzimu bude zajištěn autonomní provoz i bez záložního zdroje. V případě potřeby provozu mimo dané období je možné používat soupravu s využitím navrženého záložního zdroje, čímž bude autonomnost provozu rovněž zajištěna.

Také z ekonomického hlediska splňuje zařízení zamýšlený účel. Podle provedených kalkulací je návratnost investice do nové technologie zajištěna v krátkém časovém horizontu. V případě provozu soupravy pouze s fotovoltaickým zdrojem je návratnost přibližně po jednom a půl měsíci. Při provozu spolu se záložním zdrojem vychází návratnost mírně přes půl roku, což je způsobeno vysokou pořizovací cenou palivového článku, nicméně životnost zařízení je mnohonásobně delší a investice se tudíž vyplatí v obou případech.

Pro soupravu ve dvou různých konfiguracích bylo provedeno párové porovnání Saatyho metodou proti stávajícímu provedení. Hodnocena byla varianta využívající záložní napájení a varianta založená čistě na fotovoltaickém zdroji. Jako kritéria hodnocení byly zvoleny náklady na pořízení, montáž a servis, a dále náročnost montáže a servisu. Při celkovém skóre 39 % vychází jako celkově nejlepší druhá z uvedených, tedy varianta využívající pouze fotovoltaický zdroj.

Měření na testovací soupravě probíhají i nadále s cílem sestavit odběrové diagramy za období celého roku. Prozatím jsou dostupná data pouze z období leden–květen. Budou také provedeny další pokusy zaměřené na použití polykrystalického FV panelu namísto stávajícího monokrystalického. Posledním krokem k úspěšnému uvedení do provozu je schválení od Ředitelství silnic a dálnic ČR a Ministerstva dopravy ČR, což bude předmětem snažení v následujícím období.

Literatura

- [1] *MASTNÝ, Petr a kolektiv autorů. Obnovitelné zdroje elektrické energie.* 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. 256 s. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [2] *KŘIVÍK, Petr. Studijní podklady předmětu Obnovitelné zdroje energie.* FEKT VUT v Brně, 2020.
- [3] *Vzdělávací portál ČEZ, a.s. „Svět energie“* [online]. Dostupné z URL: <https://www.svetenergie.cz/cz/stahuj-zdarma/media-ke-stazeni>.
- [4] *Webové stránky SOLARGIS* [online]. Dostupné z URL: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/czech-republic>.
- [5] *BOUŠEK, Jaroslav. Elektronické součástky, skriptum.* FEKT VUT v Brně, 2015.
- [6] *LUQUE, Antonio; HEGEDUS, Steven. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering.* Wiley, 2003. 1179 s. ISBN 0-471-49196-9.
- [7] *VANĚK, Jiří; KŘIVÍK, Petr; NOVÁK, Vítězslav. Alternativní zdroje energie, skriptum.* FEKT VUT v Brně, 2006.
- [8] *SATPATHY, Rabindra; PAMURU, Venkateswarlu. Solar PV Power.* 1st edition. Academic Press, 2020. 520 s. ISBN 978-0-12-817626-9.
- [9] *McEVOY, Augustin; MARKVART, Tom; CASTANER, Luis. Practical Handbook of Photovoltaics.* 2nd edition. Academic Press, 2011. 1268 s. ISBN 978-0-12-385934-1.
- [10] *RADIL, Lukáš. Studijní podklady předmětu Nekonvenční přeměny.* FEKT VUT v Brně, 2020.
- [11] *Webová stránka Wikipedie – Shockley–Queisser limit.* [online]. [b.r.] [cit. 18. 11. 2020]. Dostupné z URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Shockley-Queisser_limit.
- [12] *CONIBEER, Gavin. Third-generation photovoltaics.* Materials Today, Volume 10, Issue 11, 11.2007, s. 42-50. ISSN 1369-7021.
- [13] *Webová stránka ABCtech.cz* [online]. [b.r.] Dostupné z URL: <https://www.abctech.cz/img/user/mono%20vs%20poly.jpg>.

- [14] *Webové stránky ČEZ, a.s. - solární kolektory* [online]. [b.r.] [cit. 20. 11. 2020]. Dostupné z URL:
<<https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k23.htm>>.
- [15] *XU, Xinhai a kolektiv autorů. Prospects and problems of concentrating solar power technologies for power generation in the desert regions.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 53, 06.2016, s. 1106-1131. ISSN 1364-0321.
- [16] *BRÁZDIL, M. Peltierovy články pro výrobu elektrické energie.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 69 s.
- [17] *STUDENÍK, Jiří a SVITAVSKÝ, Michal. Publi.cz: Energie větru, vody, biomasy* [online]. 2016 [cit. 21. 11. 2020]. ISBN 978-80-88058-08-3. Dostupné z URL:
<<https://publi.cz/books/90/Cover.html>>.
- [18] *ZHAO, Dan a kolektiv autorů. Wind Turbines and Aerodynamics Energy Harvesters.* 1st edition. Academic Press, 2019. 530 s. ISBN 978-0-12-817135-6.
- [19] *Webová stránka Wikipedie - Francis turbine* [online]. [b.r.] Dostupné z URL:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Francis_turbine>.
- [20] *Webová stránka Wikipedie - Kaplan turbine* [online]. [b.r.] Dostupné z URL:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Kaplan_turbine>.
- [21] *Webová stránka Wikipedie - Pelton wheel* [online]. [b.r.] Dostupné z URL:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Pelton_wheel>.
- [22] *Webová stránka Wikipedie - Cross-flow turbine* [online]. [b.r.] Dostupné z URL:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Cross-flow_turbine>.
- [23] *Webová stránka ústavu fyziky atmosféry AV ČR* [online]. [b.r.] Dostupné z URL:
<http://www.ufa.cas.cz/wp-content/uploads/2020/07/vetrna_mapa.gif>.
- [24] *VOBOŘIL, David. Biomasa - využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR.* [online]. 6.2.2017 [cit. 20. 5. 2021]. Dostupné z URL:
<<https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje-energie/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevyhody>>.
- [25] *Webová stránka Wikipedie - Zemské jádro* [online]. [b.r.] Dostupné z URL:
<https://cs.wikipedia.org/wiki/Zemsk%C3%A9_j%C3%A1dro>.

- [26] *GARCHE, J. a kolektiv autorů. Encyclopedia of Electrochemical Power Sources.* 1st edition. Elsevier Science, 2009. 4538 s. ISBN 978-0-44-452093-7.
- [27] *BURHEIM, Odne. Engineering Energy Storage.* 1st edition. Academic Press, 2017. 252 s. ISBN 978-0-12-814100-7.
- [28] *TICHÝ, Jiří. Lithiové akumulátory. Přehled základních typů a jejich vlastností.* [online]. 15.7.2019 [cit. 29. 11. 2020]. Dostupné z URL: <https://oze.tzbinfo.cz/akumulace-elektriny/13612-lithiove-akumulatory>.
- [29] *PORŠ, Zdeněk. Palivové články. Ústav Jaderného Výzkumu Řež, a.s.* [online]. 2002 [cit. 4. 12. 2020]. Dostupné z URL: www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf.
- [30] *PINTO, Alexandra; OLIVEIRA, Vania; FALCAO, Daniela. Direct Alcohol Fuel Cells for Portable Applications.* 1st edition. Academic Press, 2018. 353 s. ISBN 978-0-12-811849-8.
- [31] *AKAY, Ramiz; YURTCAN, Ayse. Direct Liquid Fuel Cells.* 1st edition. Academic Press, 2020. 328 s. ISBN 978-0-12-818624-4.
- [32] *FRIDRICH, Jiří. DC/DC měnič pro záložní zdroje se superkapacitory.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019. 50 s.
- [33] *Webová stránka Wikipedie - Superconducting magnetic energy storage* [online]. [b.r.] [cit. 4. 12. 2020]. Dostupné z URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Superconducting_magnetic_energy_storage.
- [34] *Reserve Power. SPB Batteries.* [online]. Systems Sunlight S.A., [b.r.], [cit. 15. 4. 2021]. Dostupné z URL: https://www.systems-sunlight.com/wp-content/uploads/2019/09/sunlight_spb_12pages_210x295_final_web_mones.pdf.
- [35] *MAREŠ, Jiří. Ochrana ocelových konstrukcí proti korozi.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 39 s.
- [36] *EFOY Pro - Operation and installation Manual.* [online]. SFC Energy A.G., ©2019, [cit. 17. 4. 2021]. Dostupné z URL: <https://www.efoy-pro.com/wp-content/uploads/sites/10/user-manual-efoy-pro-800-2400-2nd-generation-en.pdf>.

- [37] *Datasheet SunForte PM096B00*. [online]. AU Optronics corp., ©2018, [cit. 17. 4. 2021]. Dostupné z URL:
<https://gbc-solino.cz/wp-content/uploads/2018/07/AUO_BENQ_PM096B00_DATASHEET_EN.pdf>.
- [38] *JURÁŇ, František. Ocelová svodidla ArcelorMittal*. ArcelorMittal Ostrava, a. s. [online]. 6.2015 [cit. 11. 12. 2020]. Dostupné z URL:
<https://libertyostrava.cz/app/uploads/2019/12/TPV-167_2015-prostorove-usporadani.pdf>.
- [39] *MPPT solar charger manual*. [online]. Victron Energy B.V., 3.2021, [cit. 17. 4. 2021]. Dostupné z URL:
<https://www.victronenergy.com/upload/documents/Manual_BlueSolar_100-30__100-50/MPPT_solar_charger_manual-en.pdf>.
- [40] *Datasheet – EFOY Fuel Cartridges*. [online]. SFC Energy A.G., 6.2018, [cit. 17. 4. 2021]. Dostupné z URL:
<<https://www.efoy-pro.com/wp-content/uploads/sites/10/datasheet-efoy-fuel-cartridges.pdf>>.
- [41] *Ředitelství silnic a dálnic ČR. PPK-PRE*. [online]. 3.2019 [cit. 11. 12. 2020]. Dostupné z URL:
<https://www.rsd.cz/wps/wcm/connect/0c99ac31-0e87-4e79-b43d-7920a69f29b7/PPK_PRE_03-19.pdf?MOD=AJPERES>.
- [42] *Energy meter for direct current*. [online]. Müller Ziegler GmbH, [b.r.], [cit. 16. 5. 2021]. Dostupné z URL:
<https://www.mueller-ziegler.de/fileadmin/user_upload/EN/Energy_meters/MuellerZiegler_Energy_meters_EZG-S0.pdf>.
- [43] *ATS-C1532. Regulátor a monitor spotřeby*. [online]. PK-ELSYS, 10.6.2008, [cit. 16. 5. 2021]. Dostupné z URL:
<<https://www.pk-elsys.cz/storage/app/media/doc/ATS-C1532ver3.pdf>>.
- [44] *PRx2P – návod k obsluze*. [online]. PK-ELSYS, [b.r.], [cit. 16. 5. 2021]. Dostupné z URL:
<<https://www.pk-elsys.cz/storage/app/media/doc/PRx2P.pdf>>.
- [45] *Datasheet PB1000*. [online]. MEAN WELL Enterprises Co. Ltd., 30.10.2020, [cit. 17. 4. 2021]. Dostupné z URL:
<<https://www.meanwell.com/webapp/product/search.aspx?prod=PB-1000>>.

- [46] *Webová stránka Wikipedie - Saatyho metoda* [online]. [b.r.] [cit. 18.12.2020]. Dostupné z URL:
<https://cs.wikipedia.org/wiki/Saatyho_metoda>.
- [47] *Webová stránka Wikipedie - Analytic hierarchy process - leader example* [online]. [b.r.] [cit. 18.12.2020]. Dostupné z URL:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Analytic_hierarchy_process_%E2%80%93_leader_example>.
- [48] *PARASKEVOPOULOS, Konstantinos. The Analytic Hierarchy Process.* International Hellenic University. [online]. [b.r.] [cit. 18.12.2020]. Dostupné z URL:
<http://rad.ihu.edu.gr/fileadmin/labsfiles/decision_support_systems/lessons/ahp/AHP_Lesson_1.pdf>.

Seznam symbolů a zkratek

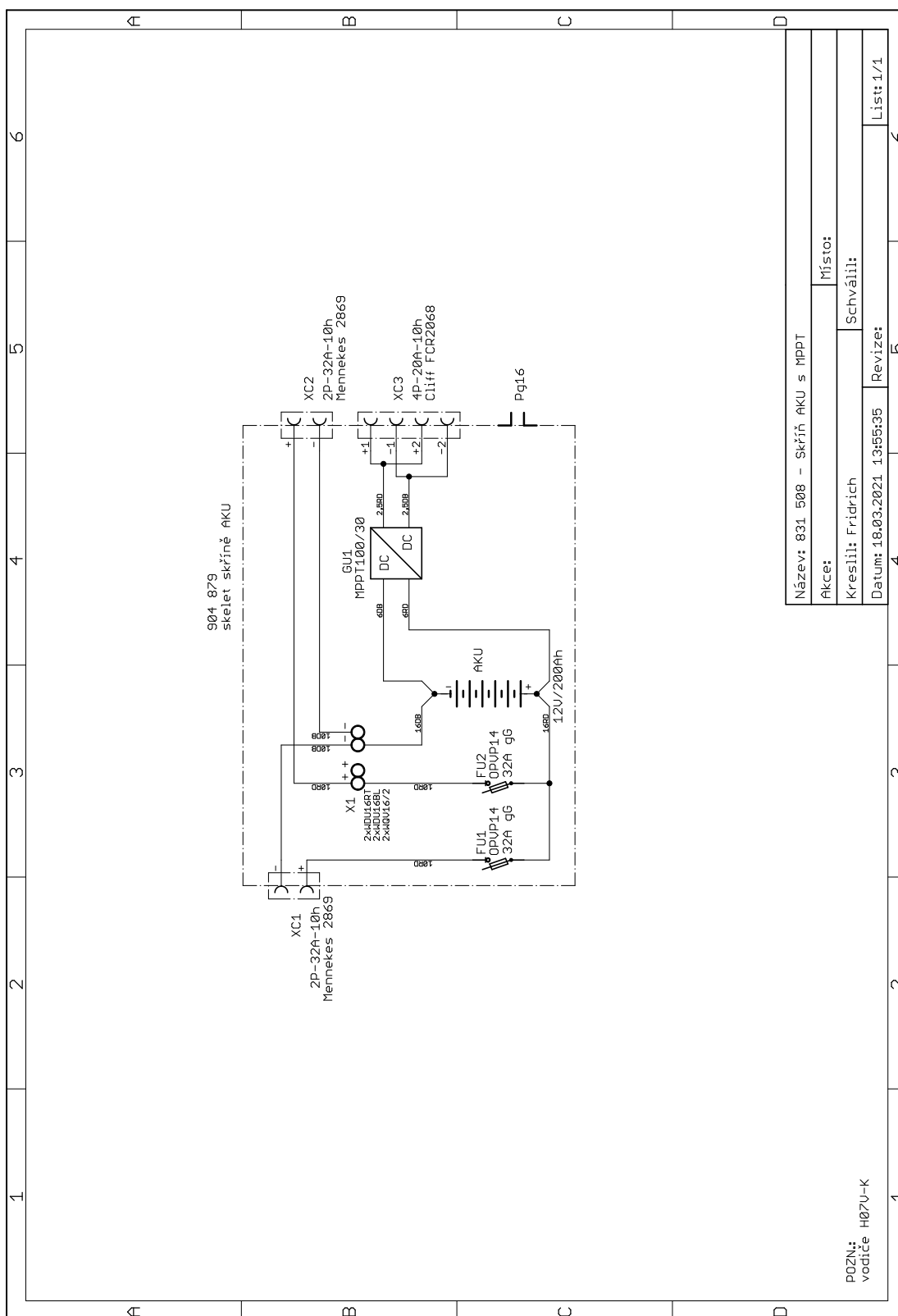
A	plocha
A 15	symbol dopravního značení - práce na silnici
AFC	alkalický palivový článek
AGM	akumulátor s vázaným elektrolytem (Absorbent Glass Mat)
AKU	akumulátor
AlSb	antimonid hlinitý (Aluminium antimonide)
AM	součinitel hmoty vzduchu (Air Mass)
c	rychlost světla
CAES	ukládání energie do stlačeného vzduchu (Compressed Air Energy Storage)
CdTe	tellurid kademnatý (Cadmium telluride)
cp	součinitel výkonnosti
ČR	Česká republika
D	průměr
D.o.D.	hloubka vybití (Depth of Discharge)
DMFC	přímý methanolový palivový článek
E	energie
E 3a	symbol dopravního značení - vzdálenost k cíli
f	kmitočet
F	síla
FC	palivový článek
FF	činitel plnění (Fill Factor)
FV	fotovoltaika
g	gravitační zrychlení

GaAs	arsenid gallitý (Gallium arsenide)
h	Planckova konstanta
H	spád
H_2SO_4	kyselina sírová
CH_3OH	methanol
I	elektrický proud
I_0	solární konstanta
I_{MPP}	proud v bodě max. výkonu
InP	fosfid inditý (Indium phosphide)
I_{SC}	proud nakrátko
J	moment sertvačnosti
Kč	česká koruna
KOH	hydroxid draselný
l	délka
LAN	lokální počítačová síť (Local Area Network)
LED	světlo emitující dioda
$LiFePO_4$	lithium-železo-fosfátový akumulátor
Li-ion	lithium-iontový akumulátor
Li-pol	lithium-polymerový akumulátor
m	hmotnost
M	moment síly
MCFC	palivový článek s roztavenými uhličitany
MPP	bod max. výkonu (Maximum Power Point)
MPPT	sledování bodu max. výkonu (Maximum Power Point Tracking)
N	polovodič s elektronovou vodivostí

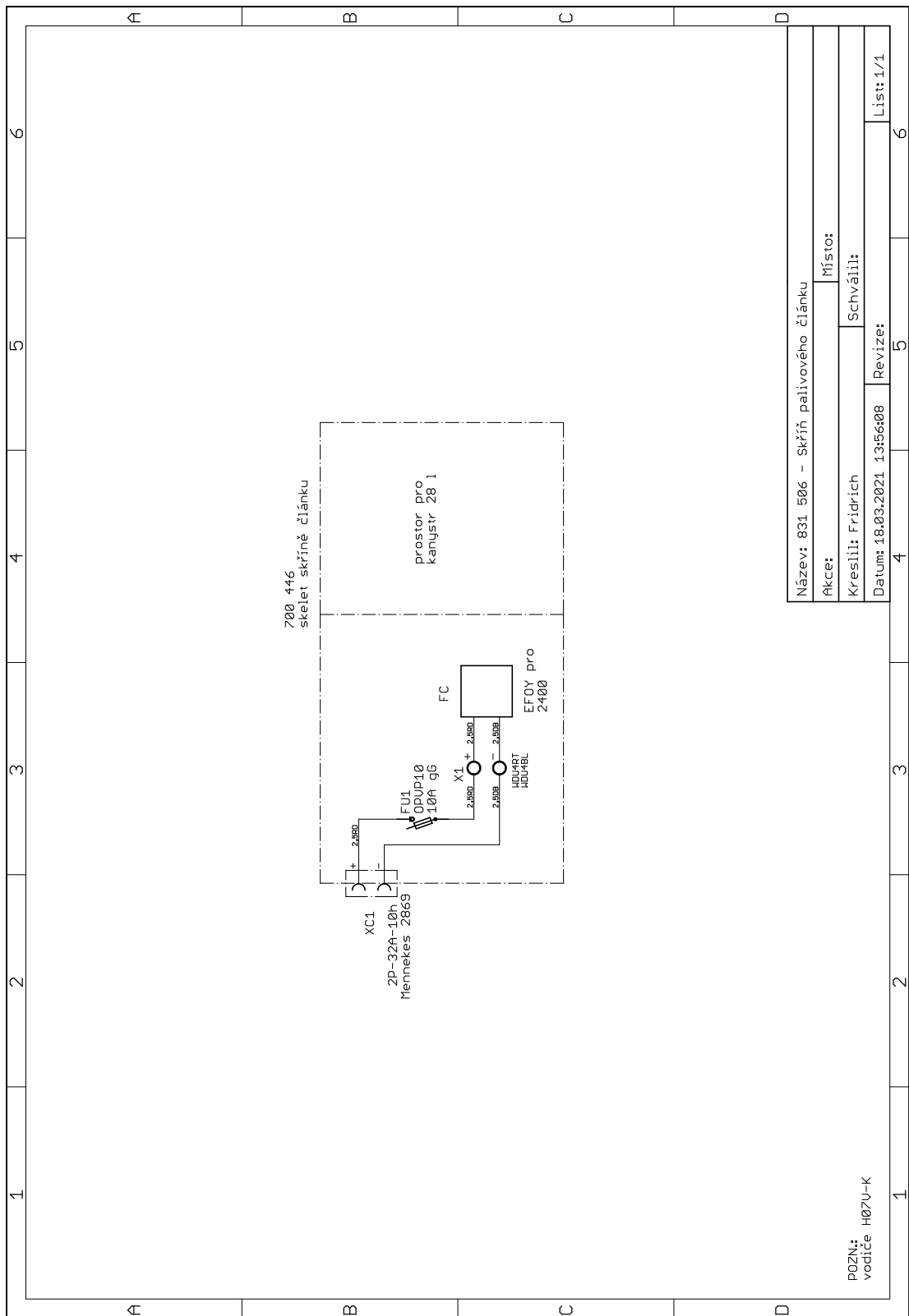
Ni-Cd	nikl-kadmiový akumulátor
Ni-MH	nikl-metal hydridový akumulátor
OSNH ₄	typ silničního svodidla
<i>p</i>	tlak
P	polovodič s děrovou vodivostí
<i>P</i>	výkon
PAFC	palivový článek s kyselinou fosforečnou
PbO ₂	oxid olovičitý
PbSO ₄	síran olovnatý
PDZ	proměnná dopravní značka
PEFC	palivový článek s tuhými polymery
pH	vodíkový exponent (potential of Hydrogen)
PLC	programovatelný logický automat (Programmable Logic Controller)
PPK	požadavky na provedení a kvalitu
<i>Q</i>	průtok, teplo
<i>r</i>	poloměr
RAL	standard pro stupnici barevných odstínů
<i>S</i>	plocha
S 7	symbol dopravního značení – přerušované žluté světlo
SiO ₂	oxid křemičitý
SLI	typ akumulátoru (Starting, Lighting, Ignition)
SMES	ukládání energie do supravodivých cívek (Superconducting Magnetic Energy Storage)
SOFC	palivový článek s tuhými oxidy
STC	standardní testovací podmínky

T	termodynamická teplota
U	elektrické napětí
U_{MPP}	napětí v bodě max. výkonu
U_{OC}	napětí naprázdno
USD	americký dolar
v	rychlost
VRLA	ventilem řízený olověný akumulátor (Valve Regulated Lead Acid)
Z	součinitel znečištění
α	Seebeckův koeficient
β	Seebeckův koeficient
η	účinnost
θ_z	úhel sklonu slunce od zenitu
λ	vlnová délka
ρ	hustota
ω	úhlová rychlost

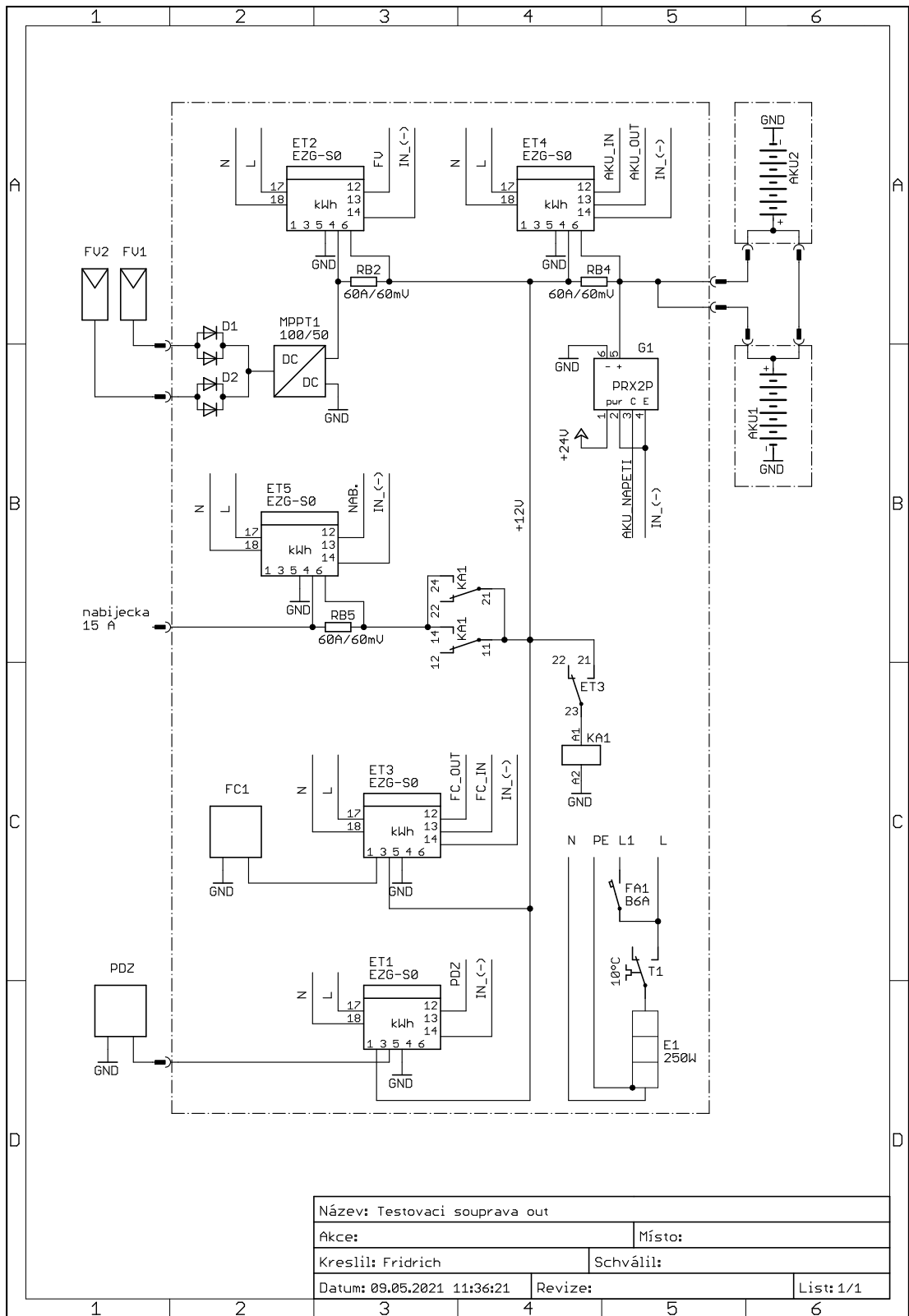
A Schémata zapojení



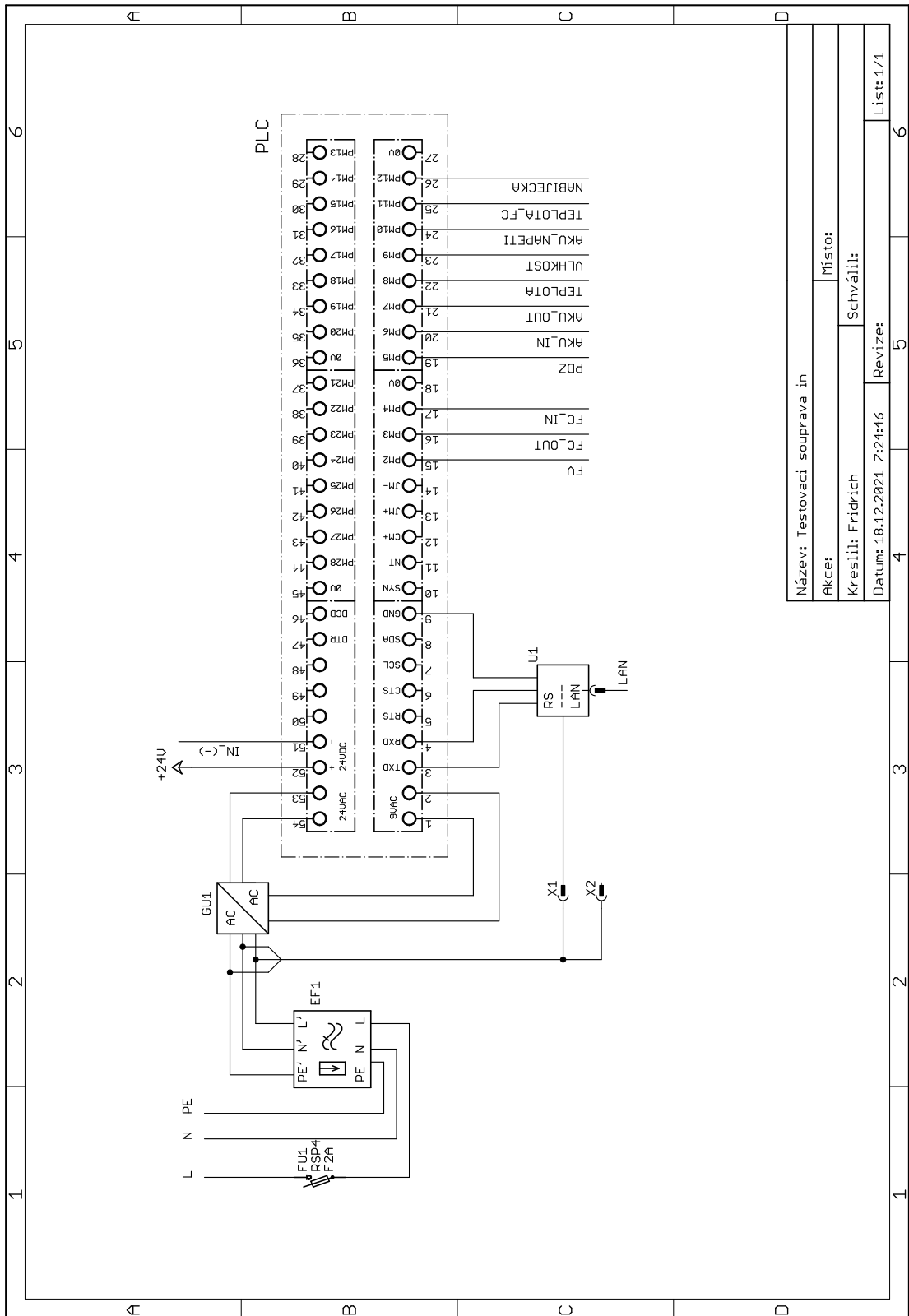
Obr. A.1: Schéma zapojení AKU skříňně



Obr. A.2: Schéma zapojení skříně palivového článku

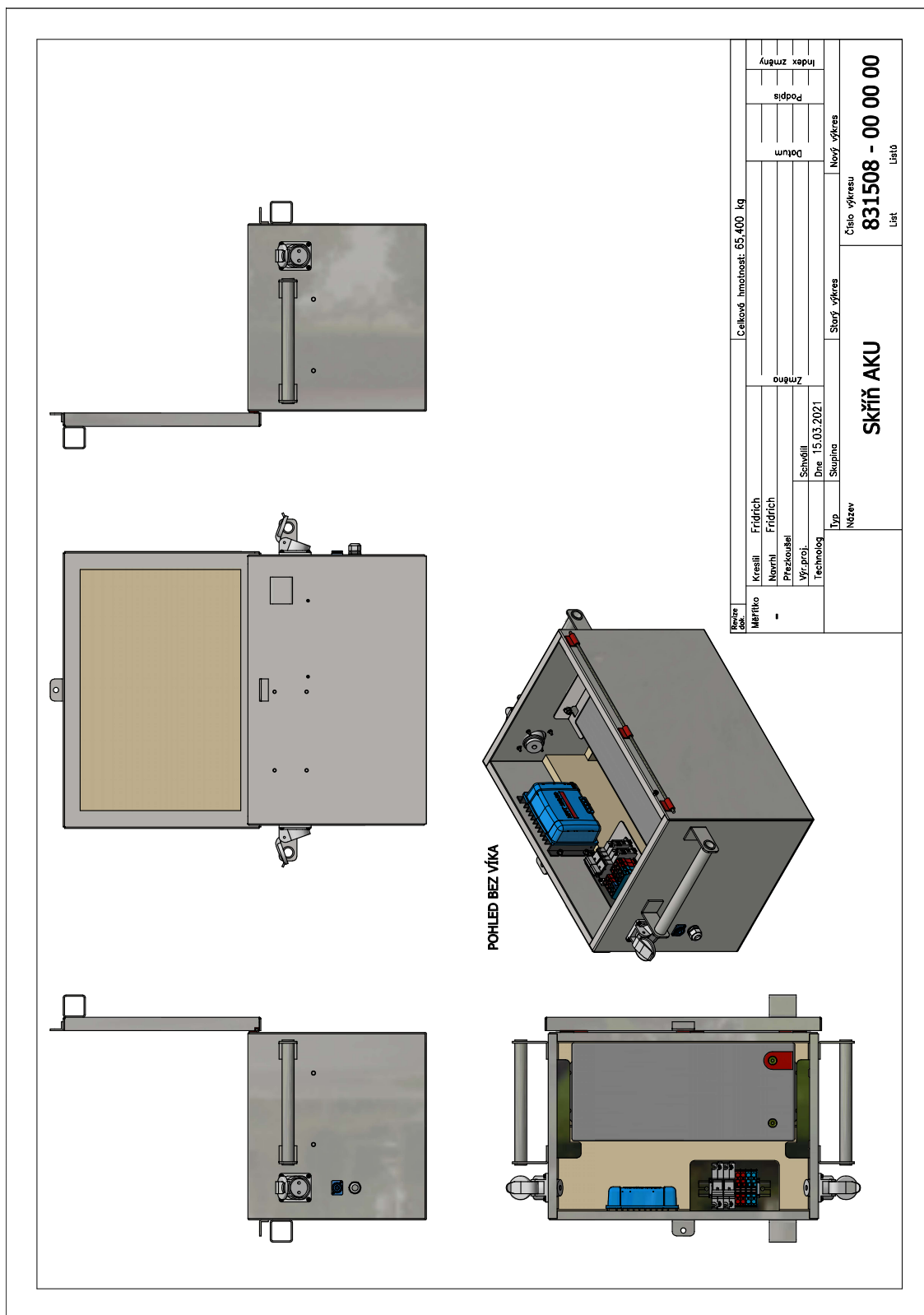


Obr. A.3: Schéma zapojení testovací soupravy - vnější části

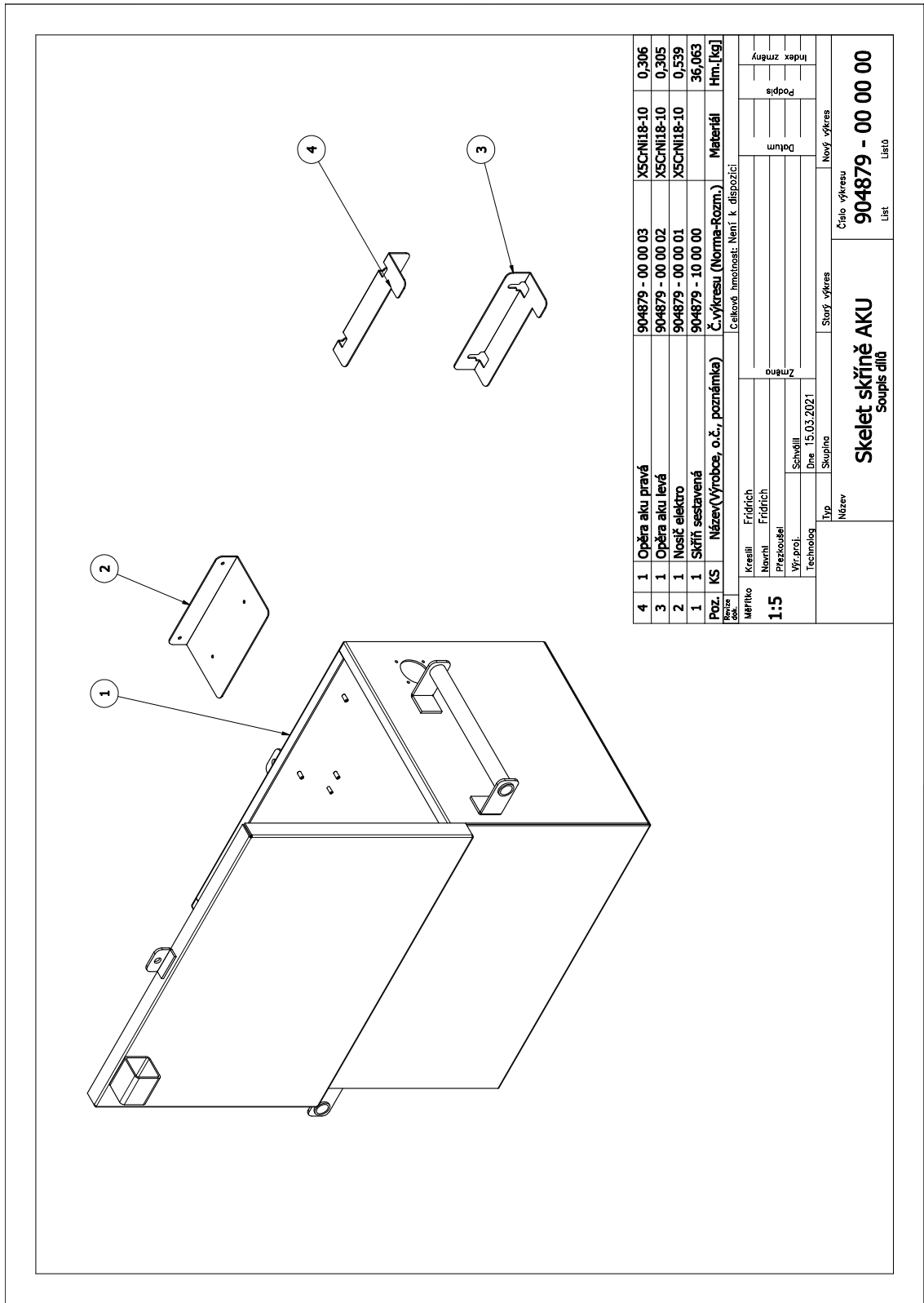


Název: Testovací souprava in	
Akce:	Místo:
Kreslil: Fridrich	Schválil:
Datum: 18.12.2021 7:24:46	Revize:
List: 1/1	

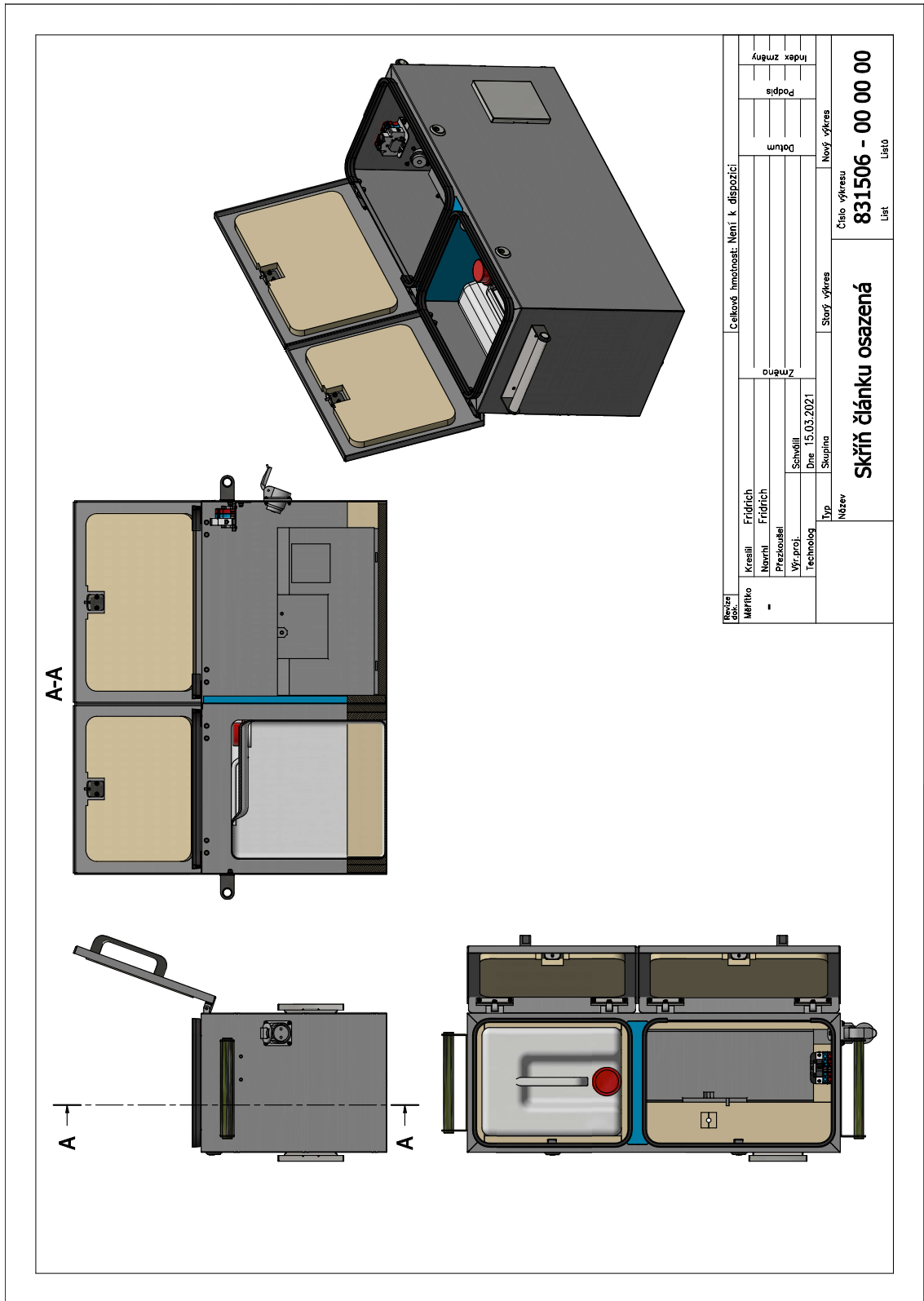
Obr. A.4: Schéma zapojení testovací soupravy - vnitřní části



Obr. B.2: Skříň akumulátoru



Obr. B.3: Skelet skříně akumulátoru



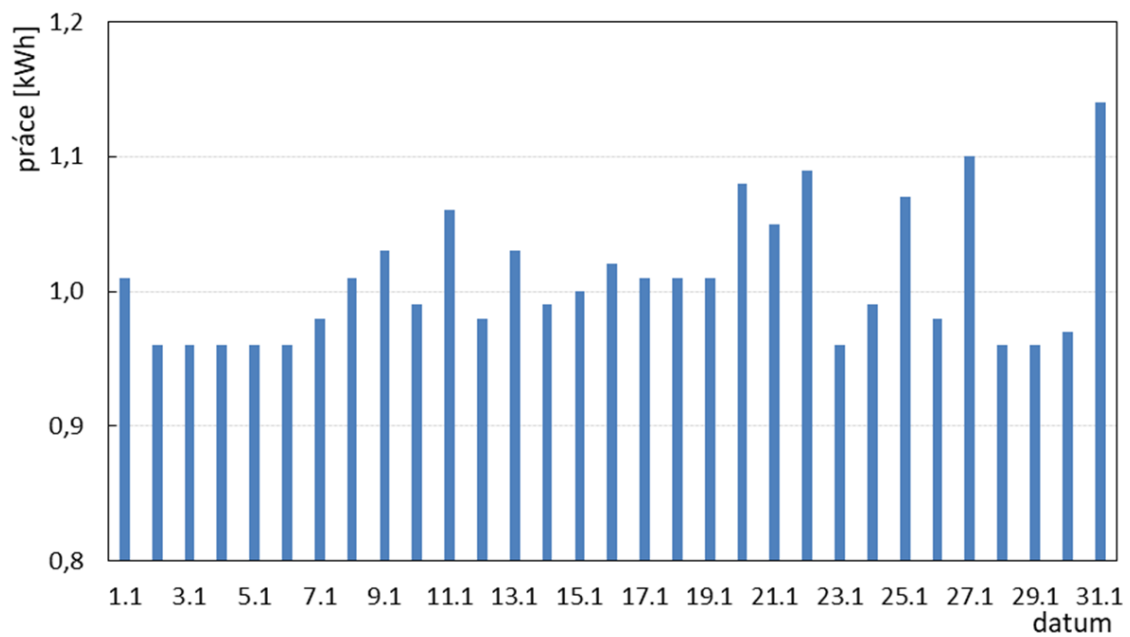
Revize číslo	Měřítko	Kreslí	Frdrich	Celková hmotnost:	Není k dispozici
-	-	Návrh	Frdrich	Změna	
		Projedl		Datum	
		Wzrost		Podpis	
		Technolog	Schwell	Nový výkres	
			Dne 15.03.2021	Starý výkres	
			Skupina	Číslo výkresu	831506 - 00 00 00
			Název	Líst	Líst

Obr. B.4: Skříň palivového článku

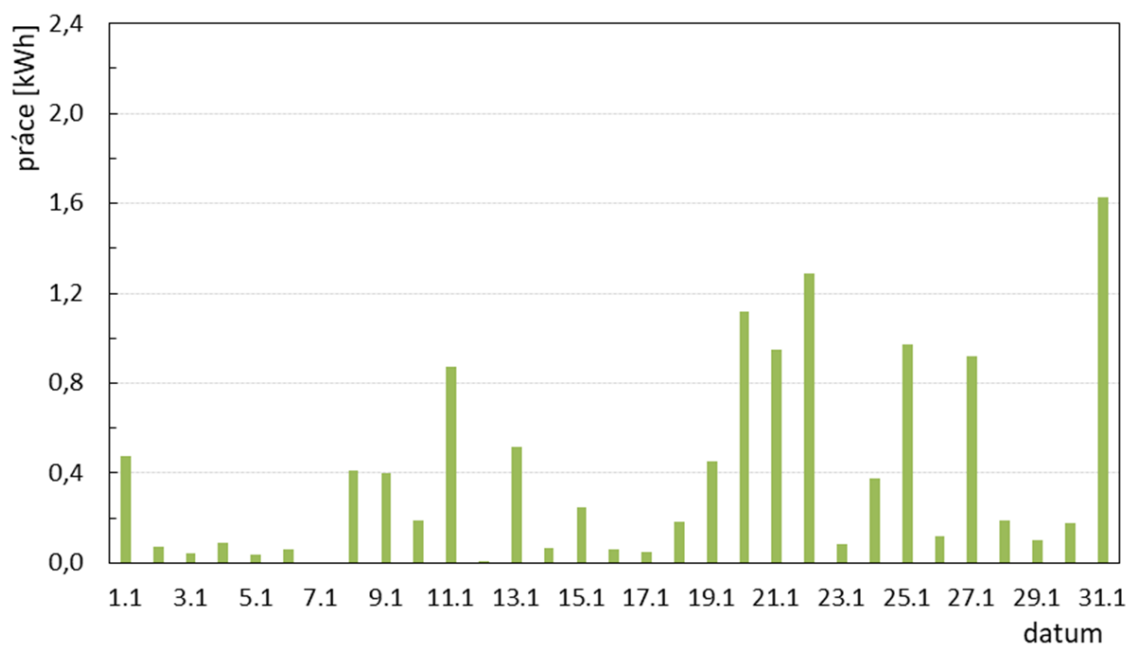
C Odběrové diagramy

Tab. C.1: Měsíční odběrový diagram (kWh) - leden

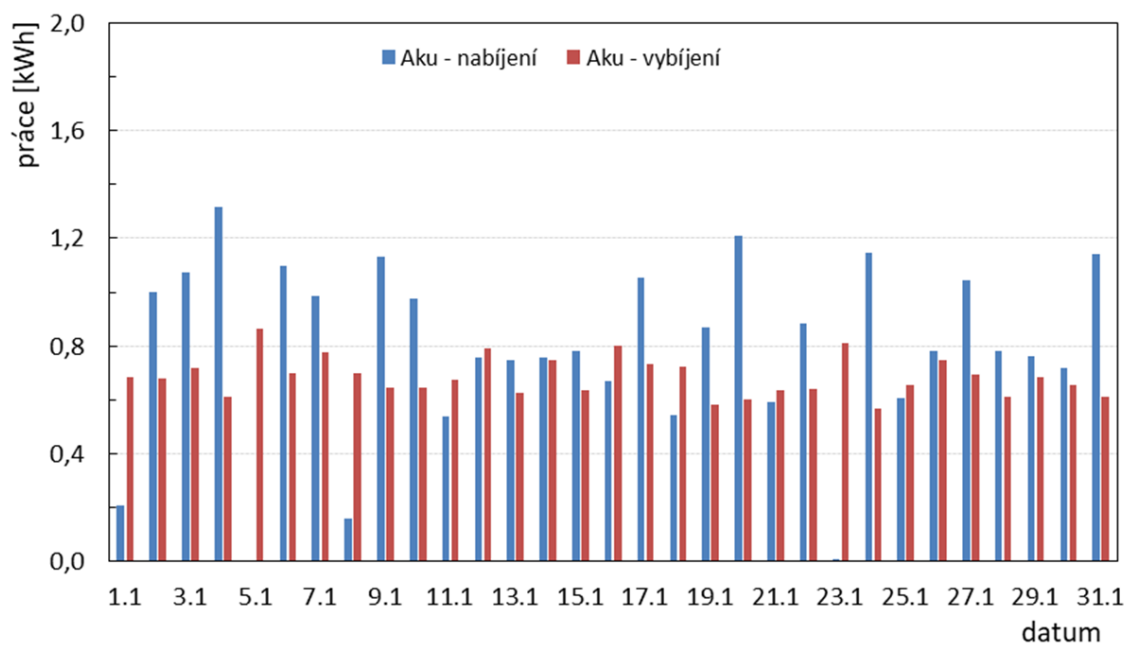
Den	PDZ	Fotovoltaika	Aku - vybíjení	Aku - nabíjení	FC - dodávka	Nabíječka
1.1	1,010	0,477	0,683	0,207	0,000	0,000
2.1	0,960	0,071	0,681	1,001	0,423	0,732
3.1	0,960	0,046	0,718	1,072	0,443	0,769
4.1	0,960	0,088	0,611	1,319	0,556	0,964
5.1	0,960	0,038	0,862	0,000	0,000	0,000
6.1	0,960	0,060	0,699	1,099	0,456	0,791
7.1	0,980	0,000	0,777	0,987	0,417	0,722
8.1	1,010	0,413	0,700	0,158	0,000	0,000
9.1	1,030	0,401	0,644	1,131	0,392	0,679
10.1	0,990	0,191	0,643	0,975	0,392	0,678
11.1	1,060	0,874	0,676	0,537	0,000	0,000
12.1	0,980	0,011	0,791	0,756	0,318	0,551
13.1	1,030	0,515	0,628	0,747	0,207	0,360
14.1	0,990	0,064	0,747	0,758	0,319	0,553
15.1	1,000	0,248	0,635	0,781	0,306	0,529
16.1	1,020	0,060	0,800	0,668	0,280	0,484
17.1	1,010	0,051	0,731	1,054	0,445	0,772
18.1	1,010	0,181	0,722	0,545	0,216	0,375
19.1	1,010	0,451	0,581	0,869	0,289	0,500
20.1	1,080	1,119	0,600	1,207	0,186	0,322
21.1	1,050	0,950	0,634	0,592	0,000	0,000
22.1	1,090	1,289	0,638	0,885	0,000	0,000
23.1	0,960	0,087	0,812	0,001	0,000	0,000
24.1	0,990	0,374	0,569	1,148	0,418	0,722
25.1	1,070	0,971	0,652	0,604	0,000	0,000
26.1	0,980	0,117	0,746	0,780	0,309	0,535
27.1	1,100	0,922	0,696	1,046	0,174	0,301
28.1	0,960	0,187	0,613	0,780	0,327	0,567
29.1	0,960	0,103	0,684	0,764	0,321	0,557
30.1	0,970	0,176	0,653	0,716	0,292	0,505
31.1	1,140	1,627	0,613	1,143	0,000	0,000
min.	0,960	0,000	0,569	0,000	0,000	0,000
max.	1,140	1,627	0,862	1,319	0,556	0,964
průměr	1,009	0,392	0,685	0,785	0,241	0,418
suma	31,280	12,155	21,235	24,328	7,483	12,965



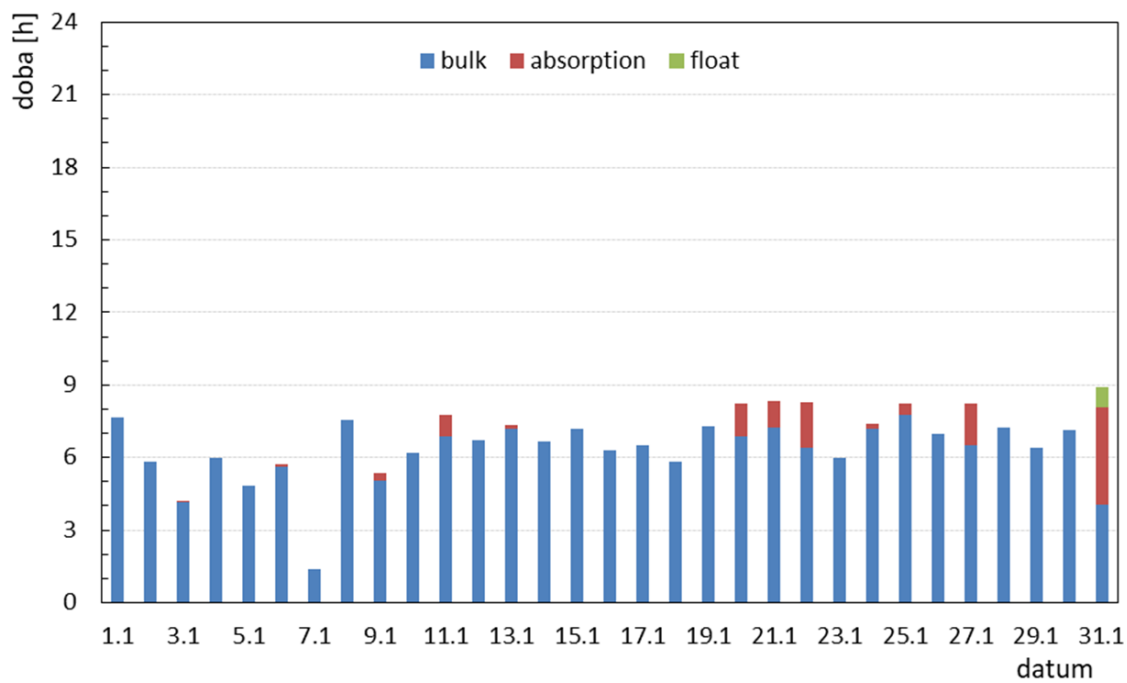
Obr. C.1: Odběr PDZ - leden



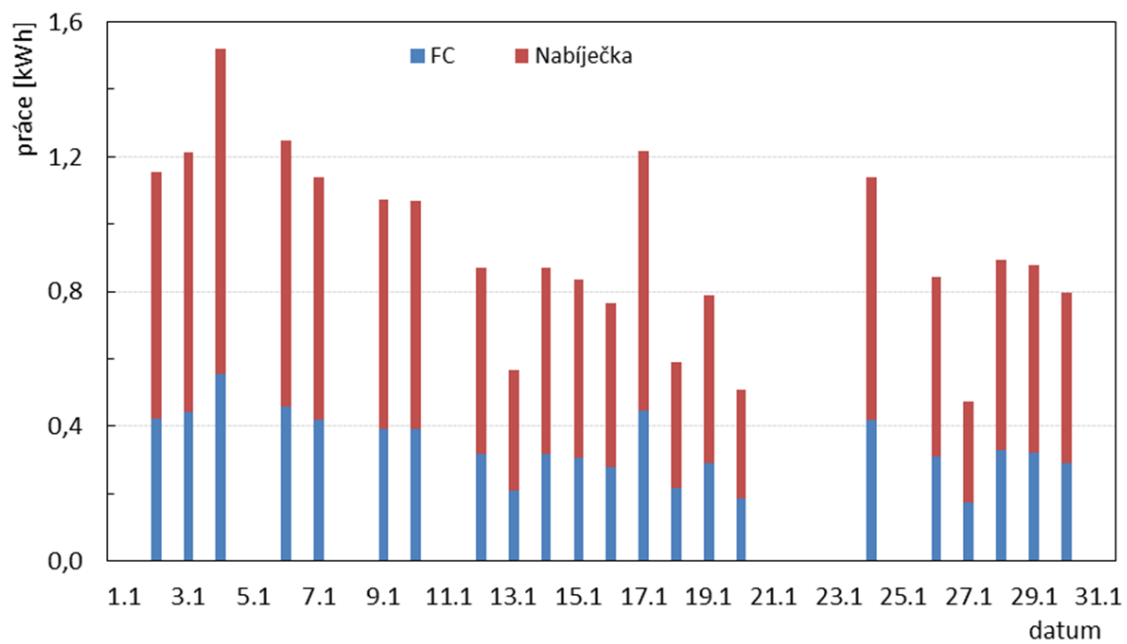
Obr. C.2: Dodávka FV - leden



Obr. C.3: Energetické toky AKU - leden



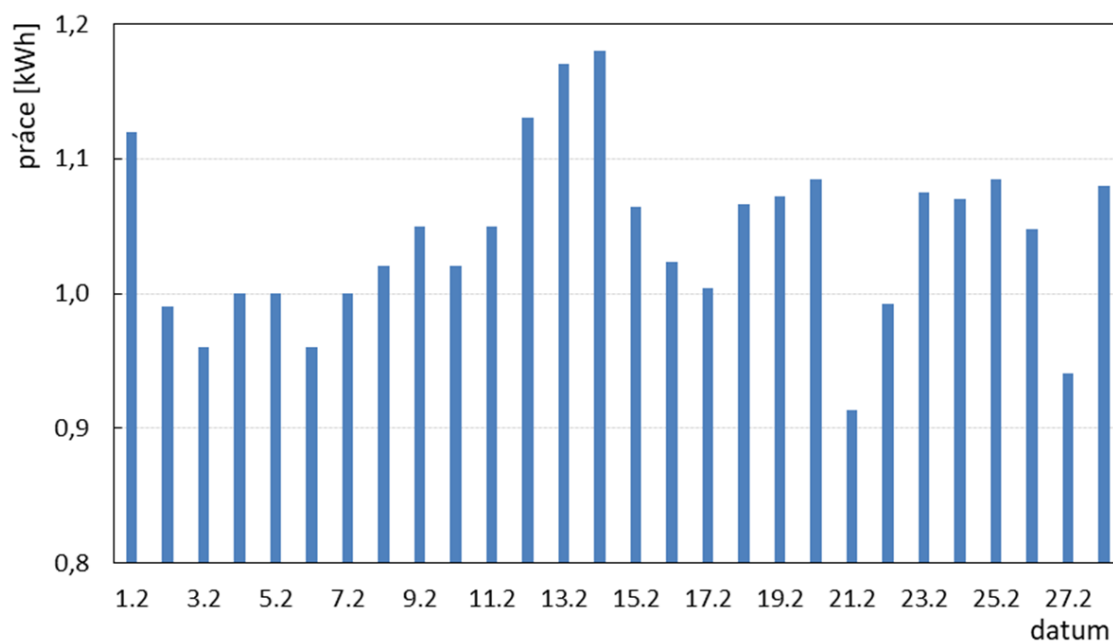
Obr. C.4: Stupeň nabití AKU - leden



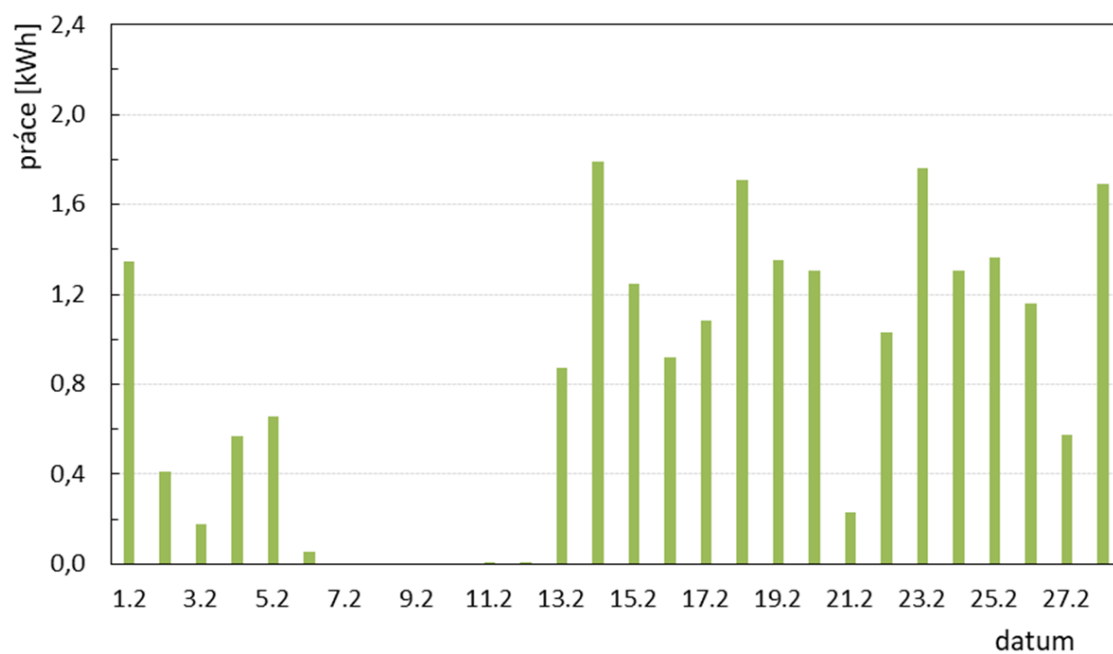
Obr. C.5: Dodávka z externích zdrojů - leden

Tab. C.2: Měsíční odběrový diagram (kWh) - únor

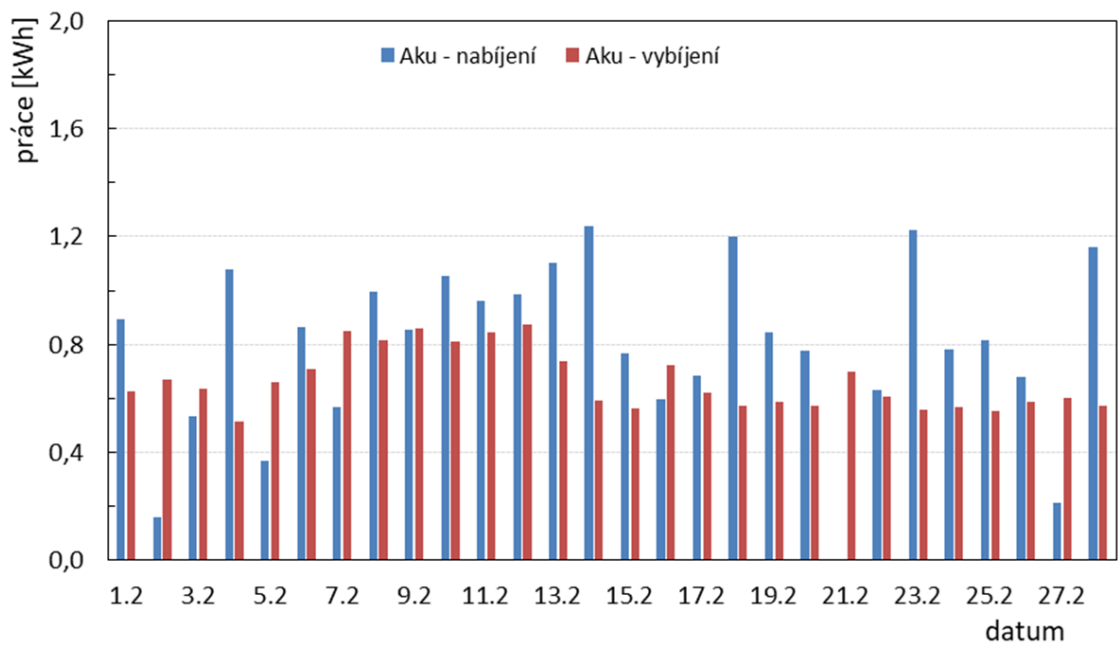
Den	PDZ	Fotovoltaika	Aku - vybíjení	Aku - nabíjení	FC - dodávka	Nabíječka
1.2	1,120	1,346	0,625	0,895	0,000	0,000
2.2	0,990	0,411	0,671	0,159	0,000	0,000
3.2	0,960	0,179	0,633	0,533	0,224	0,388
4.2	1,000	0,569	0,511	1,077	0,344	0,597
5.2	1,000	0,655	0,660	0,367	0,000	0,000
6.2	0,960	0,057	0,709	0,862	0,363	0,628
7.2	1,000	0,000	0,849	0,568	0,246	0,425
8.2	1,020	0,000	0,814	0,993	0,429	0,742
9.2	1,050	0,000	0,857	0,856	0,367	0,638
10.2	1,020	0,000	0,809	1,053	0,451	0,782
11.2	1,050	0,001	0,844	0,962	0,415	0,718
12.2	1,130	0,004	0,874	0,988	0,432	0,750
13.2	1,170	0,873	0,737	1,104	0,222	0,385
14.2	1,180	1,792	0,593	1,241	0,000	0,000
15.2	1,065	1,246	0,563	0,767	0,000	0,000
16.2	1,023	0,922	0,724	0,598	0,000	0,000
17.2	1,004	1,084	0,619	0,684	0,000	0,000
18.2	1,066	1,706	0,570	1,201	0,000	0,000
19.2	1,072	1,350	0,586	0,845	0,000	0,000
20.2	1,085	1,308	0,572	0,777	0,000	0,000
21.2	0,913	0,230	0,696	0,000	0,000	0,000
22.2	0,992	1,032	0,608	0,628	0,000	0,000
23.2	1,075	1,759	0,559	1,224	0,000	0,000
24.2	1,070	1,305	0,565	0,782	0,000	0,000
25.2	1,085	1,364	0,555	0,817	0,000	0,000
26.2	1,048	1,158	0,584	0,677	0,000	0,000
27.2	0,941	0,574	0,599	0,212	0,000	0,000
28.2	1,080	1,688	0,570	1,159	0,000	0,000
min.	0,913	0,000	0,511	0,000	0,000	0,000
max.	1,180	1,792	0,874	1,241	0,451	0,782
průměr	1,042	0,807	0,663	0,787	0,125	0,216
suma	29,168	22,607	18,553	22,023	3,492	6,052



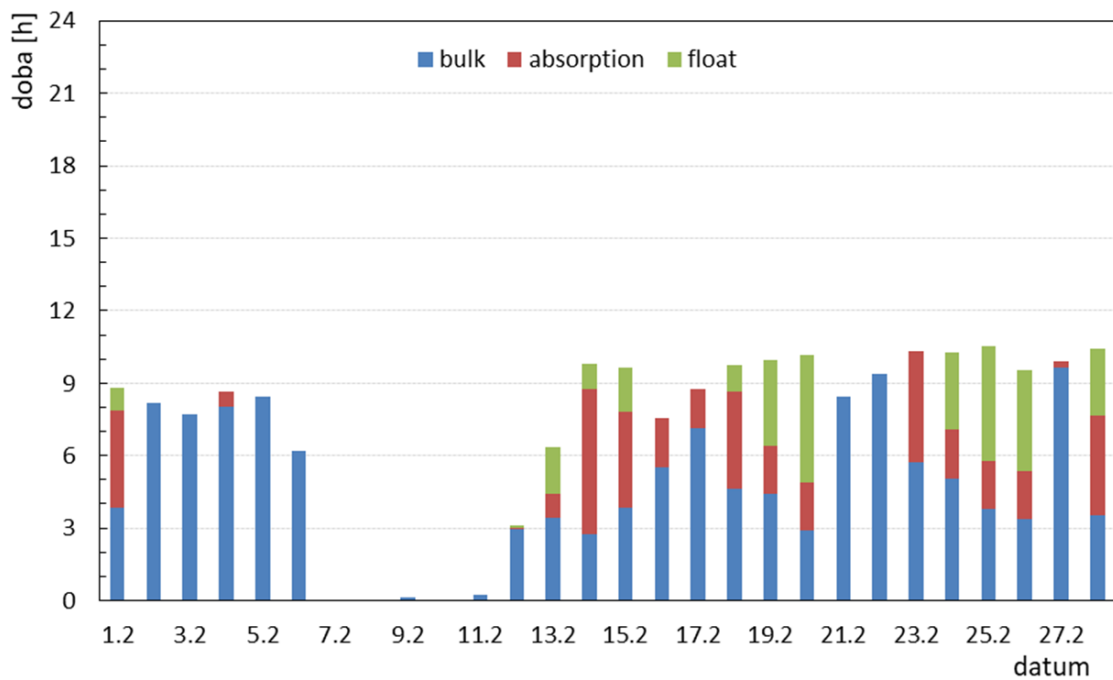
Obr. C.6: Odběr PDZ - únor



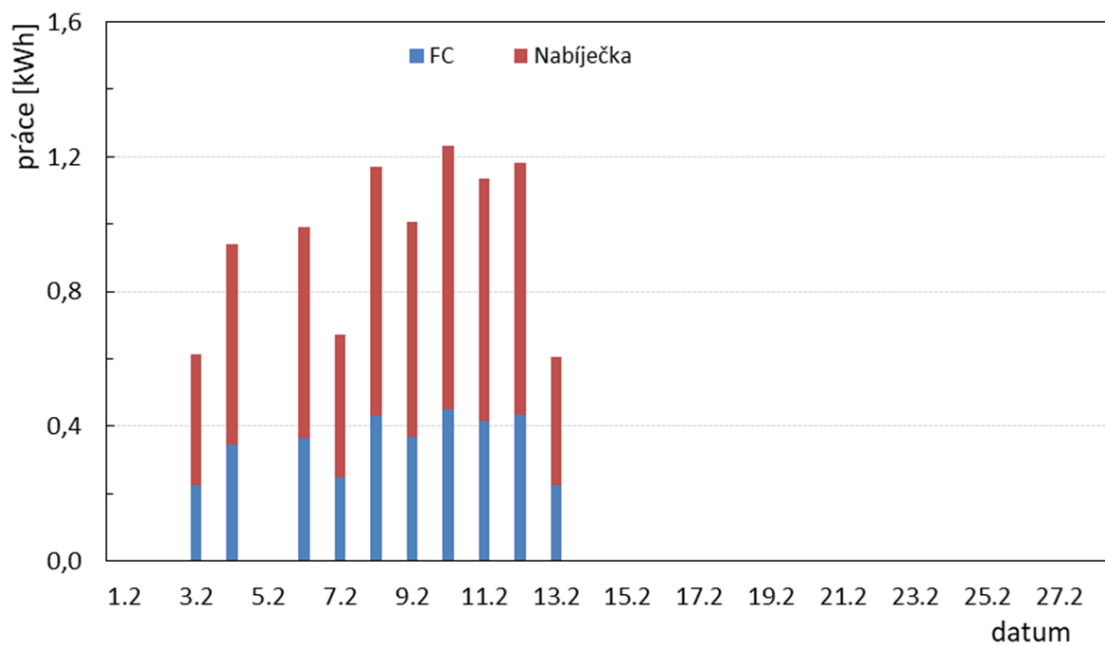
Obr. C.7: Dodávka FV - únor



Obr. C.8: Energetické toky AKU - únor



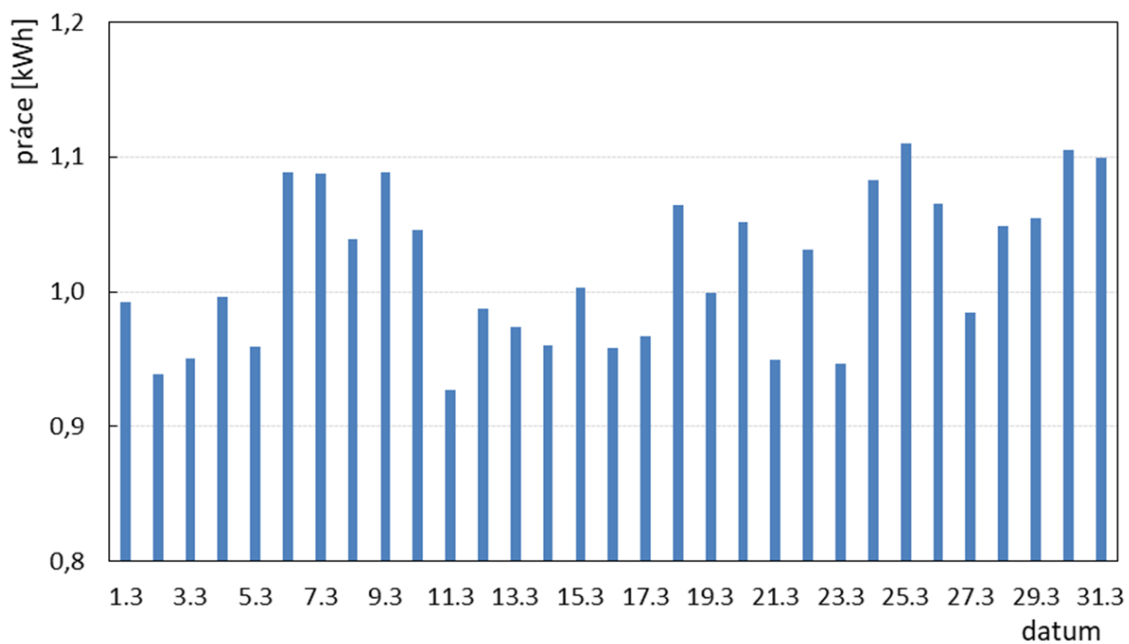
Obr. C.9: Stupeň nabití AKU - únor



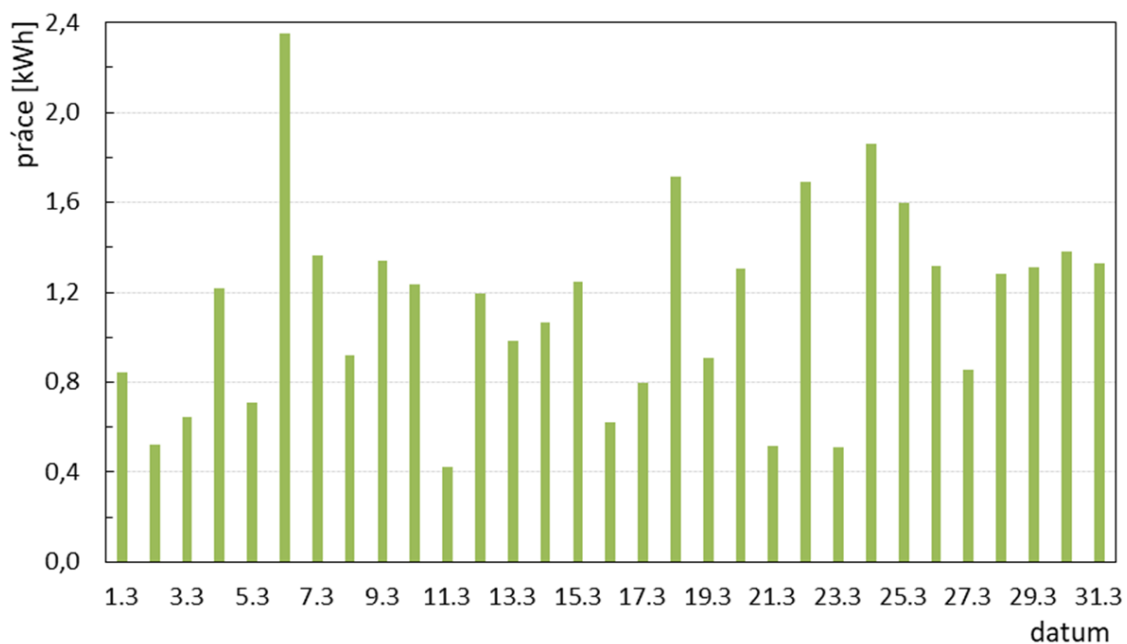
Obr. C.10: Dodávka z externích zdrojů - únor

Tab. C.3: Měsíční odběrový diagram (kWh) - březen

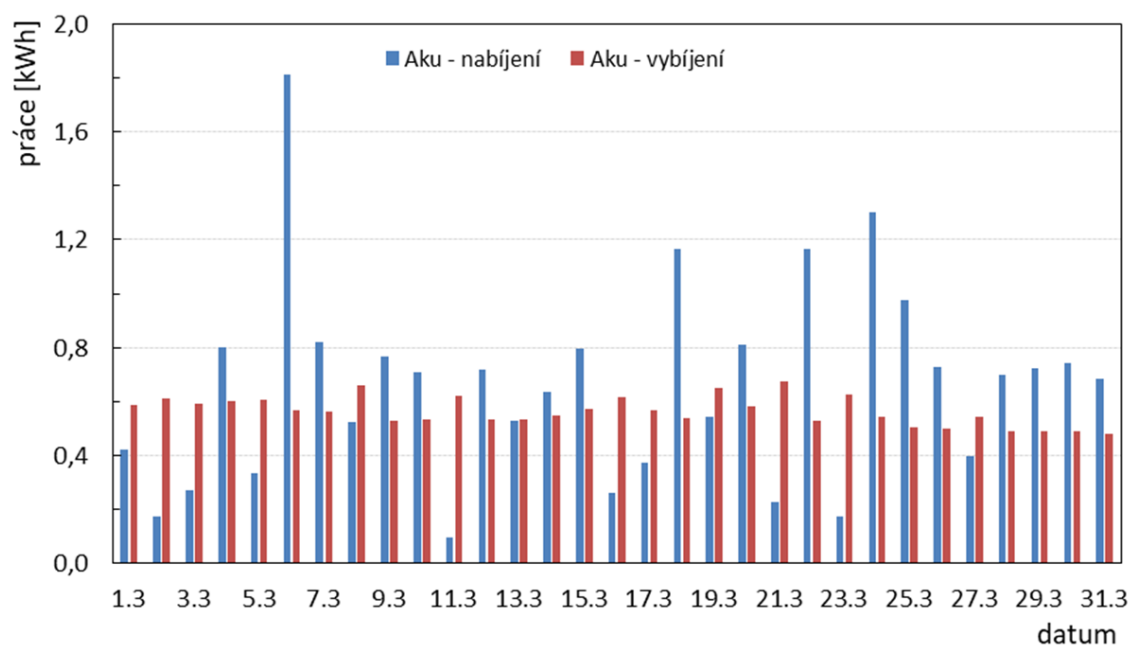
Den	PDZ	Fotovoltaika	Aku - vybití	Aku - nabíjení	FC - dodávka	Nabíječka
1.3	0,992	0,845	0,587	0,421	0,000	0,000
2.3	0,938	0,520	0,609	0,172	0,000	0,000
3.3	0,950	0,648	0,591	0,269	0,000	0,000
4.3	0,996	1,216	0,602	0,801	0,000	0,000
5.3	0,959	0,708	0,607	0,333	0,000	0,000
6.3	1,088	2,351	0,567	1,811	0,000	0,000
7.3	1,087	1,364	0,562	0,819	0,000	0,000
8.3	1,039	0,918	0,661	0,522	0,000	0,000
9.3	1,089	1,343	0,530	0,765	0,000	0,000
10.3	1,046	1,235	0,535	0,708	0,000	0,000
11.3	0,927	0,421	0,620	0,094	0,000	0,000
12.3	0,987	1,196	0,533	0,719	0,000	0,000
13.3	0,973	0,986	0,534	0,527	0,000	0,000
14.3	0,961	1,068	0,548	0,634	0,000	0,000
15.3	1,003	1,245	0,571	0,795	0,000	0,000
16.3	0,959	0,622	0,617	0,260	0,000	0,000
17.3	0,967	0,795	0,566	0,374	0,000	0,000
18.3	1,064	1,715	0,538	1,166	0,000	0,000
19.3	0,999	0,908	0,652	0,541	0,000	0,000
20.3	1,052	1,307	0,579	0,811	0,000	0,000
21.3	0,950	0,519	0,675	0,228	0,000	0,000
22.3	1,031	1,690	0,530	1,168	0,000	0,000
23.3	0,946	0,509	0,627	0,173	0,000	0,000
24.3	1,083	1,861	0,542	1,300	0,000	0,000
25.3	1,110	1,599	0,504	0,974	0,000	0,000
26.3	1,065	1,315	0,497	0,726	0,000	0,000
27.3	0,985	0,858	0,544	0,397	0,000	0,000
28.3	1,049	1,280	0,490	0,699	0,000	0,000
29.3	1,055	1,312	0,491	0,725	0,000	0,000
30.3	1,105	1,382	0,490	0,743	0,000	0,000
31.3	1,099	1,328	0,480	0,683	0,000	0,000
min.	0,927	0,421	0,480	0,094	0,000	0,000
max.	1,110	2,351	0,675	1,811	0,000	0,000
průměr	1,018	1,131	0,564	0,657	0,000	0,000
suma	31,553	35,062	17,475	20,355	0,000	0,000



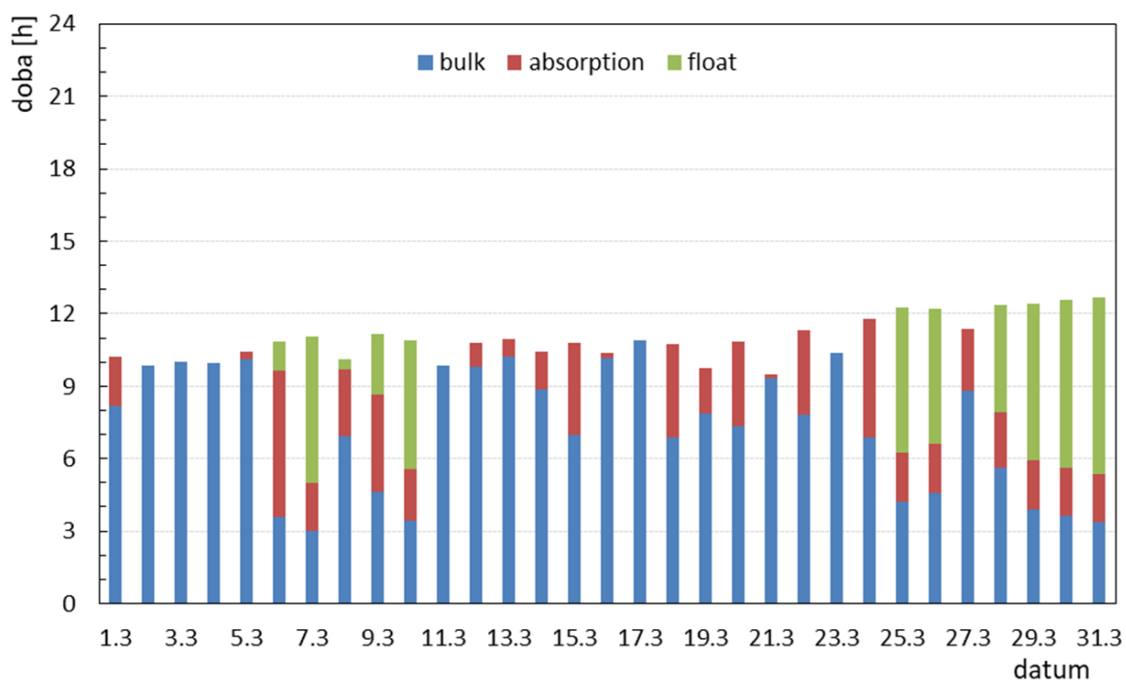
Obr. C.11: Odběr PDZ - březen



Obr. C.12: Dodávka FV - březen



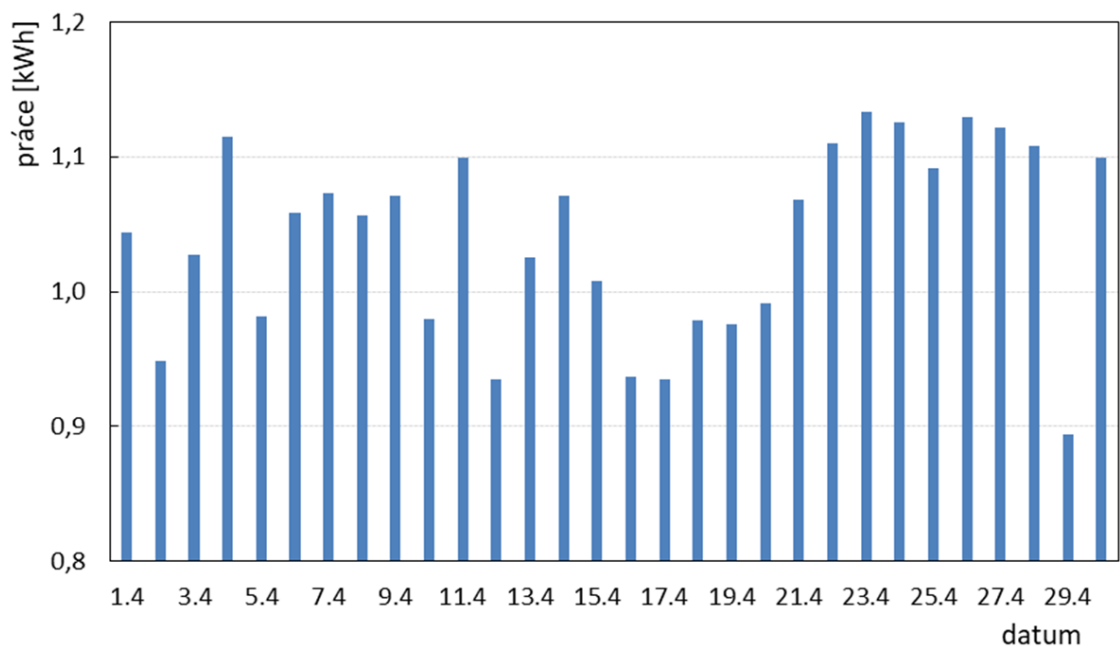
Obr. C.13: Energetické toky AKU - březen



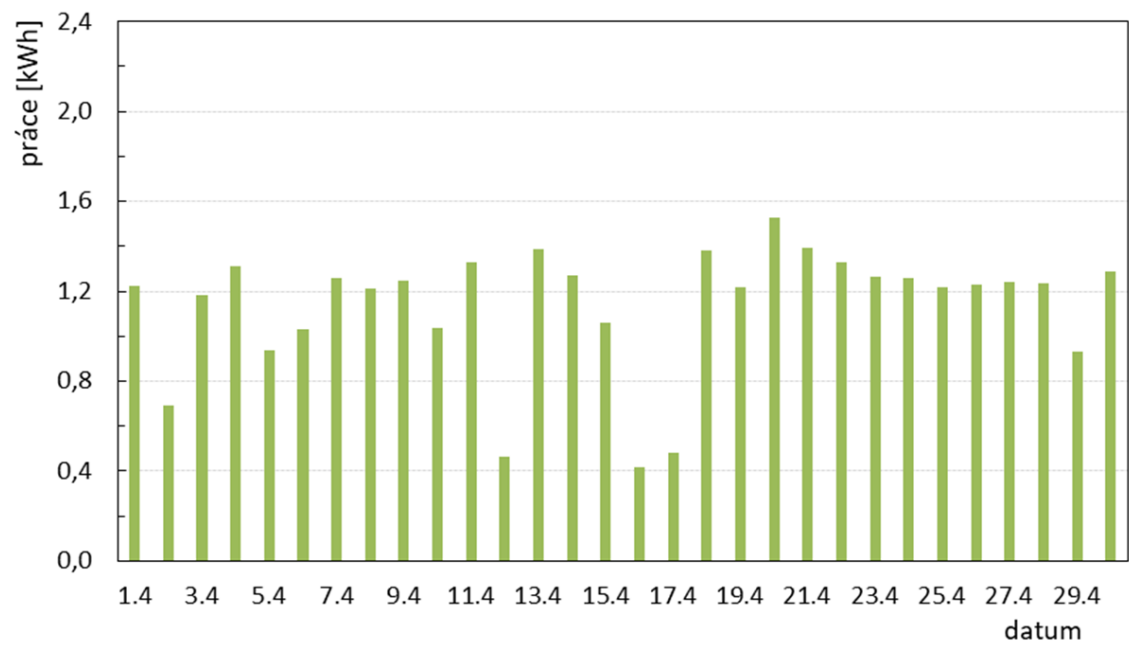
Obr. C.14: Stupeň nabití AKU - březen

Tab. C.4: Měsíční odběrový diagram (kWh) - duben

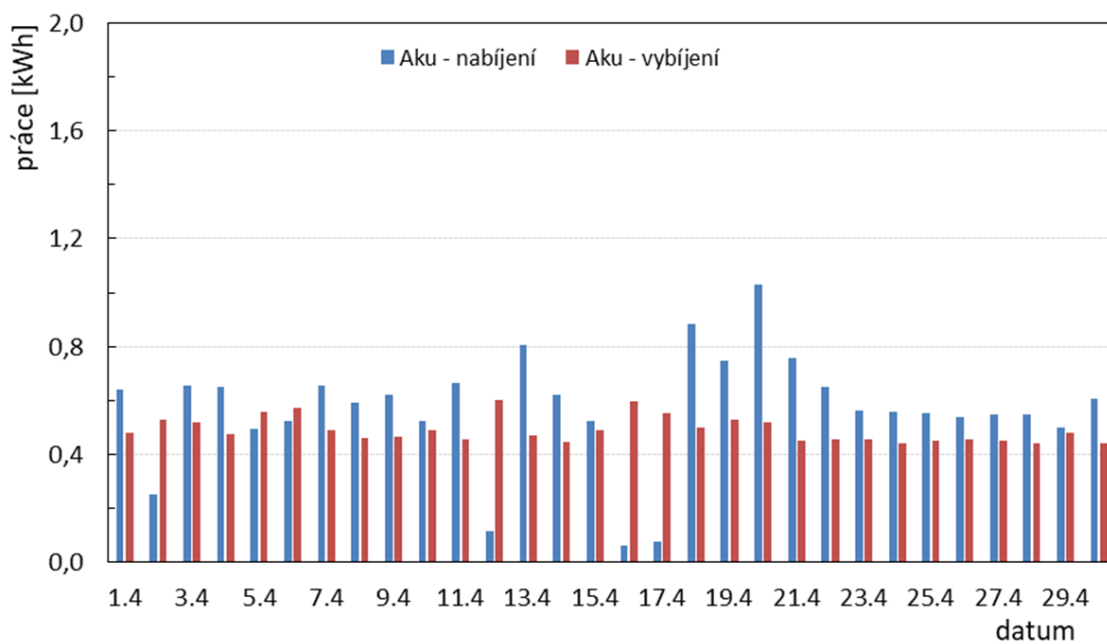
Den	PDZ	Fotovoltaika	Aku - vybíjení	Aku - nabíjení	FC - dodávka	Nabíječka
1.4	1,044	1,225	0,479	0,638	0,000	0,000
2.4	0,948	0,690	0,527	0,253	0,000	0,000
3.4	1,027	1,184	0,516	0,653	0,000	0,000
4.4	1,115	1,311	0,476	0,652	0,000	0,000
5.4	0,982	0,935	0,556	0,493	0,000	0,000
6.4	1,059	1,033	0,570	0,522	0,000	0,000
7.4	1,074	1,259	0,488	0,652	0,000	0,000
8.4	1,056	1,210	0,459	0,592	0,000	0,000
9.4	1,071	1,248	0,463	0,620	0,000	0,000
10.4	0,980	1,035	0,490	0,523	0,000	0,000
11.4	1,100	1,331	0,454	0,665	0,000	0,000
12.4	0,935	0,465	0,602	0,112	0,000	0,000
13.4	1,026	1,385	0,468	0,806	0,000	0,000
14.4	1,072	1,270	0,446	0,623	0,000	0,000
15.4	1,008	1,061	0,490	0,522	0,000	0,000
16.4	0,936	0,420	0,594	0,061	0,000	0,000
17.4	0,935	0,481	0,550	0,074	0,000	0,000
18.4	0,979	1,383	0,498	0,883	0,000	0,000
19.4	0,976	1,218	0,530	0,747	0,000	0,000
20.4	0,991	1,526	0,516	1,030	0,000	0,000
21.4	1,068	1,393	0,449	0,755	0,000	0,000
22.4	1,110	1,327	0,455	0,652	0,000	0,000
23.4	1,134	1,263	0,453	0,563	0,000	0,000
24.4	1,125	1,259	0,442	0,556	0,000	0,000
25.4	1,092	1,216	0,449	0,551	0,000	0,000
26.4	1,129	1,232	0,454	0,535	0,000	0,000
27.4	1,122	1,243	0,449	0,549	0,000	0,000
28.4	1,109	1,235	0,443	0,549	0,000	0,000
29.4	0,894	0,933	0,480	0,501	0,000	0,000
30.4	1,100	1,289	0,439	0,608	0,000	0,000
min.	0,894	0,420	0,439	0,061	0,000	0,000
max.	1,134	1,526	0,602	1,030	0,000	0,000
průměr	1,040	1,135	0,489	0,565	0,000	0,000
suma	31,194	34,056	14,682	16,936	0,000	0,000



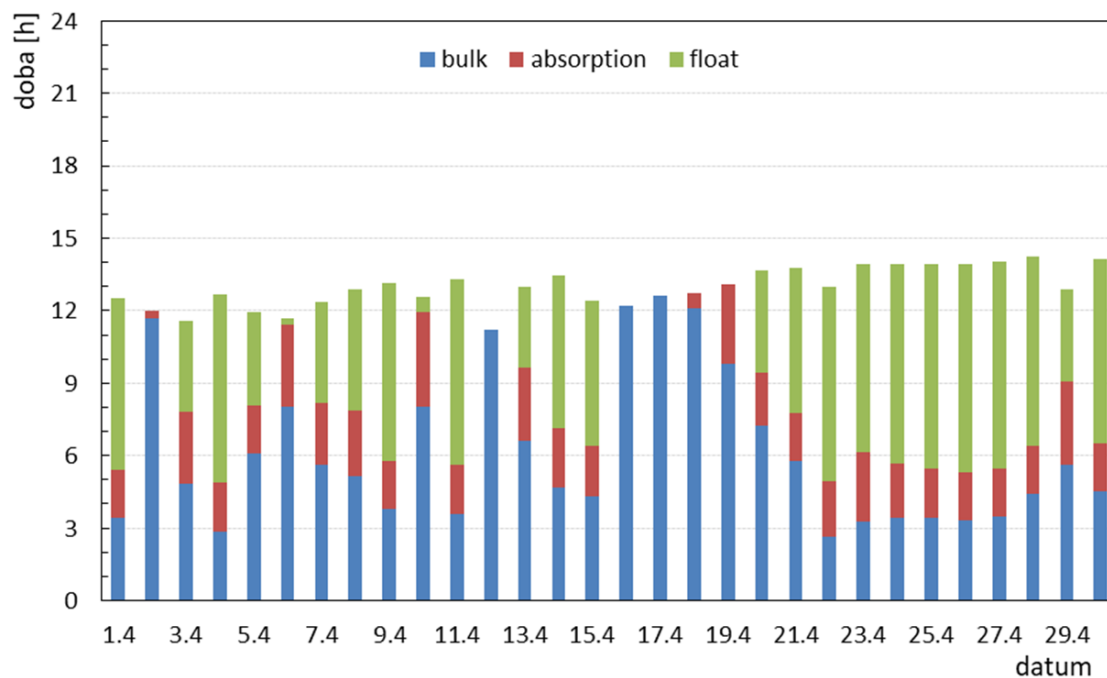
Obr. C.15: Odběr PDZ - duben



Obr. C.16: Dodávka FV - duben



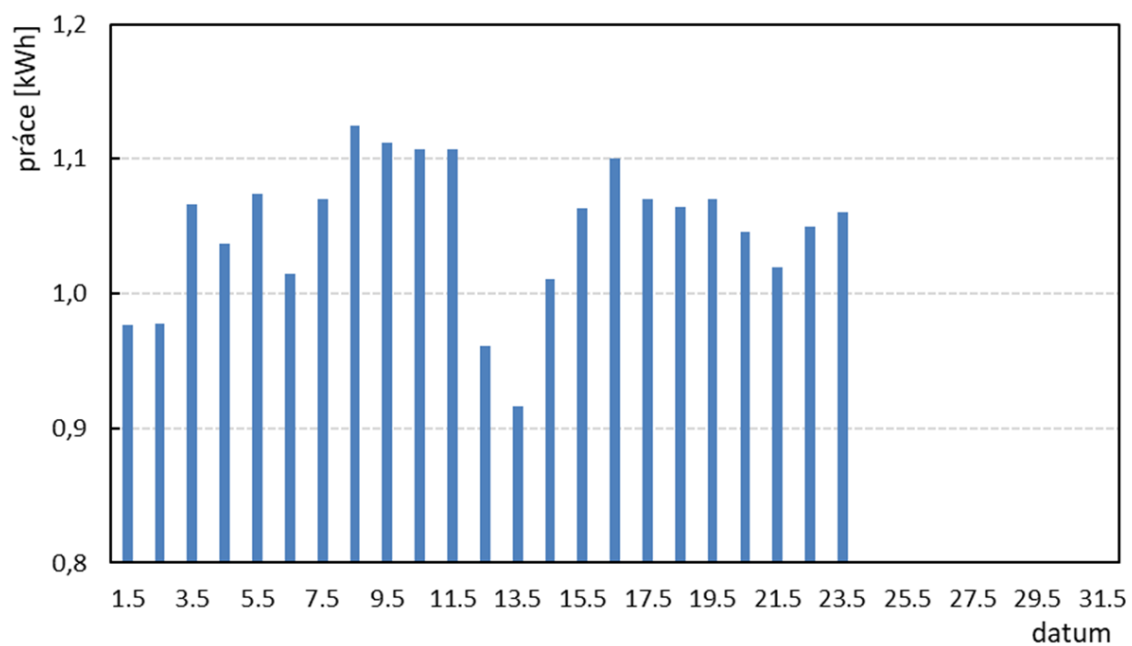
Obr. C.17: Energetické toky AKU - duben



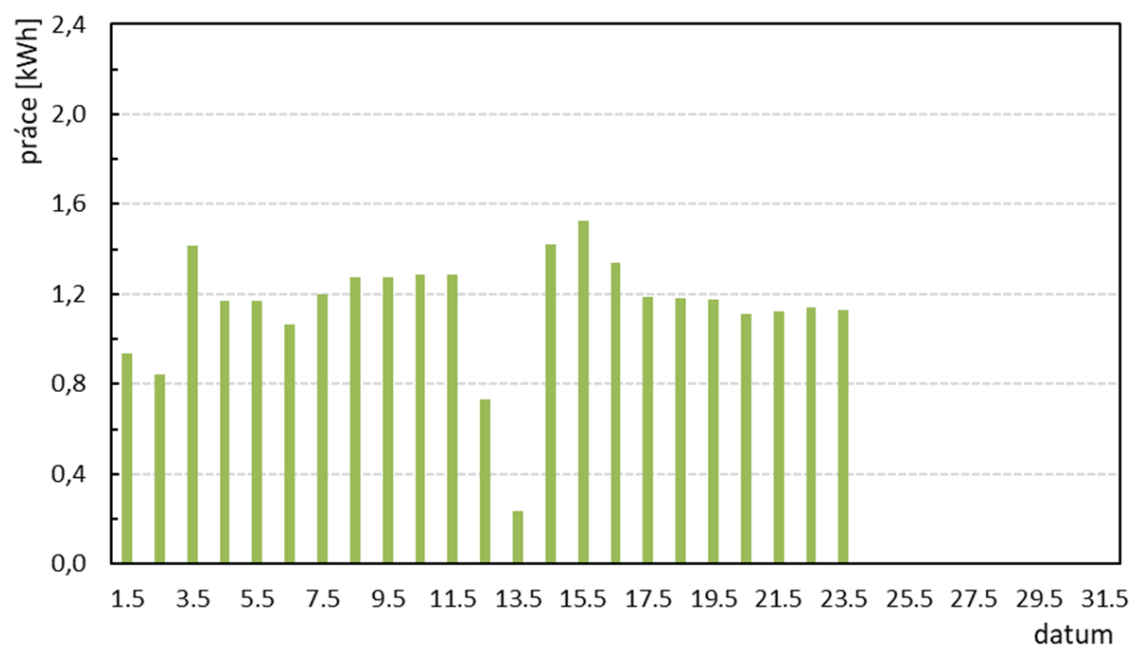
Obr. C.18: Stupeň nabití AKU - duben

Tab. C.5: Měsíční odběrový diagram (kWh) - květen

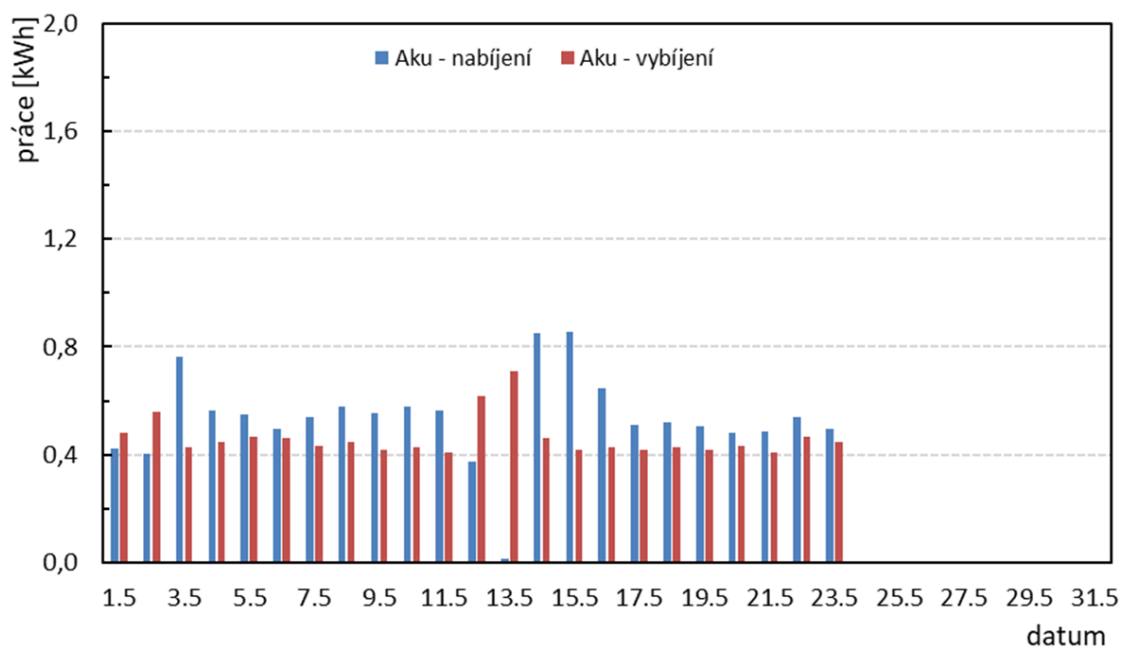
Den	PDZ	Fotovoltaika	Aku - vybíjení	Aku - nabíjení	FC - dodávka	Nabíječka
1.5	0,977	0,939	0,482	0,423	0,000	0,000
2.5	0,978	0,841	0,559	0,405	0,000	0,000
3.5	1,067	1,417	0,429	0,762	0,000	0,000
4.5	1,037	1,173	0,445	0,563	0,000	0,000
5.5	1,074	1,172	0,469	0,550	0,000	0,000
6.5	1,015	1,067	0,462	0,494	0,000	0,000
7.5	1,070	1,198	0,433	0,540	0,000	0,000
8.5	1,124	1,276	0,447	0,578	0,000	0,000
9.5	1,112	1,273	0,418	0,554	0,000	0,000
10.5	1,107	1,285	0,429	0,580	0,000	0,000
11.5	1,107	1,287	0,407	0,563	0,000	0,000
12.5	0,961	0,733	0,616	0,372	0,000	0,000
13.5	0,917	0,236	0,709	0,014	0,000	0,000
14.5	1,011	1,420	0,460	0,849	0,000	0,000
15.5	1,064	1,524	0,416	0,857	0,000	0,000
16.5	1,100	1,338	0,428	0,645	0,000	0,000
17.5	1,070	1,184	0,420	0,512	0,000	0,000
18.5	1,064	1,179	0,425	0,521	0,000	0,000
19.5	1,070	1,178	0,417	0,507	0,000	0,000
20.5	1,046	1,114	0,430	0,480	0,000	0,000
21.5	1,019	1,120	0,408	0,488	0,000	0,000
22.5	1,050	1,143	0,467	0,541	0,000	0,000
23.5	1,060	1,131	0,448	0,498	0,000	0,000
24.5	-	-	-	-	-	-
25.5	-	-	-	-	-	-
26.5	-	-	-	-	-	-
27.5	-	-	-	-	-	-
28.5	-	-	-	-	-	-
29.5	-	-	-	-	-	-
30.5	-	-	-	-	-	-
31.5	-	-	-	-	-	-
min.	0,917	0,236	0,407	0,014	0,000	0,000
max.	1,124	1,524	0,709	0,857	0,000	0,000
průměr	1,048	1,140	0,462	0,534	0,000	0,000
suma	24,096	26,226	10,621	12,292	0,000	0,000



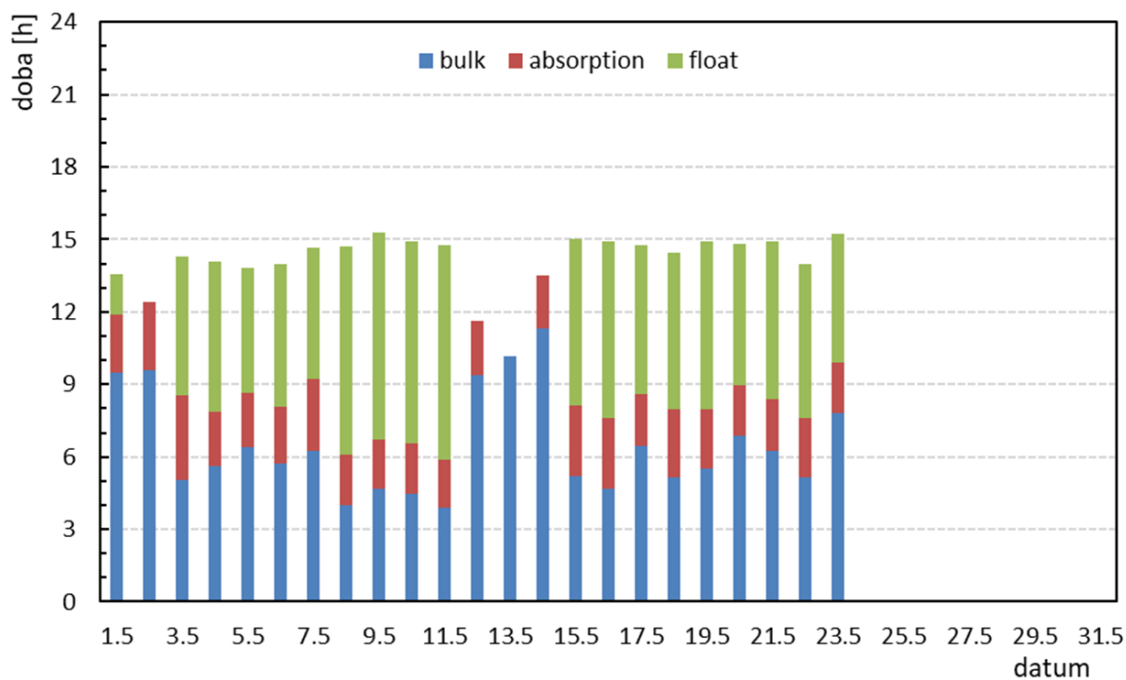
Obr. C.19: Odběr PDZ - květen



Obr. C.20: Dodávka FV - květen



Obr. C.21: Energetické toky AKU - květen



Obr. C.22: Stupeň nabití AKU - květen

D Ekonomika

Tab. D.1: Rozpad nákladů na pořízení a provoz - var. S/N1 - 3 měsíce

vstupy:	MJ	množství	vstupy:	MJ	množství
počet FV na 1 soupravu	ks	1	počet souprav	ks	10
počet FC na 1 soupravu	ks	1	doba provozu	měs.	3
hod. sazba dělník	Kč	400	vzdálenost	km	100

pořizovací náklady			původní provedení		nové provedení	
zařízení	MJ	cena MJ	množství	cena	množství	cena
aku bedna - stará	ks	17 000	10	170 000	0	0
aku bedna - nová	ks	25 000	0	0	10	250 000
UK solar	sada	12 000	0	0	10	120 000
zátěž (beton. dlaždice)	ks	40	0	0	100	4 000
FV panel	ks	2 800	0	0	10	28 000
FC skříň	ks	15 000	0	0	10	150 000
FC	ks	150 000	0	0	10	1 500 000
metanol	l	100	0	0	840	84 000
mezisoučet				170 000		2 136 000

náklady na montáž									
práce:	hod.	Kč	množství	cena	množství	cena			
aku bedna - stará	1	400	10	4 000	0	0			
aku bedna - nová	0,5	200	0	0	10	2 000			
solar	2,5	1 000	0	0	10	10 000			
FC	0,5	200	0	0	10	2 000			
doprava:	Kč	km/hod	počet cest	počet lidí	cena	počet cest	počet aut	počet lidí	cena
dělníci - hod.	400	90	2	2	1 778	2		4	3 556
auto osobní /km	10		2		2 000	2	1		2 000
auto nákladní /km	40		2		8 000	2			8 000
mezisoučet					15 778				27 556

náklady na servis										
doprava:	Kč	km/hod	počet cest	počet lidí	cena	počet cest	počet lidí	cena		
dělníci - hod.	400	90	90	2	80 000	6	2	5 333		
auto osobní /km	10		90		90 000	6		6 000		
práce:	Kč	počet jedn.	počet cest	jedn. doba	počet lidí	cena	počet cest	jedn. doba	počet lidí	cena
dělníci - hod.	400	10	90	1	2	720 000	6	0,25	2	12 000
mezisoučet						890 000				23 333

náklady na demontáž		uvažuje se totéž, co montáž...	
mezisoučet		15 778	27 556

celkem:	1 091 556	2 214 444
----------------	------------------	------------------

Tab. D.2: Rozpad nákladů na pořízení a provoz - var. S/N2 - 3 měsíce

vstupy:	MJ	množství	vstupy:	MJ	množství
počet FV na 1 soupravu	ks	2	počet souprav	ks	10
počet FC na 1 soupravu	ks	0	doba provozu	měs.	3
hod. sazba dělník	Kč	400	vzdálenost	km	100

pořizovací náklady			původní provedení		nové provedení	
zařízení	MJ	cena MJ	množství	cena	množství	cena
aku bedna - stará	ks	17 000	10	170 000	0	0
aku bedna - nová	ks	25 000	0	0	10	250 000
UK solar	sada	12 000	0	0	20	240 000
zátěž (beton. dlaždice)	ks	40	0	0	200	8 000
FV panel	ks	2 800	0	0	20	56 000
FC skříň	ks	15 000	0	0	0	0
FC	ks	150 000	0	0	0	0
metanol	l	100	0	0	0	0
mezisoučet				170 000		554 000

náklady na montáž									
práce:	hod.	Kč	množství	cena	množství	cena			
aku bedna - stará	1	400	10	4 000	0	0			
aku bedna - nová	0,5	200	0	0	10	2 000			
solar	2,5	1 000	0	0	20	20 000			
FC	0,5	200	0	0	0	0			
doprava:	Kč	km/hod	počet cest	počet lidí	cena	počet cest	počet aut	počet lidí	cena
dělníci - hod.	400	90	2	2	1 778	2		7	6 222
auto osobní /km	10		2		2 000	2	2		4 000
auto nákladní /km	40		2		8 000	2			8 000
mezisoučet					15 778				40 222

náklady na servis										
doprava:	Kč	km/hod	počet cest	počet lidí	cena	počet cest	počet lidí	cena		
dělníci - hod.	400	90	90	2	80 000	6	2	5 333		
auto osobní /km	10		90		90 000	6		6 000		
práce:	Kč	počet jedn.	počet cest	jedn. doba	počet lidí	cena	počet cest	jedn. doba	počet lidí	cena
dělníci - hod.	400	10	90	1	2	720 000	6	0,25	2	12 000
mezisoučet						890 000				23 333

náklady na demontáž		uvažuje se totéž, co montáž...	
mezisoučet		15 778	40 222

celkem:	1 091 556	657 778
----------------	------------------	----------------

Tab. D.3: Dílčí matice - Saatyho metoda

K1	S	N1	N2	průměr	váha
S	1	7	5	4,333	0,696
N1	1/7	1	1/3	0,492	0,079
N2	1/5	3	1	1,400	0,225
CR	0,056				

K2	S	N1	N2	průměr	váha
S	1	5	7	4,333	0,696
N1	1/5	1	3	1,400	0,225
N2	1/7	1/3	1	0,492	0,079
CR	0,056				

K3	S	N1	N2	průměr	váha
S	1	1/7	1/9	0,418	0,056
N1	7	1	1/3	2,778	0,369
N2	9	3	1	4,333	0,576
CR	0,069				

K4	S	N1	N2	průměr	váha
S	1	5	7	4,333	0,696
N1	1/5	1	3	1,400	0,225
N2	1/7	1/3	1	0,492	0,079
CR	0,056				

K5	S	N1	N2	průměr	váha
S	1	1/5	1/7	0,448	0,072
N1	5	1	1/3	2,111	0,339
N2	7	3	1	3,667	0,589
CR	0,056				

E Obsah elektronické přílohy

V elektronické příloze je kompletní výkresová dokumentace pro výrobu. V adresáři PDF jsou výkresy jednotlivých sestav, v adresáři XLS jsou výstupy z provedených měření a výpočty nákladů.

```
/.....kořenový adresář přiloženého archivu
├── PDF ..... výkresy sestav
│   ├── 700446 Skelet skrine clanku.pdf
│   ├── 831506 Skrin clanku.pdf
│   ├── 831506 Skrin clanku elsch.pdf
│   ├── 831508 Skrin AKU.pdf
│   ├── 831508 Skrin AKU elsch.pdf
│   ├── 904879 Skelet skrine AKU.pdf
│   ├── 905121 UK pro solar 320W.pdf
│   ├── testovaci souprava in.pdf
│   └── testovaci souprava out.pdf
├── XLS ..... naměřená data z testování + výpočty
│   ├── 2021.xlsx
│   └── kalkulace.xlsx
```