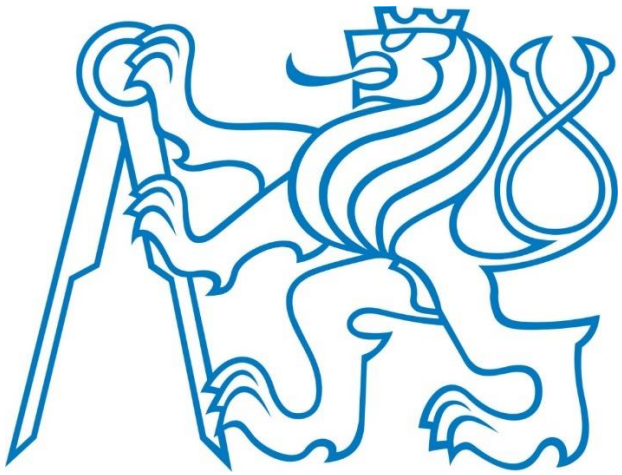
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ



Diplomová práce

Bezpilotní prostředky a jejich vytrvalost

Bc. Tomáš Kubáč

2019

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta dopravní
d ě k a n
Konviktská 20, 110 00 Praha 1

K621 ..... Ústav letecké dopravy

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Tomáš Kubáč

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Bezpilotní prostředky a jejich vytrvalost**

Název tématu (anglicky): Unmanned Vehicles and Their Endurance

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Příslušná legislativa
- Typy a využití bezpilotních prostředků
- Pohony a vytrvalost
- Energetická hustota pohonů
- Optimalizace pohonu pro jednotlivé typy

Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Drony, Jakub Karas, Tomáš Tichý (2016)

Autonomous flying robots: unmanned aerial vehicles and micro aerial vehicles, Wang Wej, Satoshi Suzuki, Daisuke Nakazawa, Farid Kendoul, Kenzo Nonami

Advanced Propulsion for Small Unmanned Aerial Vehicles, Paul Osenar, Ph.D., Jim Sisco, Catharine Reid

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jakub Hospodka, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: **28. července 2017**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **28. května 2019**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

L. S.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE Fakulta dopravní

doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.
vedoucí
Ústavu letecké dopravy

doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Tomáš Kubáč
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 3. prosince 2018

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing. Bc. Jakubovi Hospodkovi, Ph.D. za odborné vedení, připomínky a vstřícnost při vedení diplomové práce. Dále děkuji Ing. Davidu Hůlkovi, Ph.D. a laboratoři NDT a kalibrace letových zapisovačů za zapůjčení měřícího vybavení. Chci také poděkovat svým rodičům a přítelkyni za trpělivost, rady a podporu při psaní diplomové práce i po celou dobu studia.

Prohlášení

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

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 27. května 2019

Bc. Tomáš Kubáč

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

Diplomová práce

Bezpilotní prostředky a jejich vytrvalost

Bc. Tomáš Kubáč

Květen 2019

Abstrakt

Cílem této práce je prozkoumat jednotlivé typy bezpilotních prostředků, možnosti jejich pohonu se zaměřením na jejich vytrvalost a popsat legislativní rámec jejich provozu. Dále bylo cílem provést praktické měření Li-Po akumulátorů, zjistit jaký má teplota okolního prostředí vliv na vybíjecí charakteristiky a energetickou hustotu a jaký vliv má na tyto charakteristiky stáří a opotřebení akumulátoru. První část práce popisuje současnou legislativní problematiku UA a nastiňuje snahy o jejich integraci do provozu. Druhá část se věnuje jednotlivým typům UA a rozděluje je podle konstrukce. Poukazuje také na možnosti využití těchto strojů. Další kapitola se potom zaměřuje na samotné pohony a vytrvalost bezpilotních prostředků. Pohony, které jsou praktické při použití v UA, jsou zde popsány spolu s výhodami a nevýhodami jejich aplikace v UA. Kapitola pět se věnuje energetické hustotě pohonů a jejich zdrojů energie. V této kapitole je popsáno praktické měření Li-Po akumulátorů. Bylo zjištěno, že nízké teploty mají negativní vliv na dostupnou kapacitu akumulátorů, a to zejména na ty starší. Vysoké teploty naopak nepatrně zvyšovaly kapacitu u nového akumulátoru. Naproti tomu starý akumulátor byl ovlivněn více a vyšší teploty mu dopomohly k vyšší dostupné kapacitě. Poslední kapitola potom shrnuje poznatky z předchozích kapitol a optimalizuje kombinaci typu UA, druhu pohonu a zdroje energie se způsoby využití. Práce může sloužit jako nástroj pro snazší implementaci UA do průmyslových a jiných aplikací.

Klíčová slova

bezpilotní prostředky, bezpilotní systém, bezpilotní letadlo, model, drony, Li-Po, akumulátor, baterie, energetická hustota, kapacita, teplota

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

Faculty of Transportation Sciences

Master´s thesis

Unmanned vehicles and their endurance

Bc. Tomáš Kubáč

May 2019

Abstract

The goal of this thesis is to explore the different types of unmanned vehicles, the possibilities of their propulsion with a focus on their endurance and to describe the legislative framework of their operation. Furthermore, the goal was to carry out a practical measurements of Li-Po accumulators, to find out how the ambient temperature affects the discharge characteristics and the energy density. Also, to identify how and if these parameters are affected by age and wear of these accumulators. The first part of the thesis describes the current legislative issues of UA operation and outlines the efforts to integrate them into operation. The second part deals with individual types of UA and divides them according to construction characteristics. It also points to the possibilities of utilization of these machines. The next chapter focuses on the propulsions themselves and the endurance of UAs. Propulsions that are practical for use in UAs are described herein together with advantages and disadvantages of their application in UAs. Chapter five deals with the energy density of propulsions and their energy sources. This chapter describes the practical measurement of Li-Po accumulators. It has been found that low temperatures have a negative impact on the available accumulator capacity, especially the older ones. High temperatures, on the other hand, only slightly increased the capacity of the new accumulator. The old accumulator was affected more, higher temperatures helped to increase its available capacity. Conclusion of the thesis summarizes the findings from the previous chapters and optimizes the combination of UA type, propulsion, and energy source with specific utilizations. Thesis can serve as a tool for easier UA implementation in industrial and other applications.

Key Words

unmanned systems, unmanned aircraft, unmanned aerial vehicles, model, drones, Li-Po, accumulator, battery, energy density, capacity, temperature

Obsah

Seznam obrázků 7

Seznam tabulek 7

Seznam grafů 7

Seznam použitých zkratek 9

1 Úvod 11

2 Legislativa 12

2.1 Letecké předpisy 12

2.1.1 Letecké práce a další letecké činnosti 13

2.1.2 Rozlišení bezpilotních zařízení z legislativního hlediska 13

2.1.2.1 Model letadla 14

2.1.2.2 Bezpilotní letadlo 15

2.1.3 Omezení provozu ve vzdušných prostorech a meteorologická minima 17

2.1.4 Snahy o integraci bezpilotních systémů 19

2.2 Další legislativa při provozu bezpilotních letadel 20

2.2.1 Odpovědnost za škodu 20

2.2.2 Obrana, soukromí člověka a vlastnické právo 21

2.2.3 Ochrana osobních údajů 21

2.2.4 Národní parky 22

3 Typy a využití bezpilotních prostředků 23

3.1 Rozdělení podle konstrukce 23

3.1.1 Pevné nosné plochy 23

3.1.2 Jeden nebo dva nosné rotory 24

3.1.3 Multirotorové 25

3.1.4 Hybridní 26

3.2 Možnosti využití 26

4 Pohony a vytrvalost 30

4.1 Vrtulové pohony 31

4.1.1 Spalovací motory s vnitřním spalováním 32

4.1.1.1 Přímočarý pohyb pístu ... 32
4.1.1.2 Rotační pohyb pístu ... 34
4.1.1.3 Turbovrtulové a turbohřídelové ... 35
4.1.2 Elektromotory ... 36
4.1.2.1 Zdroje elektrické energie pro elektromotory ... 38
4.1.2.1.1 Akumulátory ... 38
4.1.2.1.2 Fotovoltaika ... 41
4.1.2.1.3 Palivové články ... 42
4.1.2.1.4 Ultrakondenzátory ... 43
4.1.2.1.5 Jaderné ... 45
4.1.3 Hybridní ... 45
4.2 Reaktivní pohony ... 46
4.2.1 Proudové ... 46
4.2.2 Raketové ... 48
5 Energetická hustota pohonů ... 51
5.1 Praktické měření Li-Po akumulátorů ... 53
5.1.1 Materiály a metody ... 53
5.1.2 Výsledky ... 57
5.1.3 Diskuze ... 63
6 Optimalizace pohonu pro jednotlivé typy ... 68
7 Závěr ... 70
Použité zdroje ... 72
Příloha I
Příloha II
Příloha III

Seznam obrázků

Obrázek 1: tabulka podmínek pro provoz bezpilotního letadla z doplňku X [5] 16
Obrázek 2: legenda k obrázkům 3 a 4 [5] 17
Obrázek 3: provoz UA a modelů letadel v prostorech třídy G, E, v ATZ a meteorologická minima [5] 18
Obrázek 4: provoz UA a modelů letadel v CTR, dalších prostorech a meteorologická minima [5]..... 19

Seznam tabulek

Tabulka 1: pozitiva a negativa vratných pístových motorů pro použití v UA 33
Tabulka 2: pozitiva a negativa rotačních pístových motorů pro použití v UA..... 35
Tabulka 3: pozitiva a negativa elektromotorů v UA 38
Tabulka 4: pozitiva a negativa akumulátorových systémů pro použití v UA 41
Tabulka 5: pozitiva a negativa fotovoltaických systémů pro použití v UA 42
Tabulka 6: pozitiva a negativa PEMFC pro použití v UA 43
Tabulka 7: pozitiva a negativa ultrakondenzátorů pro použití v UA 44
Tabulka 8: pozitiva a negativa turbínových motorů pro použití v UA..... 47
Tabulka 9: pozitiva a negativa raketových motorů pro použití v UA 49
Tabulka 10: energetické hustoty a specifické energie zdrojů energie pohonů UA (HHV) [35, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52] 51
Tabulka 11: kapacita akumulátorů při jednotlivých měřeních..... 58
Tabulka 12: limitní hodnoty napětí starého akumulátoru při -18°C na 25 minut 66
Tabulka 13: optimalizace pohonů a typů UA podle využití..... 69

Seznam grafů

Graf 1: pokles napětí v čase při pokojové teplotě 58
Graf 2: pokles napětí v čase při 5°C..... 59
Graf 3: pokles napětí v čase při -18°C 59
Graf 4: pokles napětí v čase při -18°C (vloženo 10 minut před vybíjením)..... 60
Graf 5: pokles napětí v čase při -18°C (vloženo 20 minut před vybíjením)..... 60

Graf 6: pokles napětí v čase při -18°C (vloženo 25 minut před vybíjením)..... 61
Graf 7: pokles napětí v čase při -18°C (vloženo 30 minut před vybíjením)..... 61
Graf 8: pokles napětí v čase při 50°C..... 62
Graf 9: pokles napětí v čase při 60°C..... 62

Seznam použitých zkratek

3D	Three-dimensional	Trojdimenzionální
AGL	Above ground level	Výška nad zemí
AMSL	Above mean sea level	Výška nad střední hladinou moře
APCP	Ammonium perchlorate composite propellant	Kompozitní pohonná hmota s chloristanem amonným
ARP	Airport reference point	Vztažný pod letiště
ATM	Air traffic management	Řízení letového provozu
ATZ	Aerodrome traffic zone	Letištní provozní zóna
CC-CV	Constant current–constant voltage	Konstantní proud-konstantní napětí
CTR	Control zone	Řízený okrsek
DC	Direct current	Stejnosměrný proud
EASA	European Aviation Safety Agency	Evropská agentura pro bezpečnost letectví
ESC	Electronic speed control	Elektronický kontrolér rychlosti
EUROCAE	European Organisation for Civil Aviation Equipment	Evropská organizace pro vybavení používané v civilním letectví
GNSS	Global navigation satellite system	Globální satelitní polohový systém
GPHS	General-purpose heat source	Univerzální zdroj tepla
HHV	Higher heating value	Spalné teplo paliva
JARUS	Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems	Sdružení úřadů pro předpisovou činnost v oblasti bezpilotních systémů
LKD		Nebezpečný prostor
LKP		Zakázaný prostor
LKR		Omezený prostor
LP		Letecké práce
OP		Ochranná pásma letiště
PEMFC	Proton-exchange membrane fuel cell	Protonové výměnné membránové palivové články
PL		Provozovatel letiště
RPAS	Remotely piloted aircraft system	Systém dálkově řízeného letadla

RPM	Revolutions per minute	Otáčky za minutu
RTG	Radioisotope thermoelectric generator	Radioizotopový termoelektrický generátor
ŘLP		Řízení letového provozu
SESAR JU	Single European Sky ATM Research Joint Undertaking	Společný podnik ATM výzkumu jednotného evropského nebe
TRA	Temporary reserved area	Dočasně vymezený prostor
TSA	Temporary segregated area	Dočasně vyhrazený prostor
UA	Unmanned aircraft	Bezpilotní letadlo
UAS	Unmanned aircraft system	Bezpilotní systém
ÚCL		Úřad pro civilní letectví
UTM	Unmanned aircraft system traffic management	Řízení letového provozu bezpilotních systémů
VTOL	Vertical take-off and landing	Vertikální vzlet a přistání

1 Úvod

Bezpilotní prostředky zažívají významný rozmach po celém světě a v mnoha odvětvích lidské činnosti. Na trhu existují rozmanité typy konstrukcí a druhy pohonů. S postupem vývoje technologií se tyto stroje staly velice rychle dostupné a vhodné pro širokou veřejnost i pro různá odvětví průmyslu a služeb. Využití v průmyslových aplikacích láká zejména příslibem snížených nákladů oproti jiným řešením. Aby však mohlo dojít ke snížení nákladů je potřeba se v problematice bezpilotních prostředků orientovat. Použití vhodného typu bezpilotního prostředku a jeho pohonu je zásadním krokem pro jejich vstup do průmyslových a odborných aplikací. To samé platí při využívání těchto strojů v oblasti služeb. Tak jako je tomu v mnoha dalších oblastech lidské činnosti, technologie jsou několik kroků před zákony a předpisy. Je proto nutné se orientovat v právních ohledech využívání bezpilotních prostředků.

Pro správné určení typu bezpilotního prostředku a jeho pohonu je důležité znát požadované užitečné zatížení, druh tohoto zatížení, požadovaný dolet nebo vytrvalost a prostředí ve kterém bude provozován. Prostředí je zásadní bod při výběru, neboť značně ovlivňuje výkon a spotřebu energie většiny používaných druhů pohonů. V současnosti jsou z důvodů dostupnosti technologie, právních omezení, a především jednoduchosti nejpoužívanějšími pohony elektromotory v kombinaci s lithium-polymerovými akumulátory jako zdrojem energie. Tato práce se proto v praktické části zaměřuje právě na využitelnost Li-Po akumulátorů v různých teplotních podmínkách. Cílem bylo zjistit vliv teploty prostředí na vybíjecí charakteristiky a energetickou hustotu Li-Po akumulátorů a jestli má na tyto vlastnosti vliv stáří a opotřebení akumulátoru. Pro využití bezpilotních prostředků k jakékoliv činnosti jsou zcela zásadní znalosti všech dostupných možností kombinace typů a pohonů. V této práci lze najít správné otázky, které si má zájemce o tyto stroje položit před konečným výběrem.

2 Legislativa

Bezpilotní prostředky prodělaly dlouho cestu od dob neřízených balonů a prvních rádiem řízených letadel. Jejich miniaturizace a počátek masového využívání však přinesly mnoho právních otázek. Počátek masového využívání tedy přineslo situace, z oblasti ochrany soukromí, odpovědnosti za škody a další, které je potřeba řešit právní úpravou.

2.1 Letecké předpisy

Základním zdrojem leteckého práva v České republice je zákon č. 49/1997 Sb., o civilním letectví a o změně a doplnění zákona č. 455/1991 Sb., o živnostenském podnikání (živnostenský zákon), ve znění pozdějších předpisů. Státní správu ve věcech civilního letectví vykonává Úřad pro civilní letectví (ÚCL) podle § 3. § 102 Zákona o civilním letectví pak říká, že osoby zúčastněné na civilním letectví jsou povinni dodržovat letecké předpisy, které jsou v souladu s mezinárodními smlouvami, které jsou součástí právního řádu, vydávány Mezinárodní organizací pro civilní letectví, Sdružením leteckých úřadů podle předpisů Evropské unie a Evropskou organizací pro bezpečnost letecké navigace (EUROCONTROL), ve znění přijatém Českou republikou [1].

Základním mezinárodním pramenem pak je dohoda č. 147/1947 Sb., Úmluva o mezinárodním civilním letectví ze dne 7. prosince 1944 sjednaná v Chicagu, USA. Tato Úmluva vstoupila v platnost 4. dubna 1947 a dala vzniknout Mezinárodní organizaci pro civilní letectví (ICAO), která na základě článku 37 Úmluvy vydává mezinárodní normy a doporučované předpisy v civilním letectví [2]. Tyto předpisy jsou v českém právním řádu zaneseny jako letecké předpisy řady L. Z těchto předpisů je pro význam mé práce nejdůležitější především předpis L 2 – Pravidla létání, konkrétně Doplněk X – Bezpilotní letadla.

Chicagská úmluva již od počátku řeší problematiku letadel schopných létat bez pilota. Článek 8 říká: Letadla neřízená pilotem. Žádné letadlo, které jest způsobilé býti řízeno bez pilota, nesmí létati bez pilota nad územím smluvního státu, leč se zvláštním zmocněním tohoto státu a v souhlase s podmínkami takového zmocnění. Každý smluvní stát se zavazuje zajistiti, aby let takových letadel bez pilota byl v oblastech přístupných civilním letadlům řízen tak, aby bylo vyloučeno nebezpečí pro civilní letadla [2]. Ve stejném smyslu je o bezpilotních letadlech psáno i v českém zákoně o civilním letectví (v § 52). I zde je let bezpilotního letadla nad územím České republiky podmíněn zvláštním povolením [1]. Tato omezení však byla přijata za dob, kdy měla bezpilotní letadla zcela jiné parametry a rozšíření bylo minimální. Dnes jsou již přijímány předpisy a normy, které upravují běžný provoz bezpilotních letadel a původní všeobecná omezení jsou již zastaralá.

Soudobé předpisy a zákony mají složitý úkol vyvážit co nejvolnější využívání a profitování z těchto nových technologií s ochranou soukromí, majetku, životního prostředí a veřejného zdraví. Nyní, kdy

bezpilotní létající zařízení ke svému vzletu nepotřebuje letiště, ale stačí mu třeba jen zahrada domu a kdy si takové zařízení může pořídit opravdu každý, je nezbytnost jasných pravidel samozřejmostí.

2.1.1 Letecké práce a další letecké činnosti

Český zákon o civilním letectví definuje letecké práce v § 73 následovně. Leteckými pracemi jsou letecké činnosti, při nichž letecký provozovatel využívá letadlo k pracovní činnosti za úplatu. Leteckými pracemi se dále rozumějí vyhlídkové lety, využití letadla leteckým provozovatelem při výuce v leteckých školách a činnost leteckých škol [1]. Pokud je tedy let prováděn za úplatu a smyslem letu je zajištění služby, která je prodána, jedná se o letecké práce. Příkladem může být: letecké snímkování, zaměřování terénu, geomagnetický průzkum, rozbory ovzduší, monitorovací lety a další [4]. Podle § 74 může letecké práce provozovat fyzická osoba s trvalým pobytem a právnická osoba se sídlem v České republice jen na základě povolení, které vydává Úřad pro civilní letectví. Letecké práce mohou podle § 74a dočasně na území České republiky provozovat i státní příslušníci jiného členského státu Evropské unie, kteří jsou v tomto státu oprávnění letecké práce provozovat.

Letecké činnosti pro vlastní potřebu jsou upravovány § 76. Jsou to lety, kterými zajišťuje právnická nebo fyzická osoba podnikatelskou činnost k níž je oprávněna podle zvláštních předpisů [1]. O leteckou činnost se jedná, pokud právnická nebo fyzická podnikající osoba provádí lety ve vlastní režii pro podporu své činnosti a využívá letadla jako výrobní nástroj jiné finální služby nebo zboží. Příkladem můžou být: propagační lety, lety hlídkovací pro ochranu vlastního areálu, monitorovací lety vlastních produktovodů, lety pro zajištění výkonu státní správy, práškovací lety vlastních polí [4]. Povolení letecké činnosti vydává opět Úřad pro civilní letectví.

Rekreační a sportovní létání je dle § 77 užívání letadla pro vlastní potřebu nebo potřebu jiných osob za účelem rekreace, osobní dopravy nebo sportu, které není uskutečňováno za účelem zisku.

Letecká veřejná vystoupení (LVV) je podle § 78 možné provozovat jen se souhlasem Úřadu.

2.1.2 Rozlišení bezpilotních zařízení z legislativního hlediska

V současnosti se rozlišuje několik hlavních pojmů v oblasti bezpilotních létajících zařízení:

- Model letadla (dá se také zařadit, jako kategorie bezpilotního letadla);
- Bezpilotní systém (UAS) – skládá se z bezpilotního letadla, řídící stanice a jakéhokoliv prvku nezbytného k umožnění letu
    - Bezpilotní letadlo (UA) – dále se rozlišuje podle maximální vzletové hmotnosti:
        - dálkově řízený letadlový systém (RPAS) – speciální sub-kategorie UA,
        - $\leq 0{,}91$ kg,
        - $> 0{,}91$ kg a < 7 kg,

- 7 – 25 kg,
- > 25 kg.

2.1.2.1 Model letadla

V zákonu o civilním letectví je v § 2 letadlo definováno jako zařízení schopné vyvozovat síly nesoucí jej v atmosféře z reakcí vzduchu, které nejsou reakcemi vůči zemskému povrchu. Pro účely tohoto zákona se nepovažuje za letadlo model letadla, jehož maximální vzletová hmotnost nepřesahuje 25 kg. [1] Letadlem je tedy letadlo s pevnými křídly ať už s motorem (s pístovým nebo proudovým) nebo bez motoru (kluzák), tak i vrtulník, vírník a balón či vzducholoď. Protože pro model letadla platí mírnější pravidla a omezení provozu, je nutné ho důkladněji definovat.

Dle předpisů platných v České republice, zvláště dle předpisu L 2 (Pravidla létání), doplňku X (Bezpilotní systémy) se za model letadla považuje létající zařízení, které splňuje všechny čtyři následující podmínky. Model letadla:

a) není schopný nést člověka na palubě;
b) je provozován pouze za účelem rekreačním nebo sportovním;

Jakákoliv komerční činnost, prováděná právnickou nebo podnikající fyzickou osobou tedy nesplňuje tuto podmínku. Naopak například soukromé lety a fotolety pro bezúplatnou vlastní potřebu ano. Ale pokud by soukromá osoba natočila video pro vlastní potřebu, poté ho umístila například na Youtube, kde by video monetizovala, jedná se už o leteckou práci a podmínce tedy nevyhovuje.

c) je provozován pouze v přímém vizuálním dohledu pilota (odpovědné osoby);

Přímý vizuální dohled znamená, že model musí být provozován takovým způsobem a do takové vzdálenosti pilota, aby pilot mohl udržovat trvalý vizuální kontakt během pojíždění a letu. A to i bez vizuálních pomůcek. Brýle a kontaktní čočky jsou samozřejmě povoleny. Zároveň musí být pilot (nebo odpovědná osoba) schopen sledovat dohlednost, překážky a okolní letový provoz.

d) nemá vlastní navigační a řídící systémy, které by umožnily let na předem zvolené místo.

Na trhu můžeme najít mnoho bezpilotních letadel, která jsou prodávána jako modely letadla, a současně mají tento systém (často založený na GNSS). Jedná se už však o bezpilotní letadla a musí tedy dodržovat podmínky a omezení pro ně dané Doplňkem X.

Při provozu modelu letadla si obecně každý musí počínat tak, aby neohrožoval ostatní letecký provoz, osoby a jejich majetek [4]. Doplněk X obsahuje konkrétní pravidla pro provoz modelů letadel. Uvedena jsou často ve formě doporučení, ale i závazných požadavků (zvláště z důvodů ochrany letového provozu). Lze říci, že model letadla by měl být provozován tak, aby:

- na něj odpovědná osoba měla dobrý výhled a dokázala se tak vyhnout překážkám a ostatním letadlům (i bezpilotním);
- nelétal nad lidmi a hustě obydlenými místy ani v jejich nebezpečné blízkosti;
- nepřekračoval výšku 300 m nad zemí (horní hranici prostoru třídy G);
- nelétal blíže než 5,5 km od středu letiště (malé modely do 0,91 kg mohou i blíže, pokud nepoletí výše, než je výška okolní zástavby, stromů či překážek) [4].

Pro provoz modelu není potřeba povolení ÚCL, teoretická ani praktická zkouška řízení modelu. Pilot a model také nejsou v evidenci ÚCL.

2.1.2.2 Bezpilotní letadlo

Obecně je bezpilotní letadlo definováno podle Doplňku X jako letadlo určené k provozu bez pilota na palubě. Pokud se tedy nejedná o model do 25 kg splňující definici v předchozí kapitole. Bezpilotní letadla je vesměs možné provozovat jedině s povolením ÚCL. Provoz bezpilotních letadel bez náležitých povolení může být pokutován až do výše 5 000 000 Kč. Povolení se však nevydává pro bezpilotní letadla do 25 kg (přestože nejsou modelem) určených pouze k rekreačně sportovním činnostem. Stejně tak provoz těchto letadel nevyžaduje praktický ani teoretický test pilota.

Zvláštní kategorií UAS jsou dálkově řízené letadlové systémy (RPAS). Jejich provoz se řídí podmínkami a pravidly Doplňku X pro UAS. Podle Dodatku 4 (Systémy dálkově řízeného letadla) předpisu L 2 se nesmějí provozovat bez povolení vydaného státem vzletu a musí se řídit podmínkami stanovenými státem zápisu do rejstříku. RPAS také potřebují osvědčení letové způsobilosti. Žádost se podává ÚCL.

Základní podmínky pro provoz jednotlivých kategorií bezpilotních letadel (podle maximální vzletové hmotnosti a účelu použití) jsou přehledně popsány v obrázku 1. Popíši zde body, které nemusí být zcela jasné.

Řádek 7 tabulky v obrázku 1 není příliš zřejmý, proto zde uvedu upřesnění. Udává minimální povolenou vzdálenost v metrech:

a) za vzletu a přistání od jakýchkoliv osob mimo pilota a osob přímo zapojených do provozu,
b) za letu od jakýchkoliv osob, prostředků nebo stavby, které nejsou součástí provozu,
c) za letu od jakéhokoliv hustě osídleného prostoru.

Bezpečnou vzdáleností v tabulce se rozumí taková horizontální vzdálenost, která i v případě nastalé nouzové situace vyloučí možnost ohrožení [5]. Za stanovení a dodržení bezpečné vzdálenosti odpovídá pilot, nesmí být ale překročeny minimální hodnoty předpisu a Povolení k létání. Úřad může během procesu vydávání povolení stanovit individuální provozní podmínky a omezení. Úřad za bezpečnou

vzdálenost považuje takovou, která je dvakrát větší, než je aktuální výška letu nad zemským povrchem, avšak ne méně než 10 m pro bod a), 30 m pro bod b) a 50 m pro bod c) [6].

Dozor v řádku 9 tabulky udává, jestli projektování, výroba a počáteční letové zkoušky musí být dozorovány ÚCL nebo pověřenou osobou.

Bezpečnostní „failsafe“ systém (řádek 10) je systém, který má při selhání řídícího spoje provést bezpečné ukončení letu.

Tabulka 1 (viz ust. 16)

ř.	maximální vzletová hmotnost	≤ 0,91 kg		> 0,91 kg a < 7 kg		7 – 25 kg		> 25 kg		bezpilotní letadlo provozované mimo dohled pilota
-	účel použití ---------- požadavek	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	
1	evidence letadla	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
2	evidence pilota	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
3	praktický a teoretický test pilota	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
4	povolení k létání	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
5	povolení k provádění LP a LČPVP	nelze	ano	nelze	ano	nelze	ano	nelze	ano	nelze
6	označení UA: ID štítek / ID štítek + pozn. značka	ne / ne	ano / ano	ano / ne	ano / ano	ano / ne	ano / ano	ano / ne	ano / ano	ano / ano
7	min. ve vzdálenosti (m): vzlet, přistání / osoby, stavby / osídlený prostor	bezpečná	bezpečná	bezpečná	bezpečná	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150
8	pojištění: běžný provoz / LVV (mil. Kč)	ne / 0,25	dle nař. č. 785/2004[1]	ne / 1	dle nař. č. 785/2004[1]	ne / 3 od 20 kg dle nař. č. 785/2004[1]	dle nař. č. 785/2004[1]	dle nař. č. 785/2004[1]	dle nař. č. 785/2004[1]	dle nař. č. 785/2004[1]
9	dozor	ne	ne	ne	ne	ne	ne	ano	ano	ne
10	„failsafe“ systém	ne	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano
11	provozní příručka UAS	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ne
12	hlášení událostí	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano

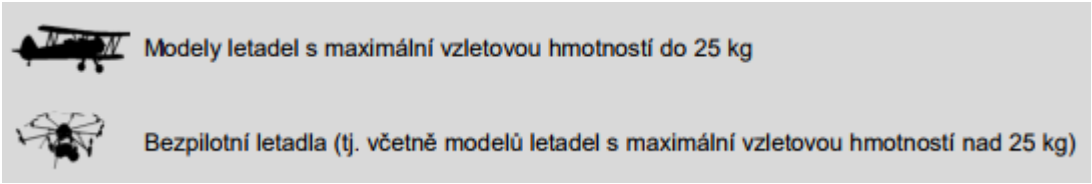
Obrázek 1: tabulka podmínek pro provoz bezpilotního letadla z doplňku X [5]

Dalšími zásadními podmínkami provozování bezpilotních letadel jsou podle Doplňku X následující body:

- Bezpečnost – nesmí dojít k ohrožení bezpečnosti létání, osob a majetku na zemi a životního prostředí.;
- Stálý dohled pilota – ten se může porušit jen a pouze s povolením ÚCL. Pravidla pro dohled pilota jsou stejná jako u modelů letadel (předchozí kapitola).;
- Odpovědnost – za provedení bezpečného letu a letu v souladu s předpisy a také za zaznamenání informací o letu do deníku letadla odpovídá pilot. Za zachování letové způsobilosti UAS je pak odpovědný jeho vlastník.;
- Nebezpečný náklad – kromě provozních náplní v přiměřeném množství nemůže UA převážet nebezpečné látky nebo zařízení.;
- Pohyb pilota – pilot se při provozu UA nesmí pohybovat pomocí technického zařízení bez povolení ÚCL.;
- Ostatní legislativa – provoz UAS musí samozřejmě být v souladu s dalšími platnými právními předpisy.;
- Pro pohon bezpilotního letadla nemůže být použit pulzační nebo raketový motor. Výjimkou je použití raketového pohonu pouze pro vzlet. [5]

2.1.3 Omezení provozu ve vzdušných prostorech a meteorologická minima

Doplněk X také ustanovuje omezení provozu bezpilotních letadel a modelů letadel ve vzdušných prostorech a meteorologická minima pro jejich provoz. Pro přehlednou orientaci v těchto podmínkách slouží obrázky 3 a 4. Obrázek 2 pak definuje znaky použité v těchto obrázcích.

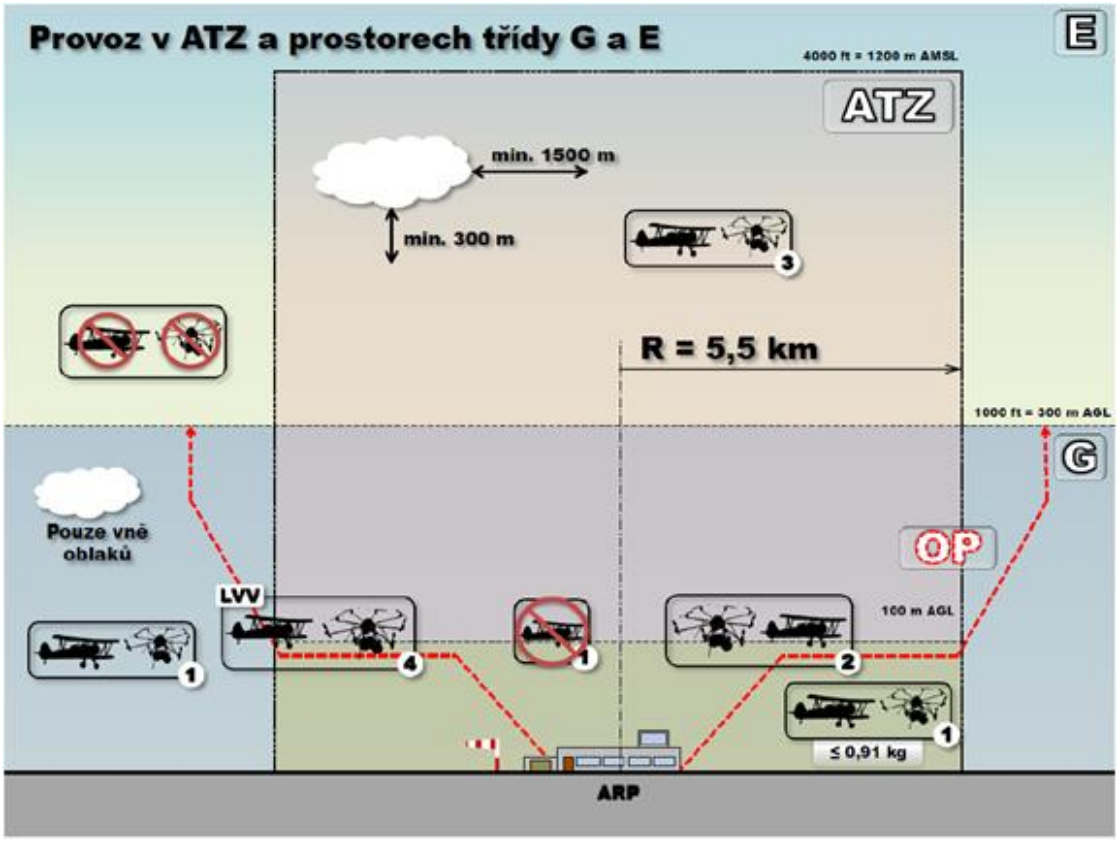


Obrázek 2: legenda k obrázkům 3 a 4 [5]

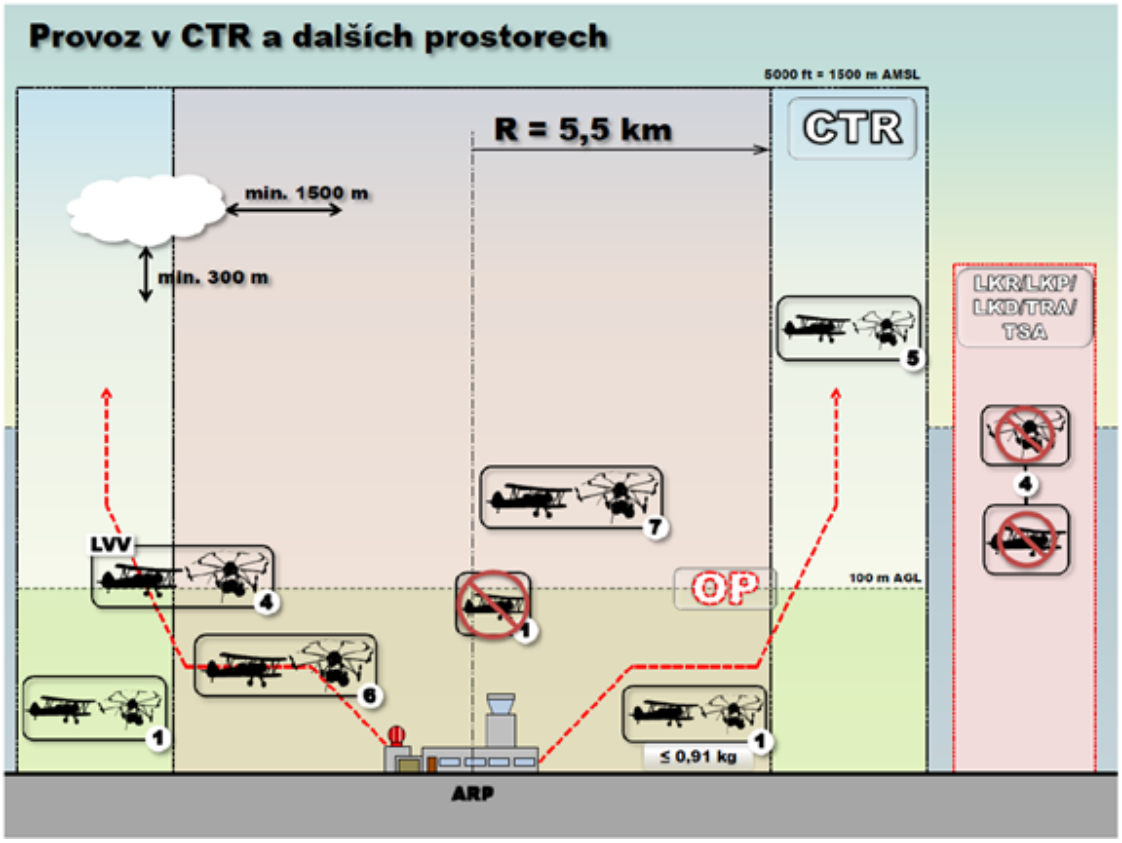
V obrázcích 3 a 4 můžeme vidět čísla 1-7. Tyto čísla odkazují na vysvětlivky a upřesnění, která zde uvedu:

1) Lety bez koordinace.
2) Splnění podmínek provozovatele letiště (PL) + koordinace s letištní informační službou (AFIS).
3) Splnění podmínek PL + koordinace s AFIS.
4) Souhlas/povolení ÚCL.

5) Letové povolení příslušného stanoviště řízení letového provozu (ŘLP). ŘLP může dále požadovat: stálé obousměrné spojení a odpovídač sekundárního radaru.
6) Povolení ÚCL (nebo v případě leteckých prací (LP) koordinace s ŘLP + koordinace s PL). ŘLP může dále požadovat: stálé obousměrné spojení a odpovídač sekundárního radaru.
7) Povolení ÚCL (nebo v případě LP koordinace s ŘLP + koordinace s PL) + letové povolení ŘLP. ŘLP může dále požadovat: stálé obousměrné spojení a odpovídač sekundárního radaru. [5]



Obrázek 3: provoz UA a modelů letadel v prostorech třídy G, E, v ATZ a meteorologická minima [5]



Obrázek 4: provoz UA a modelů letadel v CTR, dalších prostorech a meteorologická minima [5]

2.1.4 Snahy o integraci bezpilotních systémů

Vzhledem k očekávání, že využití a relevance bezpilotních letadel v mnoha odvětví nadále poroste, má mezinárodní letecké společenství snahu o jejich integraci do současného vzdušného prostoru. Sjednocení pravidel jejich provozu není jednoduchá záležitost.

Regulační činnost a související snahy v oblasti výzkumu a vývoje vychází ze stávajících iniciativ, kterých se účastní mnoho subjektů. Jsou mezi nimi: Evropská agentura pro bezpečnost letectví (EASA), úřady civilního letectví jednotlivých zemí, Evropská organizace pro zařízení v civilním letectví (EUROCAE), EUROCONTROL, Sdružení úřadů pro předpisovou činnost v oblasti bezpilotních systémů (JARUS), společný podnik výzkumu jednotného evropského nebe (SESAR JU), výrobci, provozovatelé a další.

EASA v únoru 2018 vydala Opinion No 01/2018, která je návrhem pro Evropskou komisi o zavedení regulačního rámce pro provoz UAS v „open“ a specific“ kategoriích. Jedná se tedy o zavedení dalších definic a pravidel, která mají sloužit ke zmírnění rizik provozu UAS. Začátek implementace se očekává v nejbližších měsících.

Evropská komise pověřila SESAR JU k vytvoření konceptu systému řízení provozu UAS (UTM) pro Evropu. Tradiční ATM zaručuje bezpečnost provozu letadel ve větších výškách, UTM by měl zajistit to

samé ve výškách využívaných UAS. Projekt nese název U-Space. V červnu roku 2017 byl vydán plán s předběžnou vizí pro U-Space. Během roku 2019 se očekává spuštění prvních služeb v rámci U-Space, jako je e-registrace, e-identifikace a geofencing. Geofencing je využití virtuálních geografických hranic definovaných GNSS technologií a umožňuje zamezení vstupu UA do definovaných zón.

2.2 Další legislativa při provozu bezpilotních letadel

Provoz dronu musí samozřejmě probíhat v souladu s všemi dalšími předpisy a normami platnými v České republice.

2.2.1 Odpovědnost za škodu

Zákon č. 89/2012 Sb., občanský zákoník, v § 2927 říká: Kdo provozuje dopravu, nahradí škodu vyvolanou zvláštní povahou tohoto provozu. Stejnou povinnost má i jiný provozovatel vozidla, plavidla nebo letadla, ledaže je takový dopravní prostředek poháněn lidskou silou. Povinnosti nahradit škodu se nemůže provozovatel zprostit, byla-li škoda způsobena okolnostmi, které mají původ v provozu. Jinak se zprostí, prokáže-li, že škodě nemohl zabránit ani při vynaložení veškerého úsilí, které lze požadovat. [10] Princip odpovědnosti je tedy objektivní a nezáleží na zavinění ve formě nedbalosti nebo úmyslu.

Problém nastává u modelů letadel. Z definice letadla zákona o civilním letectví jasně vyplývá, že se nepovažuje za letadlo. Modely letadel neslouží k přepravním účelům, ale jen k rekreačně sportovním. Můžeme tedy odpovědnost za škodu nejspíše řešit v obecném smyslu porušení povinnosti počínat si s náležitou opatrností. § 2910 porušení zákona: Škůdce, který vlastním zaviněním poruší povinnost stanovenou zákonem a zasáhne tak do absolutního práva poškozeného, nahradí poškozenému, co tím způsobil. Povinnost k náhradě vznikne i škůdci, který zasáhne do jiného práva poškozeného zaviněným porušením zákonné povinnosti stanovené na ochranu takového práva [10]. Zde je však snazší pro „škůdce“ dokázat nepřítomnost nedbalosti v jeho jednání tedy vyhnout se odpovědnosti za škodu. § 2911 říká: Způsobí-li škůdce poškozenému škodu porušením zákonné povinnosti, má se za to, že škodu zavinil z nedbalosti [10]. § 2912 pak udává: Nejedná-li škůdce, jak lze od osoby průměrných vlastností v soukromém styku důvodně očekávat, má se za to, že jedná nedbale. Dá-li škůdce najevo zvláštní znalost, dovednost nebo pečlivost, nebo zaváže-li se k činnosti, k níž je zvláštní znalosti, dovednosti nebo pečlivosti zapotřebí, a neuplatní-li tyto zvláštní vlastnosti, má se za to, že jedná nedbale [10]. Zde se může za zvláštní znalost nebo dovednost považovat pilotování modelu. Pečlivost v tomto případě může být například kontrola na technického stavu modelu.

Nadchází ovšem problém, jak se postavit k dopravní funkci UA, která může být velice sporná a v mnoha případech zcela jasně chybí. Čím se tedy bude řešit tato situace ukáže nejspíš až soudní praxe.

2.2.2 Obrana, soukromí člověka a vlastnické právo

UA může být obtěžující pro veřejnost z mnoha důvodů. Může se jednat o nedovolené fotografování nebo nahrávání osob, ale i o hluk, vibrace a případně spaliny, které může bezpilotní letadlo produkovat. Musí tedy dojít k vyvážení práva na soukromí a práva na vlastnictví se svobodami provozovatelů UA.

Občanský zákoník v § 506 říká, že součástí pozemku je také prostor nad povrchem. Avšak podle § 1023 musí vlastník pozemku snášet využívání tohoto prostoru, pokud pro to je důležitý důvod a vlastník nemá rozumný důvod tomu bránit. Práva vlastníků pozemků a provozovatelů UA se tedy vyvažují. Záleží tedy opět na každém případu zvlášť. Pokud by se ale vlastník pozemku rozhodl zakročit proti UA, měl by se o to rozhodně pokusit takovým způsobem, aby nezničil zařízení. V dnešní době pro tento účel existují rušičky rádiových signálů. U UA s „failsafe“ systémy to není žádný problém, ty bez nich však nejspíš spadnou na zem. Je to ovšem stále šetrnější obrana než například vystřelovací síť.

§ 84 udává obecné hranice fotografování a natáčení člověka. Zachycení podoby člověka je možné pouze s jeho svolením. § 86 potom říká, že zasáhnout do soukromí jiného člověka, sledovat jeho soukromí život nebo o tom pořizovat záznam není dovoleno, pokud k tomu není zákonný důvod. I zde jsou však výjimky. Podle § 88 a 89 se tyto záznamy smějí pořídit bez povolení, pokud slouží k výkonu nebo ochraně jiných práv, jsou použity ve veřejném zájmu, k vědeckému nebo uměleckému účelu a pro žurnalistickou činnost. Jak je vidět, těchto výjimek je hodně a pokud někdo bude skutečně dobře argumentovat, jistě se do některé vejde. § 90 ovšem zakazuje využití těchto zákonných zásahů do soukromí nepřiměřeným způsobem.

2.2.3 Ochrana osobních údajů

Základní právo na ochranu osobních údajů je ve vztahu k právu na ochranu soukromí právem speciálním a má své zakotvení v čl. 10 odst. 3 Listiny základních práv a svobod (obdobně též v čl. 8 Listiny základních práv EU). Dává právo každému člověku před neoprávněným shromažďováním, zveřejňováním nebo jiným zneužíváním údajů o své osobě. Hranice oprávněnosti zpracovávání osobních údajů je vymezena zákonem č. 101/2000 Sb.. Všeobecné unijní nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 2016/679, o ochraně osobních údajů, bezprostředně závazné pro každého vstoupí v platnost dne 25. května 2018. [11]

Osobní údaj je jakákoliv informace o člověku, která může člověka identifikovat anebo mu přidělit nějaké atributy. Zpracovávání těchto údajů zahrnuje veškeré možné operace s nimi (mazání, zveřejňování, manipulace, uchovávání, pořizování a další). Z tohoto širokého pojetí vyplývá, že veškeré obrazové a zvukové záznamy pořízené bezpilotními letadly jsou také předmětem regulace nakládání s osobními údaji.

Právo na ochranu osobních údajů se bere na zřetel před právem na ochranu soukromí (v kapitole 2.2.2) pouze pokud je práce s těmito daty systémová a systematická, nikoli ojedinělá nebo náhodná. Zároveň činnost pro osobní potřebu při nakládání s osobními údaji je výjimkou z působnosti norem o ochraně osobních údajů. Podle stanoviska Úřadu pro ochranu osobních údajů se za systematické pořizování audiovizuálního záznamu považuje i amatérské provozování dronu pro vlastní potřebu, kdy pořizování tohoto záznamu neprobíhá mimořádně nebo nahodile (fotografování krajiny nebo monitorování zvířat) [11]. Zde už je přístup k ochraně osobních údajů velice restriktivní a provozovatelé UA by si měli dát velký pozor, jaký je jejich případ, jinak jim hrozí pokuty.

2.2.4 Národní parky

V nedávné době panovaly nejistoty ohledně létání nad národními parky letadel s pilotem. Problematika bezpilotních letadel je jednodušší. Podle § 16 odstavce 2 písmena s) zákona č. 144/1992 Sb., zákona České národní rady o ochraně přírody a krajiny je provozovat letadla způsobilá létat bez pilota nebo modely letadel zakázáno. A to bez jakýchkoliv výjimek.

3 Typy a využití bezpilotních prostředků

V dnešní době významného rozmachu bezpilotních létajících zařízení si můžeme všimnout, že tyto stroje již dávno nejsou otázkou několika málo typů od omezeného počtu výrobců. S tím, jak vývoj a technologie postupují rychle vpřed, i bezpilotní zařízení se stávají stále více dostupné pro veřejnost. S touto dostupností se značně rozšiřuje nabídka a klesá cena. S velkou nabídkou jsou spojené značné rozdíly v konstrukčním řešení UA, výkonových charakteristikách, ale i ve způsobech využití těchto strojů.

Vzhledem k tomu, že se v práci zaměřuji na civilní stroje, vojenské zmíním jen okrajově. Přesto je ale potřeba se jim věnovat, neboť směr, kterým se ubírají vojenská řešení může být v některých případech adoptován pro ty civilní. Pozemní a vodní zařízení jsou už mimo rozsah práce a v této kapitole se jim nebudu věnovat vůbec.

3.1 Rozdělení podle konstrukce

Základem je rozdělit bezpilotní prostředky podle jejich konstrukce. Můžeme je potom porovnávat s pilotovanými letadly, a to i v oblastech využití a základních výkonnostních charakteristik. Mimo tyto převažující kategorie však ještě existují různé další stroje.

3.1.1 Pevné nosné plochy

Bezpilotní zařízení s pevnými křídly vyvozujícími vztlak, jsou konstruovány tak, aby se chovala jako klasické letadlo s pevnými nosnými plochami. Většinou je tedy najdeme ve standardním sestavení se zadními ocasními plochami. Křídla pak mohou být v sestavení dolnoplošníku, středoplošníku anebo hornoplošníku. Najdeme samozřejmě také dvouplošníky, a dokonce i trojplošníky. U tohoto typu bezpilotních zařízení však najdeme také množství neobvyklých konstrukcí. Mezi ně patří například samokřídla a delty s různými umístěními pohonných jednotek. Jejich rozpětí se může pohybovat od desítek centimetrů až po desítky metrů. Například Helios HP03 měl rozpětí přes 75 metrů [13]. K pohybu řídících ploch jsou využívány servomotory.

Jak z popisu vyplývá, tento typ bezpilotních zařízení dosahuje letu pomocí křídel, která vyvozují vztlak, nepotřebuje tedy k samotnému letu pohonnou jednotku. Dokud má výšku a dopřednou rychlost, poletí. Znamená to tedy, že jsou více efektivní při využívání energie a můžeme říct, že v průměru mají vyšší možný letový čas, a tedy i dolet než ostatní typy. Z principu také mají větší dostup a maximální rychlost než ostatní typy. V těchto parametrech jsou omezeny jen svou velikostí a pohonnou jednotkou. Z toho také vychází jejich schopnost nést těžší užitečný náklad, opět omezen jen jejich parametry. Jejich stabilita za letu může být různá podle účelu zařízení. Čím řiditelnější zařízení chceme, tím bude méně stabilní. Tyto parametry jdou však vcelku snadno ovlivnit při konstrukci, tak jak tuto problematiku

známe z velkých letadel. Za výhodu můžeme považovat jejich ovládání podobné klasickým letounům, které je intuitivní. To ovšem nebude platit pro někoho, kdo nikdy neřídil letadlo.

Nedokáží stát ve vzduchu na místě a vzlétat a přistávat kolmo (VTOL), to přináší jistá omezení v provozní a funkční oblasti. Ke vzletu potřebují plochu určité velikosti pro rozjezd anebo katapult. Ta nejmenší bezpilotní zařízení s pevnými křídly však mohou být vypuštěna z ruky. Vzhledem k tomu, že musejí přistávat klasickým způsobem, je pro jejich ovládání potřeba určitý cvik. I přes to, je poškození při přistání pravděpodobnější než u ostatních kategorií. K přistání se však dá použít také padák nebo síť.

3.1.2 Jeden nebo dva nosné rotory

Bezpilotní zařízení s jedním nosným rotorem mají stejně jako klasické vrtulníky ještě ocasní rotor. Ten je většinou osazen vertikálně. Jeho smysl je vyrovnání momentového účinku nosného rotoru a směrové řízení. Ocasní rotor je obvykle poháněn přes reduktor a hřídel stejným motorem jako nosný rotor. Do této kategorie ovšem patří také zařízení se dvěma nosnými rotory. Ty už nepotřebují ocasní rotor, protože nosné rotory se točí protiběžně a momenty se vyrovnají. V ostatních parametrech a principech funkce jsou však shodné se zařízeními nebo vrtulníky s jedním nosným rotorem.

A taktéž jako klasické vrtulníky musejí tyto zařízení mít hlavu hlavního rotoru (nasazenou na hřídeli hlavního reduktoru), která přenáší aerodynamické síly z listů rotoru na trup a kroutící moment na listy. Samotné listy mohou být s hlavou spojeny několika způsoby a podle toho se rotory i dělí na kloubové rotory, rotory s pružnými členy, polotuhé rotory a tuhé rotory. Všechny tyto konstrukce musí listům umožnit vykonávat vodorovný a svislý pohyb a také křidélkovat (pohyb, při kterém se mění úhel nastavení listu).

Ke kolmému startu a přistání je potřeba zajistit změnu vztlaku rotoru. Toho je možno dosáhnout zvýšením nebo snížením otáček (ta potom je ovšem potřeba vyrovnat změnou otáček ocasního rotoru, kvůli změně reakčního momentu) nebo při téměř stálých otáčkách souhlasnou změnou úhlu nastavení listů rotoru. Druhé možnosti se v praxi dává předost a nazývá se kolektivní řízení. Při změně úhlu nastavení listů je samozřejmě také potřeba změnit výkon motoru. Ten tedy musí být sladěn se změnou nastavení kolektivu.

Schopnost letět vpřed, vzad, vpravo i vlevo je dosažena pomocí naklánění roviny nosného rotoru. Tomuto řízení se říká cyklické. Pokud se rotor neotáčí přesně ve vodorovné rovině, vztlaková síla působí kromě svislého i ve vodorovném směru. Aby se toho dosáhlo, mění se periodicky a nesouhlasně nastavení úhlu listů (křidélkuje). Konce listů se tedy pohybují po sinusoidě nahoru a dolů (to vyžaduje dorazy). K celému cyklickému řízení slouží takzvaná deska cykliky. Je tvořena dvěma prstenci navlečenými na hřídeli nosného rotoru – spodní (vnější) prstenec se neotáčí, ale táhly jsou na něj přenášeny pohyby cyklického řízení (v modelu servy klonění a klopení). Horní (vnitřní) prstenec přejímá prostřednictvím čepů pohybujících se v drážce na obvodu spodního (vnějšího) prstence jeho výchylky

(naklánění) a zároveň se otáčí spolu s hřídelí rotoru. Z horního (vnitřního) prstence vedou táhla dále k ovládání rotorové hlavy. Klonění je u vrtulníku obdobou křidélek a slouží k naklánění a pohybu vrtulníku do stran. Klopení odpovídá funkci výškového kormidla a řídí se jím naklánění a pohyb vrtulníku vpřed a vzad. Pokud má vrtulník i kolektivní řízení, je deska cykliky na hřídeli rotoru uložena suvně a systém ovládání kolektivu ji jako celek posouvá nahoru a dolů [14].

Předchozí odstavce demonstrují komplexnost řízení a konstrukce vrtulníku nebo bezpilotního zařízení s jedním nebo dvěma nosnými rotory. Tato komplexnost zvyšuje cenu a nároky na údržbu tohoto typu zařízení. Tyto zařízení z principu potřebují rotory s listy o poměrně velké délce. Z toho pramení riziko případného zranění při kontaktu člověka nebo zvířete s pracujícím rotorem. Byly již provedeny pokusy s prasečí tkání, různými elektrickými motory a rotory. Například elektrický motor DJI 400 KV s listy rotoru (materiál plast) dlouhými 15 palců (38,1 cm) a RPM 6751 dokázal napáchat značné škody – na kýtě způsobil ránu dlouhou 5 cm, širokou 2 cm a hlubokou 1 cm a na žebrech potom ránu dlouhou 8 cm, širokou 1 cm a hlubokou 0,8 cm a zde zároveň způsobil vážné řezné poškození kosti [15]. Z těchto pokusů vyplývá, že možná zranění při kontaktu s rotory nejsou radno brát na lehkou váhu. Délka rotorů těchto zařízení může být ovšem ještě větší a poškození tkáně mnohem rozsáhlejší.

Velký nosný rotor má ovšem také řadu výhod. Je především efektivnější než více menších rotorů najednou. Podle teorie diskového pohonu Rankineho a Frouda z konce 19. století, je plocha rotoru nepřímo úměrná energii potřebné pro vyvození daného tahu. Je tedy nejefektivnější mít co nejméně co největších rotorů. U jejich velikosti ovšem narážíme na fakt, že konce listů rotoru nesmí dosáhnout rychlosti zvuku. Supersonický a transsonický tok vzduchu je velice rozdílný oproti subsonickému, na který jsou listy rotorů konstruovány. Dokáží tedy unést vcelku těžké, a i rozměrově veliké náklady s výhodnou kolmého vzletu a přistání. Jejich nosnost je z principu omezena pohonnou jednotkou a délkou listů vrtule. Tyto zařízení jsou také v zásadě stabilní bez nutnosti použití další elektroniky.

3.1.3 Multirotorové

Multirotorové bezpilotní prostředky neboli bezpilotní prostředky s třemi nebo více rotory (zařízení s dvěma rotory jsou zařazeny v předchozí kapitole z důvodů tam popsaných) jsou dnes pravděpodobně nejpopulárnějším typem v civilním sektoru. Nejčastěji je můžeme vidět v sestavení se čtyřmi motory, tedy jako kvadrokoptéry. Výjimkou však nejsou ani trikoptéry (tři rotory) a hexakoptéry (šest rotorů). Pentakoptéry (pět rotorů) a oktokoptéry (osm rotorů) už jsou vzácnější. Jejich vzhled může být v podstatě jakýkoliv, avšak pravidlem bývá, že mají rotory umístěné symetricky (pokud to je možné) na nejzazších bodech konstrukce. Střed zařízení potom většinou bývá místo, kde je osazena baterie (většinou jsou čistě elektrické), a kde můžeme najít náklad.

Díky, dnes již velice kvalitním, řídícím jednotkám jsou multirotorové zařízení velice stabilní. Dokonce až tak, že jsou považovány za stabilnější než jednorotorové zařízení. Řízení multikoptér probíhá pouze

pomocí změny tahu jednotlivých motorů. S již zmíněnými vyspělými řídícími jednotkami a většinou elektrickými motory, které reagují téměř okamžitě, jsou tak kromě stability i velice dobře řiditelné. Absence kolektivního a cyklického řízení značně zvyšuje mechanickou jednoduchost a notně snižuje náklady na údržbu i na samotné pořízení. Vzhledem k menším rotorům existuje u některých konstrukcí tohoto typu možnost instalace krytů rotorů. Tím se sníží pravděpodobnost nechtěného kontaktu s nimi, a tedy i zranění.

V předchozí kapitole bylo řečeno, že větší rotor je účinnější než více menších. U multikoptér tedy existuje jasná nevýhoda, a to malá účinnost. S tím jde ruku v ruce poměrně menší dolet, dostup i nosnost. S touto neefektivitou souvisí také problém s rozšiřitelností multikoptér do větších velikostí. Kromě efektivity je u větších velikostí problém se strukturální integritou a namáháním způsobeným rotory umístěnými na dlouhých ramenech daleko od sebe.

3.1.4 Hybridní

Hybridní bezpilotní prostředky spojují pevná křídla s kolmým vzletem a přistáním (VTOL). Tato konstrukční řešení jsou nejméně častá a v podstatě stále nejsou příliš rozšířená. Můžou existovat v mnoha formách, například jako některý stávající design s pevnými křídly, který má navíc většinou čtyři rotory umístěné na určitých částech draku. Kromě nich ovšem musí mít ještě rotor pro dopředný tah. Další řešení je konstrukce s pevnými křídly, která ale vzlétá a přistává takzvaně na ocas. Zadní část stroje je tedy zároveň přistávací zařízení. Ve vzduchu potom může plnit funkci ocasních ploch jako u standardního letadla. Existují také stroje, které využívají natáčecích (jednoho nebo více) pohonných jednotek. VTOL zařízení po odlepení od země a nastoupání určité bezpečné výšky přejde do dopředného letu a pokud za letu potřebuje z jakýchkoliv důvodů zůstat stát na místě, může opět přejít do visu.

Zmíněné konstrukční kombinace s sebou však přinášejí nevýhody. Patrné je to v případě zvýšené komplexnosti. Ať už se jedná o motory navíc, které je potřeba uchytit a napájet, nebo o otočný mechanismus natáčecích se motorů. Tyto komplexní řešení zvyšují cenu kupní i cenu údržby. Najdeme u nich také veškeré nevýhody zařízeních s pevnými křídly a multirotorových.

Spojení pevných nosných ploch, schopnosti visu a kolmého vzletu a přistání s sebou však nese také značné výhody. Především vysokou efektivitu pevných nosných ploch a variabilitu využití. Za vyšší náklady tedy získáme stroj, se kterým nemusíme dělat kompromisy mezi vytrvalostí a funkčností.

3.2 Možnosti využití

Využívání létajících bezpilotních prostředků se s pokrokem technologií velice změnilo. Od čistě vojenského využití jsme pokročili do stádia, kdy jsou využívány ve stále se rozšiřujícím počtu způsobů. S možnostmi využití neoddělitelně souvisí aktuálně platná legislativa. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.1.4, snahy o integraci bezpilotních prostředků jsou vidět. Avšak aktuálně je plné využívání těchto

strojů ve všech myslitelných oborech stále velice brzděno současnou legislativou. I přesto dnes najdeme značné možnosti aplikací bezpilotních létajících zařízení, které se počítají na desítky až stovky způsobů a po celém světě lidé přicházejí s dalšími a dalšími unikátního využití. Dají se shrnout do těchto bodů:

- Vojenské využití
- Zábava a sport
- Letecké fotografie a video
- Logistika
- Letecký monitoring a vyhledávání
- Mapování prostoru a terénu
- Speciální aplikace (ve spojení se speciálními senzory)

Na první místo patří vojenské využití. Jedno z prvních využití bezpilotních prostředků v historii bylo při rakouském bombardování volnými balóny Benátek. Dnes se bezpilotní létající zařízení používají k získávání informací, vzdušnému průzkumu a sledování osob, ať už pomocí klasických kamer, termálních anebo jiné dostupné technologie. Pozadu ovšem nyní nezůstává ani ofenzivní aplikace. Mnoho typů vojenských bezpilotních prostředků je pro tyto aplikace přímo určeno závěsy pro řízené střely, bomby a jiné ničivé prostředky. Dalo by se také říci, že velké řízené střely odpalované ze země, lodí nebo letadel jsou také bezpilotní prostředky, protože letí na určenou pozici zcela autonomně po naprogramované dráze. Zároveň tak ovšem můžeme definovat i všechny ostatní střely. Hlavní účel bezpilotních prostředků pro vojenské využití je však ochrana života pilotů, kteří nemusí mnohé nebezpečné mise provádět osobně. Finanční úspora při užívání levnějších UAS (v poměru k pilotovaným letounům) je však také silný motivátor.

Prvním civilním využitím, které zmíním je volnočasové létání pro zábavu nebo sport. Můžeme sem zařadit i závodění a akrobacii s bezpilotními prostředky. Natáčení a fotografování pro vlastní potřebu je také vhodné zařadit do této skupiny. Hlavní parametr stroje je zde jednoduchá ovladatelnost. Další parametry závisí na tom, jak si každý jednotlivý uživatel představuje zábavu.

Fotografování a natáčení za účelem přímého zisku je další velká skupina. Tyto fotografie a videa mohou sloužit novinářům, filmařům nebo profesionálním fotografům. Novináři jistě ocení snímky místa nehody z ptačí perspektivy nebo snímky celebrit, které by jinak nemohli udělat. Filmaři a fotografové pak uvítají nízké náklady, které bezpilotní prostředky mají oproti vrtulníkům s kamerovým štábem nebo fotografem na palubě. Takto pořízené snímky můžeme najít také jako fotografie budov a pozemků na prodej na webových stránkách realitních kanceláří [16]. Do marketingového využití fotografií a videí můžeme také zařadit letecké fotografie přírody, památek, obcí a tak podobně. Dokumentace stavu staveb, projektů a podkladové fotografie pro památkáře je další nezanedbatelný způsob využití. Zásadním parametrem bezpilotního prostředku je tady možnost uchycení správné kamery nebo fotoaparátu a jeho stabilizátoru (tzv. gimbal). Další důležitý parametr je letový čas. Většinou se také využije VTOL a vis.

V současné době několik společností v čele se společností Amazon vyvíjí UAS pro dopravu a dodání zboží. Tyto systémy by měly dodávat zboží na krátkou vzdálenost do 30 minut, a to pomocí dálkově ovládaného bezpilotního prostředku [17]. Vývoj ovšem brzdí legislativa, která tento způsob aplikace neumožňuje jak v Česku, tak v zahraničí. Společnosti proto komunikují s úřady a přicházejí s návrhy úpravy legislativy. Z principu je zásadní velká nosnost strojů, schopnost VTOL a dolet. Stejné požadavky jsou potom kladeny i na stroje, které mohou dovážet urgentní zdravotnický materiál k člověku v ohrožení života (například defibrilátor). Pro tento účel vznikl prototyp takzvaného „Ambulance Drone“ na Delft University of Technology [18]. Existují již také prototypy bezpilotních prostředků pro dopravu osob na krátké vzdálenosti. Reálnému nasazení těchto aplikací však opět brání legislativa.

Sběr informací v případě přírodních a jiných katastrof je jako stvořený pro bezpilotní stroje. Mohou být okamžitě k dispozici a pomohou lépe alokovat záchranné složky a díky různým přístrojům a kamerám, které jsou schopné nést, mohou také vyhledávat jednotlivé přeživší. Aplikace je tedy použitelná i pro pátrání a záchranu osob [19]. Podstatná je možnost vybavení stroje potřebnými přístroji pro vyhledávání lidí (optické a termální kamery). Monitorování plodin a hospodářských zvířat v zemědělství je také bezesporu aplikace, která ušetří finance. A je již proveditelná v dnešní době a s dnešními zákony. U těchto aplikací je bezpochyby též nutností VTOL. Ten už ale není potřeba například u monitorování produktovodů (ropných, plynových a dalších). Zde se využije více druhů bezpilotních zařízení. Multikoptéry a zařízení s jedním nebo dvěma nosnými rotory jsou vhodné pro identifikaci poškození a blízký průzkum, také díky schopnosti visu. Zařízení s pevnými nosnými plochami jsou vhodná ve sledování produktovodů na větší vzdálenost, identifikaci úniků kapalin a analýzu půdy a vegetace v okolí produktovodů [22]. Vzhledem k délce a odlehlé lokaci mnohých produktovodů, využije se zde velký možný dolet těchto strojů. Monitorování objektů, prostorů a státních hranic pomocí kamer s okamžitým přenosem obrazu je pak další způsob využití.

Mapování krajiny pomocí vytváření dat pro 3D mapy je další využití bezpilotních strojů. Využívá se k tomu různých senzorů a způsobů. Bezpilotní letouny tyto postupy nicméně velice zjednoduší a zlevní. Jejich použití již neomezuje ani hustá vegetace a složitý terén [23]. Standardně se letecké mapy (tzv. ortofotomapy) vytvářejí pomocí snímků pořízených družicemi nebo pilotovanými letadly. Tomu také odpovídá rozlišení ortofotomap, které je u družic kolem 30 cm a u pilotovaných letadel asi 20 cm na pixel, zde je však možno dosáhnout až 3 cm na pixel (to ale se značně zvýšenou cenou mapy) [20]. Bezpilotní zařízení s klasickými fotoaparáty mohou zajistit rozlišení až pod 1 cm na pixel za velice přijatelné náklady [20]. U bezpilotních zařízení samozřejmě existuje nevýhoda jejich menšího doletu, jsou tedy určeny pro mapování malých území ve vysokém rozlišení (multikoptéry) anebo území v jednotkách km (stroje s pevnými nosnými plochami) v rozlišení 5-10 cm na pixel [20]. Mapová data bezpilotních strojů jsou k dispozici ihned a samotné stroje jsou (oproti dalším způsobům získávání dat) velice rychle připraveny k provozu. Vzhledem ke všem těmto faktorům se tyto stroje dají využít

i k různému měření vzdáleností, výpočtu ploch (v zemědělství například pro získání informací o velikosti plochy zasažené škůdci) a dalším jiným geografickým úlohám, které mohou nahradit klasické geodetické zaměření.

Celkové možnosti využití bezpilotních zařízení ovšem rostou s variabilitou senzorů, které na ně je možné připevnit. Například termovizní kamera se využije v energetice (tepelné úniky, kontrola solárních a větrných elektráren), stavebnictví (skryté poškození), zemědělství (identifikace podpovrchových poruch drenážních systémů), ochraně přírody (součty zvěře) a krizových událostí. Multispektrální a hyperspektrální kamery potom například v ochraně životního prostředí a v precizním zemědělství (přesné mapy pro „chytré“ zemědělské stroje, hnojení). Laserový skener se potom jistě využije ve stavebnictví (přesné zaměřování, 3D modely) a v geodézii (popsáno v předchozím odstavci). Plynové senzory k měření znečištění ovzduší a radiační senzory potom poslouží v ochraně životního prostředí a při krizových událostech. Využití všech dalších senzorů je jen otázka jejich dostatečné miniaturizace a nízké spotřeby energie.

4 Pohony a vytrvalost

Pohonné jednotky poskytují bezpilotním létajícím prostředkům energii potřebnou k překonání gravitace a samotnému pohybu ve vzduchu. Bez ohledu na typ a princip funkce, je důležité, aby pohonný systém byl spolehlivý, snadno kontrolovatelný, měl dostatečnou energii k tomu, aby unesl sám sebe, svůj zdroj energie a náklad, a byl tak účinný, aby vytrvalost prostředku jako celku byla přijatelná. Výběr správné pohonné jednotky je jedním z nejdůležitějších úkolů ve vývojové fázi každého bezpilotního zařízení. Při výběru pohonného systému u bezpilotních létajících zařízení máme v podstatě stejné možnosti jako u pilotovaných letadel. Vzhledem k malé velikosti a tedy i hmotnosti většiny komerčních UA se však otevírají další možnosti, které by u pilotovaných letadel nebyly možné.

Rozdělení pohonů uvedu podle toho, jakým způsobem vyvozují tah a dále podle způsobu dodávání energie:

- Vrtulové pohony
    - Spalovací motory s vnitřním spalováním
        - Přímočarý pohyb pístu (vratné)
            - Zážehové
            - Vznětové
            - Žhavící
        - Rotační pohyb pístu – Wankelův motor
        - Turbovrtulové a turbohřídelové (turbínové)
    - Elektromotory
        - Akumulátory
        - Fotovoltaika
        - Palivové články
        - Ultrakondenzátory
        - Jaderné
    - Hybridní
- Reaktivní pohony
    - Proudové (turbínové)
        - Palivo z derivátů ropy
        - Jaderné
    - Pulzační a náporové
    - Raketové

Je patrné, že každý z vypsaných druhů pohonů se hodí jen pro určité aplikace. Vše záleží na velikosti a účelu bezpilotního prostředku. Některé pohony je dokonce možné použít jen při vojenském využití.

Vytrvalost každého typu pohonu všeobecně závisí na nesené zásobě paliva či zdroje energie. Zásadní je proto spotřeba této energie pohonem vůči vyvozenému tahu, hmotnost celého pohonného systému, a tedy samotná energetická hustota (o energetické hustotě pojednává kapitola 5). V následujících podkapitolách popíši výhody a nevýhody použití jednotlivých typů pohonů a co u každého typu může ovlivnit vytrvalost prostředku, vyhnu se však uvádění konkrétních čísel, neboť jde o přehled. Konkrétní hodnoty uvedu v kapitole 5 u perspektivních pohonů k aktuálnímu využití.

4.1 Vrtulové pohony

Vrtule fungují na stejném principu vyvození vztlaku jako křídlo. Každý list vrtule pohybující se ve vzduchu vytváří vztlak, který je ovlivněn jeho velikostí, úhlem natočení, tvarem a rychlostí otáčení. Tento vztlak vytvořený celou vrtulí (všemi listy) se nazývá tah. Tah můžeme směřovat tak, aby umožňoval dopředný pohyb, udržel prostředek s vrtulí ve vzduchu (vrtulníky, VTOL, atp.) nebo působil proti směru pohybu a tím brzdil (revers). Vrtule přeměňuje točivý pohyb z pohonné jednotky na kontrolovatelný dopředný pohyb létajícího prostředku. Vrtule mohou být vytvořeny z kovů (pro malé a střední modely nevhodné, odolné, ale těžké), dřeva, plastů nebo kompozitních materiálů, jako jsou uhlíková nebo skleněná vlákna. Každý materiál má své výhody a nevýhody, které se musí zvážit podle plánovaného způsobu využití stroje a hledaných letových parametrů. Například vrtule z uhlíkových vláken jsou vhodné pro stroje, kde potřebujeme lehkou, rychle reagující vrtuli s malou setrvačností, velkou tuhostí (dobře pohlcuje vibrace) a nevadí nám větší cena.

Vrtule jsou v principu velice jednoduché a mohou tedy být jednoduše zmenšeny pro použití v malých UA. Proto jsou také v současnosti nejpoužívanějším způsobem vyvozením tahu u bezpilotních létajících zařízení. K tomu samozřejmě přispívá jejich nízká cena v poměru k ostatním způsobům vyvození tahu. I u vrtulových pohonů se ovšem najdou dražší varianty. Změna tahu se provádí změnou rychlosti otáčení nebo úhlem natočení listů. Změna je tedy rychlejší než u proudových pohonů. Vzhledem k těmto vlastnostem a principu vyvození tahu jsou vrtulové pohony používány u multirotorových prostředků zcela bez konkurence ostatních pohonů. Což již vyplývá z názvu celé této kategorie bezpilotních prostředků.

Mezi nevýhody můžeme zařadit již v předchozí kapitole zmiňované riziko zranění člověka nebo zvířete při kontaktu s pracující vrtulí. Při kontaktu s jakýmkoliv objektem je velká šance, že dojde ke zničení celého prostředku kvůli silám, která otáčející se vrtule přenáší. Její efektivita se velice mění s tvarem a úhlem nastavení. Můžeme například mít vrtuli určenou pro ekonomický let v cestovní výšce při určitých otáčkách nebo takovou, která pracuje efektivně při nižších cestovních rychlostech. Úhel nastavení je možný měnit za letu pomocí systému stavění. Ten ovšem zvyšuje komplexnost celého systému. Limitem je ovšem rychlost otáčení. Pokud je rychlost tak vysoká, že se špičky listů vrtule pohybují blízko nebo dokonce nad hranicí rychlosti zvuku, klesá velice rychle efektivita. Vrtule jsou

citlivé na vibrace, protože u nich hrozí riziko prasklin. Větší vrtule (převážně ty pro pilotované letouny a vrtulníky) jsou velice hlučné a hluk v letectví je v současnosti důležité téma pro veřejnost. UA s menšími ovšem neprodukují ani zdaleka tolik hluku a tento problém v jejich případě není tak podstatný. Jejich maximální dostup je menší než proudových motorů.

4.1.1 Spalovací motory s vnitřním spalováním

Motory s vnitřním spalováním získávají energii spalováním paliv ve spalovacích komorách. Spalováním se mění chemická energie paliv na tepelnou (vedlejší produkt) a mechanickou energii. Mechanická energie se přenáší na vrtuli pomocí klikové hřídele a reduktoru (který snižuje otáčky na požadované a vhodné pro vrtuli). Tyto motory dále rozdělujeme podle způsobu přeměny tepelné energie na mechanickou.

4.1.1.1 Přímočarý pohyb pístu

Motory s přímočarým pohybem pístu neboli vratné pístové motory mají v dnešní době široké využití. Existují v mnoha podobách, velikostech, sestaveních a konfiguracích. Každý druh má rozdílný výkon, hmotnost, komplexitu a efektivitu. Tyto motory jsou často definovány podle toho, kolik má válců, zdvihového objemu válců nebo konfigurací válců (řadové, V, radiální a další konfigurace). Vratné pístové motory jsou ze všech kategorií nejširší. Zahrnují jak Ottův termodynamický cyklus, tak Dieselův cyklus. Stejně tak pojímají čtyřdobé a dvoudobé spalovací cykly. Jako palivo slouží různé destiláty ropy jako je benzín, letecký benzín AVGAS nebo motorová nafta a kerosin. Nicméně všechny typy obsahují obměny stejných hlavních součástí a mají stejný základní princip práce, při které se mění potenciální energie uložená v palivu na mechanickou.

Čtyřdobé motory fungují na následujícím principu. Směs různých destilátů ropy (nebo metanolu a nitrometanolu) a vzduchu vstoupí do uzavřené spalovací komory ve fázi sání přes sací ventil, poté je stlačen v kompresní fázi. Podle druhu motoru je posléze zapálen buď zapalovací svíčkou (zážehový motor), samo se vznítí (vznětové motory) nebo zapálí pomocí rozžhaveného vlákna svíčky, které je udržováno rozžhavené hořením paliv (žhavící motory). Tato fáze se nazývá expanze a hoření směsi paliva a vzduchu stlačí píst dolů. Pohybem klikové hřídele se píst opět vytlačí nahoru, otevře se výfukový ventil a spaliny jsou vytlačeny z válce. Poté se opakuje sací fáze.

Dvoudobé motory jsou obvykle menší a lehčí, používají se proto například pro motorové pily a ventilátory (větráky). Dvoudobé motory nemají ventily, ale dva průřezy na straně válce, které jsou při pohybu pístu nahoru zakryty. Když se píst pohybuje dolů, vstoupí směs paliva a vzduchu do válce a zároveň vytlačí spaliny z druhého průřezu na opačné straně. Poté píst stoupá, tím uzavře oba průřezy a stlačuje palivovou směs. V horní úvrati zapálí směs svíčka a hořící palivo vykoná práci na pístu, který stlačuje opět dolů. V malých dvoudobých motorech se palivo míchá ještě s olejem, který poskytuje

lubrikaci. To má za následek značnou kouřivost dvoudobých motorů. Existují také dvoudobé motory spalující motorovou naftu, ale i velké verze dvoudobých motorů, které se používají pro nákladní lodě. Tyto motory mají poněkud odlišnou konstrukci, spalují motorovou naftu, ale principem práce se neliší.

Výhody a nevýhody vratných pístových motorů pro použití v UA shrnuji v následující tabulce 1:

Vratné pístové motory v UA	
Pozitiva	**Negativa**
Vyzkoušená a používaná technologie - výhodné pro údržbu a opravitelnost	Vibrace - může znamenat nevhodnost pohonů pro určité způsoby využití UA (například natáčení) - snižují dlouhodobou spolehlivost
Vznětové motory používají netěkavou motorovou naftu	Hluk - ekologická zátěž, na kterou se musí brát ohled při provozu - také může omezit způsoby využití UA
Možnost nízké hmotnosti	Spaliny - může znamenat nevhodnost pohonů pro určité způsoby využití UA (například natáčení)
Mohou být malé (zvláště žhavící motory)	Mnoho pohyblivých částí
Mohou být vybaveny turbodmychadly nebo kompresory - větší výkon a dostup na úkor větší komplexity a ceny	Požadavky na těsnění a mazání
Snadné a rychlé doplnění paliva	Požadavky na chlazení - vychází z generovaného odpadního tepla, tedy menší efektivity motorů - zvýší komplexitu - zvýší hmotnost - chladicí systémy založené na oběhu kapaliny musejí být uzavřené ve svém oběhovém systému
Vytrvalost závislá na spotřebě paliv, maziv a velikosti nádrží	Nemožnost startu motoru ve vzduchu pro některé typy (v případě zastavení chodu)
	Vytrvalost závislá na spotřebě paliv, maziv a velikosti nádrží

Tabulka 1: pozitiva a negativa vratných pístových motorů pro použití v UA

Jak již bylo zmíněno, vytrvalost těchto motorů závisí na spotřebě paliv a maziv. Závisí tedy na kapacitě nádrží těchto kapalin. Můžeme konstatovat, že hmotnost pístových vratných motorů je závislá na požadovaném výkonu motoru.

4.1.1.2 Rotační pohyb pístu

Spalovací motor s rotačním pohybem pístu neboli Wankelův motor, měl být alternativa k vratným motorům. Tyto motory jsou založeny na principu souvislého a cyklického zvětšování a zmenšování prostoru mezi válcem a pístem, které je dosaženo pomocí částí s rovnoměrně se otáčejícím těžištěm. Zaujímala menší prostor než mechanizmus s ojnicí a klikou. Všechny části motoru tedy rotují konsistentně jedním směrem. Fáze sání, komprese, expanze a výfuku jsou stejné jako u čtyřdobého vratného motoru, probíhají však všechny najednou.

Vnitřní rotující trojúhelníkové jádro se zahnutými stranami (tvar známý jako Reuleaxův trojúhelník) rozděluje spalovací komoru do tří částí. Rotační pohyb excentrické hřídele se stlačuje směs plynů a paliva. K zapálení směsi dojde v místě s největším stlačením pomocí zapalovací svíčky (zážehové verze rotačních motorů jsou pouze experimentální). Expanze pohání rotaci jádra a hřídele.

Probíhají zde tedy tři expanzivní fáze na jedno otočení rotoru. Oproti tomu u dvoudobých vratných motorů dochází pouze k jedné expanzi za otočení rotoru a u čtyřdobých k jedné expanzi za dvě otočení rotoru. U Wankelova rotačního motoru se hřídel otáčí třikrát rychleji než rotor, což má za následek zhruba dvojnásobný výkon oproti čtyřdobému vratnému motoru o stejném objemu [25]. Tyto motory jsou tedy typicky menší než vratné motory o stejném výkonu.

Výhody a nevýhody rotačních pístových motorů pro použití v UA shrnuji v následující tabulce 2:

Rotační pístové motory v UA	
Pozitiva	**Negativa**
Větší výkon a vyšší maximální otáčky oproti vratným motorům o stejném objemu	Požadavky na chlazení - malá velikost konstrukce tohoto motoru značně zvyšuje složitost chlazení, - kapalinové chlazení zvyšuje komplexnost a hmotnost
Lehčí a menší než vratné motory	Značně vyšší spotřeba paliva než u porovnatelných vratných motorů - směs paliva a vzduchu je při hoření v kontaktu s větší plochou motoru než u vratných motorů se srovnatelným objemem – větší tepelné ztráty, - část potencionální energie při expanzi vyjde výfukem – nemožnost upravovat časování (absence ventilů)
Mnohem tiší než vratné motory	Vyšší elektromagnetické a tepelné zatížení než u porovnatelných vratných motorů [26] - vysoké teploty spalin – materiál výfukového vedení musí tyto teploty vydržet a musí se s nimi počítat i u celkové konstrukce UA
Méně vibrací než u vratných motorů	Vysoké emisní zatížení spalinami

- jemný chod motoru – může být přínosné u způsobů využití vyžadujících nízké vibrace	- způsobeno systémem mazání (spolu s palivem se spaluje i mazivo), - možné problémy s ekologickými standardy, - může znamenat nevhodnost pohonů pro určité způsoby využití UA (například natáčení)
Méně pohyblivých součástí než u vratných motorů - absence ventilů a těžké klikové hřídele	Těsnění jednotlivých vrcholů jádra - nejslabší článek celého motoru – může vést k problémům s kompresí, a tedy se ztrátou výkonu
Nižší cena generální opravy	Vysoká spotřeba oleje (maziva) - vzhledem k principu funkce a těsnění vrcholů jádra se při každé expanzi spálí také malé množství oleje, - bez dostatečných zásob oleje (nebo jiného řešení) to negativně ovlivní vytrvalost UA
Spolehlivé - s nárůstem hodin provozu se však spolehlivost značně snižuje – je potřeba poměrně častá generální oprava motoru	Menší výkon v nízkých otáčkách

Tabulka 2: pozitiva a negativa rotačních pístových motorů pro použití v UA

Z výčtu pozitiv a negativ Wankelova motoru můžeme konstatovat, že pro jeho použití v UA musíme udělat značné kompromisy. Jemný chod motoru, vysoký výkon při vysokých otáčkách při malé hmotnosti motoru je pro použití v UA velice lákavé. Vysoká spotřeba paliv a maziv je však tak značná nevýhoda s velkým negativním vlivem na vytrvalost, že to může zamezit použití tohoto pohonu ve většině typů UA. Zejména však u těch menších.

4.1.1.3 Turbovrtulové a turbohřídelové

Turbovrtulové motory jsou téměř totožné s proudovými (turbínovými) motory. Jejich princip tedy bude vysvětlen v kapitole 4.2.1. Rozdíl oproti reaktivním proudovým motorům je ten, že naprostá většina energie vytvořená spalováním směsi paliva a vzduchu je využita k pohonu turbín poháněných kromě kompresoru také hřídel, která je spojena s reduktorem. Reduktor mění otáčky na ty přijatelné pro vrtuli a pohání ji. Turbohřídelové motory jsou pak obdobou turbovrtulových, ale jejich hřídel a reduktor pohání nosnou vrtuli vrtulníků.

Tato kategorie sdílí většinu pozitiv a negativ reaktivních turbínových pohonů. Je třeba zdůraznit, že tyto motory jsou méně účinné v malých výškách a při malém nastavení výkonu (z maximálního) než pístové motory. Z těchto důvodů je využití této kategorie motorů omezeno na bezpilotní stroje, kde se s větším výkonem a dostupem počítá. Pro ostatní využití by kategorie nebyla ideální se svou větší spotřebou. Mají však vyšší hustotu výkonu než pístové a jsou účinnější než proudové.

4.1.2 Elektromotory

Elektrické motory vytvářejí mechanický pohyb (práci) z elektrické energie. Elektrické generátory naopak vytvářejí z mechanického pohybu elektrickou energii. Oba tyto systémy se skládají ze dvou základních stavebních prvků, a to ze statoru a rotoru.

Většina elektromotorů pracuje na základě silových účinků magnetického pole. Využívá se působení Lorentzova zákona, který popisuje působení síly na náboj nebo vodič v elektromagnetickém poli. Na vodič protékaný elektrickým proudem nacházejícím se v magnetickém poli působí síla úměrná kolmé pravoúhlé složce magnetické indukce a velikosti elektrického proudu tekoucího vodičem. Jednoduše lze říci, že využíváme vzájemné přitahování a odpuzování dvou elektromagnetů nebo elektromagnetu a permanentního magnetu. Sílu elektromagnetu řídíme elektrickým proudem. Počet magnetů nebo elektromagnetů (cívek) se liší u jednotlivých druhů motoru. Elektrické motory lze samozřejmě konstruovat i využitím dalších fyzikálních jevů, jako je elektrostatická síla, piezoelektrický jev a další. Tyto konstrukce jsou však pro využití pro pohon UA nevhodné a nebudu je proto dále zmiňovat.

Elektromotory lze velice zjednodušeně rozdělit podle různých parametrů. Podle napájecího napětí na stejnosměrné, střídavé a univerzální. Na ty s mechanickým komutátorem, střídavé s točivým nebo eliptickým polem a na motory s elektronickou komutací. Dále podle způsobu buzení je rozlišujeme na ty s elektronickým buzením a buzením permanentními magnety. [27] Pro pohon UA jsou vhodné dvě základní nejdůležitější skupiny motorů, a to komutátorové a bezkomutátorové.

Komutátorové motory mohou pracovat jak na stejnosměrném napětí, tak na střídavém (záleží na poddruhu). Při napájení střídavým napětím musí ale mít vinutí statoru i rotoru z elektromagnetů (cívky statoru i rotoru budou mít vždy stejnou fázi). Napájení stejnosměrným proudem (což je případ UA) pak dává možnost použít elektromagnet nebo permanentní magnet. Komutátor je kontaktní rotační přepínač spojený s rotorem. Je tvořen rotačně uloženými vodivými lamelami oddělenými izolací (počet lamel je úměrný počtu cívek rotoru). Takzvané kartáče, což jsou většinou uhlíkové sběrače, tvoří s komutátorem kluzký kontakt přivádějící elektřinu k jednotlivým cívkám rotoru. Tento kontakt má však kvůli mechanickému opotřebení omezenou životnost. Je to hlavní, a kromě ložisek, v podstatě jediná součást komutátorového motoru, která vyžaduje výměnu po opotřebení. Z tohoto důvodu jsou komutátorové motory nevhodné pro nepřetržitý provoz (UA, průmyslové aplikace). Naopak jejich použití je více než dostačující například v domácích aplikacích a tam, kde motor neběží dlouho kontinuálně. Na tomto kontaktu také vzniká jiskření, a tedy i značné elektromagnetické rušení. S tím je potřeba počítat při návrhu celého stroje s těmito motory. Maximální točivý moment dodávají, když stojí. Točivý moment se poté lineárně zmenšuje až k maximálním otáčkám motoru. Výhodou komutátorových motorů (poddruhů, který nás zajímá) je, že k regulaci jejich otáček stačí pouhá změna napětí dodávaného proudu. Jedná se tedy o velice jednoduché motory a k jejich ovládání není potřeba žádné další nákladné elektroniky.

Bezkomutátorové motory se také někdy nazývají elektronicky komutované nebo bezkartáčové motory, či v angličtině Brushless Direct Current (BLDC). Jak už napovídá název, tyto motory nemají mechanický rotační komutátor. Životnost bezkomutátorových motorů závisí pouze na odolnosti ložisek. Jejich vlastnosti do jisté míry odpovídají komutátorovým motorům. Obvykle mají rotor z permanentních magnetů. To řeší problém dopravy proudu do otáčejícího se rotoru. Mechanickou komutaci zde nahrazují elektronické obvody. Bezkomutátorové motory mají podobně jako střídavé motory několikafázové vinutí napájené z výkonového elektronického modulu. Ten je ovládán řídícími elektronickými obvody podle požadované činnosti motoru. Řízení motoru je podmíněno znalostí polohy hřídele (rotoru) vůči statoru. Tuto informaci může dodat několik druhů čidel, a to optické, indukční nebo magnetické. Čidla dají řídící jednotce (ESC – Electronic speed control) informaci o poloze hřídele a ta podle této polohy dodává pulsy proudu jednotlivým cívkám. Díky tomu, že motoru musí předcházet ESC, můžeme těmto motorům dodávat jak stejnosměrný, tak střídavý proud. Na dané proudy musí ovšem být stavěn samotný ESC. Křivka točivého momentu je podobná jako u komutátorových motorů, jejich účinnost je však vyšší. Celková účinnost BLDC motoru se pohybuje okolo 90 % [28]. Je to tedy jeden z nejúčinnějších druhů pohonu pro UA. Značným problémem ovšem zůstává přívod energie, kdy současné nejčastější řešení (akumulátory) značně snižuje tuto výhodu. Absence kartáčového komutátoru také značně snižuje elektromagnetické rušení od motoru. Flexibilita ovládání BLDC motorů je oproti komutátorovým značná. Díky elektronickým řídícím jednotkám, můžeme motory využívat skutečně naplno. Maximální výkon jednotlivých motorů je potom omezen pouze ložisky a množstvím tepla, které je motor schopný odvést. Jejich výrobní náročnost a nutnost použití ESC však zvyšuje pořizovací náklady, které jsou vyšší než u komutátorových motorů o stejných výkonech.

Výhody a nevýhody elektromotorů pro použití v UA shrnuji v následující tabulce 3:

Elektromotory v UA	
Pozitiva	**Negativa**
Elektrický pohon	Elektromagnetické rušení - problém zvláště u komutátorových motorů, ale i u BLDC, - v současnosti velice aktuální, zvlášť v kombinaci s rádiově řízeným UA
Velmi vysoká účinnost - BLDC motory se zvlášť vysokou účinností (oproti komutátorovým), - do účinnosti se ovšem nesmí zapomenout zahrnout účinnost způsobu dodání elektrické energie	Silnější motory vyžadují vysoké pracovní proudy - nebezpečí při nesprávné manipulaci
Velice nízká až žádná požadovaná údržba - komutátorové motory však na rozdíl od BLDC potřebují pravidelně měnit kartáče	Citlivost na kontakt s vodou nebo jinými vodivými tekutinami a menší odolnost proti prachu

Vysoká spolehlivost	Potenciální jiskření u komutátorových motorů - nebezpečí vzplanutí, - potenciálně vyšší riziko při použití s vodíkovými palivovými články
Robustní	
Oproti termodynamickým motorům vydávají při práci pouze zanedbatelné teplo	
Vysoký točivý moment - BLDC s větší účinností mají i vyšší točivé momenty	
Škálovatelnost	
Tichost	
BLDC vhodné pro kontinuální použití	
Komutátorové motory jsou oproti jiným řešením velice levné, to ovšem neplatí pro BLDC, které mohou být stále poměrně drahé (musí se započítat i potřebná další elektronika ESC atp).	

Tabulka 3: pozitiva a negativa elektromotorů v UA

Z výše uvedených popisů nejpoužívanějších druhů elektrických motorů, výčtu jejich výhod a nevýhod pro použití v UA je jasné, že to je jeden z nejslibnějších druhů pohonu. S vysokou účinností, velkou spolehlivostí a nízkou potřebou údržby jsou jako předurčené pro velice vysokou vytrvalost. Té v současnosti brání pouze zdroj elektrické energie s dostatečnou energetickou hustotou.

4.1.2.1 Zdroje elektrické energie pro elektromotory

Jak již bylo řečeno v předchozí kapitole, hlavním problémem pro elektrické pohony jsou zdroje elektrické energie. Existuje několik možností vhodných pro aplikaci v UA. V následujících podkapitolách je představím s důrazem na ty nejpoužívanější v komerčních UA.

4.1.2.1.1 Akumulátory

Akumulátory neboli baterie jsou elektrochemickým úložištěm energie. Umožňují vratnou chemickou reakci. Skládají se z článků (proto baterie – více článků najednou), které jsou spojeny sériově a tím celá baterie dosáhne požadovaného napětí. Nepotřebují žádné externí palivo nebo kyslík, jsou to nezávislé a samostatné jednotky, jejichž potenciální energie je uvolněna jen pokud je na svorky aplikováno zatížení (rezistor, motor, atd.). Jednotlivé články se skládají z elektrod – anody a katody a vodivého elektrolytu, který je spojuje v sérii.

Akumulátorů je velké množství druhů, pro provoz v UA se však hodí jen některé. Všeobecně u nich obětujeme životnost (počet cyklů nabití a vybití) a cenu za vyšší energetickou hustotu.

Existuje několik různých druhů dobíjecích baterií, které se používají v UA:

- Nikl-kadmiový akumulátor – NiCd

NiCd jsou dobře zavedené akumulátory se širokým využitím. Nominální napětí jednoho článku je 1,2 V. Jejich energetická hustota však nemůže konkurovat novějším typům jako jsou NiMH a LiPo (o energetické hustotě jednotlivých typů baterií v kapitole 5).

Výhodou NiCd akumulátorů je však jejich odolnost, spolehlivost a robustnost. Dále mají vysokou odolnost proti hlubokému vybití, vysoký počet cyklů před zhoršením vlastností, mají maximální vybíjecí proud přes 15C (15*kapacita baterie) [30]. Existují také typy určené k rychlému nabíjení při násobně větším proudu než 1C.

Trpí však takzvaným paměťovým efektem. Ten způsobuje, že pokud se baterie pravidelně nabíjí v určitém stavu nabití, tak si ho „zapamatuje“ a při vybíjení zde poklesne napětí na velice nízkou úroveň, při které již spotřebič není schopný pracovat. Mají také vysokou úroveň samovybíjení. Další zásadní nevýhodou je toxicita použitého těžkého kovu kadmia. Tyto baterie musí být důsledně recyklovány, protože únik kadmia do prostředí nebo jeho spálení ve palírnách odpadu je velice nebezpečné pro životní prostředí. Směrnice Evropského Parlamentu a Rady 2006/66/ES proto zakazuje uvádět na trh NiCd baterie pro komerční účely (s několika výjimkami) [31]. Nové baterie tohoto druhu již tedy nejsou k dostání, ale je vhodné je uvést pro porovnání s novými technologiemi.

- Nikl-metal hydridový akumulátor – NiMH

NiMH je chemickou reakcí podobná NiCd, ale namísto toxického kadmia je zde na negativních elektrodách použita speciální slitina vytvářející s vodíkem směs hydridů. Jejich nominální napětí je také 1,2 V na článek.

Jak již bylo uvedeno, tyto akumulátory mají oproti starším NiCd násobně větší energetickou hustotu. NiMH mají malý vnitřní odpor a při vybíjení tedy udržují téměř konstantní napětí s prudkým poklesem na konci cyklu. Jsou také bezpečné a poměrně tolerantní vůči podvybíjení (ne však tolik jako NiCd). Přebíjení je však může zničit. Mají vysoký počet cyklů a velké rozpětí provozních teplot [32]. Snížené napětí takzvaného paměťového efektu může nastat, ale paměťový efekt zde není trvalý a po několika cyklech se kapacita baterie vrátí k normálním hodnotám.

Vybíjecí charakteristiky se liší u každého výrobce, všeobecně můžeme uvést maximum okolo 5C pro některé modely. NiMH mají značně vyšší samovybíjení než NiCd (zvláště první den), ale již existují verze s velice nízkým samovybíjením (ale nižší maximální kapacitou). Oproti NiCd jsou nezávadné pro životní prostředí. V současnosti jsou tyto akumulátory znatelně levnější než LiPo a tím jsou i přes své nedostatky nezanedbatelnou konkurencí.

- Lithium-polymerový akumulátor – LiPo

Lithium-polymerové nebo přesněji lithium-polymerové iontové akumulátory jsou poměrně nový typ. Jedná se o poddruh lithium iontových akumulátorů se značnými výhodami, jako je větší energetická hustota a absence tvrdého obalu.

Tyto baterie jsou tedy do určitých mezí ohebné a dají se vyrobit podle požadovaného tvaru. LiPo akumulátory existují v mnoha variantách, které jsou pojmenovány podle aktivního materiálu. Nejběžnější jsou $LiCoO_2$ s nominálním napětím 3,6 V (toto nominální napětí je nejběžnější i pro většinu dalších druhů). Tento poddruh je nejrozšířenější pro vysokou energetickou hustotu (ve vztahu k hmotnosti). Jeho nevýhodou je menší tepelná stabilita a relativně menší životnost v porovnání s ostatními poddruhy LiPo. [35]

LiPo baterie celkově mají řadu výhod oproti druhům zmiňovaným výše, a to: vysoké nominální napětí (oproti NiMH a NiCd), velmi vysoká energetická hustota (jak ve vztahu k hmotnosti, tak k objemu), nízká hmotnost, v případě správného zacházení velká životnost (nedosahuje však životnosti výše zmiňovaných), nízké samovybíjení (okolo 8% za měsíc při 20°C), nemají paměťový efekt, dobrá bezpečnost (zvláště poddruh $LiFePO_4$), neobsahují lithium v kovovém stavu stejně jako olovo, rtuť nebo kadmium a jsou tak bezpečné pro životní prostředí. Během vybíjení je patrnější změna napětí a je tak lepší indikace stavu akumulátoru.

Mezi nedostatky patří omezení nabíjecího proudu na C/2 nebo 1C (záleží na výrobci, je možný i vyšší). Maximální vybíjecí proud je pak specifický pro jednotlivé modely, ale u těch v současnosti nejpokročilejších může dosahovat 100C a špičkové maximum 200C. Tyto typy mají malý vnitřní odpor, ale ty s menšími maximálními vybíjecími proudy ho mají poměrně velký a při vybíjení se nezanedbatelně zahřívají [34]. Pracovní teploty se opět liší podle druhů, ale všeobecně jim nesvědčí teploty pod bodem mrazu, chemické reakce se zpomalují. Pokud je v mrazech větších, než je teplotní rozsah udaný výrobcem necháme příliš dlouho, riskujeme trvalé zastavení chemických reakcí v akumulátoru a jeho znehodnocení. V případě teplot vyšších, než je provozní, hrozí dramatické snížení životnosti. Účinkům teplot na kapacitu se budu věnovat v kapitole 5. LiPo akumulátory jsou velice náchylné na přebíjení, kdy hrozí „nafouknutí“ baterie, vlivem tvorby plynu v ní. Plyny jsou důsledkem dekompozice elektrolytu a tvoří je převážně kyslík. Následně tedy hrozí i exploze nebo požár. Jsou také náchylné na podvybíjení, kdy při poklesu napětí na článek pod povolenou mez (udanou výrobcem), hrozí trvalé zničení akumulátoru [33]. Proto má většina LiPo akumulátorů řídící obvody a takzvaný servisní konektor, který umožňuje sledovat napětí jednotlivých článků. Jejich poslední značnou nevýhodou je potom vyšší prodejní cena (v porovnání s NiMH).

V současnosti jsou pro použití v UA nejpoužívanější LiPo akumulátory. Jak vyplývá z jejich popsaných vlastností jsou pro tuto aplikaci vhodné. Nejdůležitější parametr je samozřejmě energetická hustota, a to jak ve vztahu k hmotnosti, tak i k objemu.

Výhody a nevýhody akumulátorových systémů pro použití v UA shrnuji v následující tabulce 4:

Akumulátorové systémy v UA	
Pozitiva	**Negativa**
Efektivní - minimální odpadní teplo	Omezená vytrvalost - i při vysoké energetické hustotě současných baterií jsme tímto parametrem velice omezeni, - ve většině komerčních aplikací okolo 20-30 minut letového času
Bez odpadních látek	Dobíjení akumulátorů - dlouhá doba kvůli omezení nabíjecího proudu, - neefektivnost dobíjecího procesu (vybíjení je však efektivní)
Nezávislé a samostatné - bez externích reaktantů - nízká komplexita	Zahřívání způsobené vnitřním odporem - u kvalitnějších baterií a při výběru vhodného modelu je toto negativum značně omezeno;
Žádné pohyblivé části	Citlivost na teplotní a další parametry prostředí - výkony akumulátorů (zvláště kapacita) se mohou velice lišit v rozdílných teplotách okolí;
Znovupoužitelné (nabíjecí)	Nebezpečné chemikálie - riziko výbuchu nebo požáru při nesprávné manipulaci, - riziko pro životní prostředí u některých druhů při kontaminaci prostředí
Schopné dodat okamžitě potřebný elektrický proud	

Tabulka 4: pozitiva a negativa akumulátorových systémů pro použití v UA

4.1.2.1.2 Fotovoltaika

Fotovoltaický jev vzniká v polovodičích, když foton s dostatečnou energií uvolní elektron z valenčního pásu do pásu vodivostního. Ve valenčním pásu zůstane „chybějící elektron“, tzv. díra, kterou lze považovat za elementární kladný náboj (díra se pohybuje tak, že se do ní přemístí valenční elektron sousedního atomu, čímž se díra přesune na původní místo tohoto elektronu). Zjednodušeně lze prohlásit, že dopadem fotonu se vytvoří pár pohyblivých nábojů elektron-díra. Tyto náboje se difúzí nebo působením elektrického pole v okolí PN (dioda) přechodu pohybují ve směru k elektrodě se stejnou polaritou – elektron k záporné a díra ke kladné. Při propojení elektrod vnějším obvodem putují elektrony k opačné elektrodě, kde rekombinují s děrami – vnějším obvodem prochází elektrický proud. [37]

Fotovoltaika je tedy způsob získávání elektrické energie ze slunečního záření, které je prakticky nevyčerpatelný zdroj. Účinnost kvalitních komerčních fotovoltaických panelů se dnes pohybuje okolo 20% [38]. Probíhající vývoj však slibuje panely s efektivitou 30 až 40% [39]. Z principu se tato technologie musí kombinovat s nějakým způsobem uložení energie. Nejčastěji se využívají akumulátory. Energie z fotovoltaických panelů však může napájet zpětnou elektrohydrózu a vytvářet

tak vodíkové palivo, které může napájet palivový článek k dodávce energie v noci nebo při nedostatku slunečního světla. Ať už tedy na fotovoltaické panely spoléháme s úplným pokrytím energetických nároků UA nebo ho využíváme jen k průběžnému dobíjení, vždy potřebujeme způsob uložení energie. K dostatečnému využití fotovoltaického zdroje energie je nutná velká plocha pokrytá fotovoltaickými panely (vzhledem k současným účinnostem). Jejich využití je tedy z tohoto důvodu prakticky omezeno na typy UA s pevnými křídly, které mohou sloužit jako plocha pro umístění panelů. Při využití tohoto systému je také nutné mít na paměti, že účinnost se mění nejen v průběhu dne a s počasím, ale také se zeměpisnou šířkou. Čím příměji dopadá světlo na panely, tím jsou účinnější. Již byly sestrojeny UA využívající fotovoltaiku a akumulátory, které zvládnou let přes den i noc bez přestávky.

Výhody a nevýhody fotovoltaických systémů pro použití v UA shrnuji v následující tabulce 5:

Fotovoltaické systémy v UA	
Pozitiva	**Negativa**
Primární zdroj energie není nesen na palubě (slunce)	Drahé
Tichost	Malá účinnost
Žádné pohyblivé části - minimální údržba, až na čištění panelů	Citlivost na světelné podmínky - vliv zeměpisné šířky, - vliv počasí, - použitelné pouze ve dne
	Vyžaduje úložiště elektrické energie

Tabulka 5: pozitiva a negativa fotovoltaických systémů pro použití v UA

Z vypsaných výhod a nevýhod je jasné, že fotovoltaické systémy mají velký potenciál pro použití v UA určené pro extrémně dlouhé, ale pomalejší lety. UA sestrojené speciálně pro použití s fotovoltaikou musí být extrémně lehké, aby jejich pohonným jednotkám (elektromotorům) stačila elektrická energie dodávaná panely.

4.1.2.1.3 Palivové články

Palivový článek je elektrochemické zařízení přeměňující chemickou energii paliva a okysličovadla na elektrickou energii (princip podobný akumulátoru). Skládá se ze dvou elektrod, které odděluje membrána nebo elektrolyt. K jedné elektrodě (anodě) je přivedeno palivo a k druhé (katodě) okysličovadlo. Ty se katalyticky slučují. Palivový článek tedy může pracovat teoreticky nepřetržitě (pokud není přerušen přívod paliva nebo okysličovadla). Existuje mnoho typů palivových článků. Nejpoužívanější a nejlepší pro aplikaci v UA (a dopravě celkově) jsou protonové výměnné membránové palivové články (PEMFC). Za zmínku ještě stojí palivové články s alkalickým elektrolytem, které byly využity už při letech na měsíc.

PEMFC využívá jako elektrolyt polymerní membránu, která je vodivá pro vodíkové ionty (protony) a musí být zvlhčována. Jako katalyzátor se nejčastěji používá platina nebo její slitiny a vytváří plynově difúzní elektrodu. Jako palivo většinou slouží vodík a jako okysličovadlo kyslík, který je možné získat z atmosféry (čili se použije atmosférický vzduch bez nutnosti další operace). Vodík se při styku s katalyzátorem ionizuje na elektrony a protony. Membrána propustí pouze protony a na katodě se s nimi sváže kyslík při elektrochemickém oxidačním procesu, který potřebuje elektrony. Toto přitáhne elektrony z anody přes zatížení a tento vyprodukovaný proud je použit jako zdroj elektrické energie [26].

Energie získaná palivovými články je škálovatelná a samotný proces je až třikrát efektivnější než spalování [26]. Použití PEMFC v UA má řadu výhod zejména oproti bateriovým systémům, a to je vysoká energetická hustota vodíkového paliva a vypouštění výsledných chemikálií (voda). Zásadní je násobně lepší vytrvalost PEMFC oproti bateriím. Při letech na kratší vzdálenost je výhodnější baterie, kvůli větší hmotnosti vodíkové nádrže a systému samotnému. Při delších letových časech už však jasně vyhrává PEMFC [40]. Bylo dokázáno, že PEMFC jsou efektivnější od 4 MJ energie, která je potřeba pro let [40]. 4 MJ odpovídají 1111,1 Wh a akumulátor s touto kapacitou je již nepřiměřeně velký a těžký. Na trhu se ani neobjevují samostatné baterie s touto kapacitou určené pro použití v UA. Negativem je ovšem velká komplexita PEMFC přinášející potenciální body selhání.

Výhody a nevýhody PEMFC pro použití v UA shrnuji v následující tabulce 6:

PEMFC v UA	
Pozitiva	**Negativa**
Tichost	Drahé
Málo pohyblivých částí	Komponenty pod tlakem - v palivovém článku a nádrž s vodíkem
Žádné škodlivé emise (pouze voda)	Komplexní (zvláště oproti akumulátorovým systémům)
Vyšší energetická hustota než akumulátory	Musí efektivně řešit vypouštění odpadní vody nebo páry, aby nedošlo k zaplavení katody
Možnost zpětné reakce	Citlivý katalyzátor na kontaminaci
Efektivní	Těžko zajistitelná těsnost nádrží s vodíkem - atomy vodíku jsou velice malé
	Snížení napětí při vyšších odběrech proudu

Tabulka 6: pozitiva a negativa PEMFC pro použití v UA

4.1.2.1.4 Ultrakondenzátory

Kondenzátor je elektrická součástka určená ke skladování elektrické energie mezi párem velice blízko položených a mezi sebou izolovaných vodičů. Když je na kondenzátor aplikováno napětí, tak na

vodičích vzroste elektrostatický náboj stejné velikosti a opačné polarity. Jsou používány v elektrických obvodech jako zásobárny energie a mohou sloužit jako elektronické filtry. Kondenzátory mají velice malý vnitřní odpor (oproti akumulátorům), to snižuje limit elektrostatické energie, kterou mohou akumulovat a vydat oproti akumulátorům, které se při větších proudových zatížení velice zahřívají. Dokáží se tedy nabít a vybít v několika sekundách. Ve stejnosměrných obvodech slouží jako přechodné „buffery“ (v tomto případě vyrovnávací zásobárny energie) a ve střídavých obvodech slouží k úpravě signálu.

Ultrakondenzátor je moderní specifický druh s velkou energetickou hustotou v porovnání s klasickými kondenzátory. Ultrakondenzátory nemohou být použity v opačné polaritě, než jsou určeny (nemohou tedy být použity se střídavým proudem). Jejich využití je výhodné zejména v elektrických nebo hybridních automobilech, kde slouží jako vyrovnávací zásobárny elektrické energie. Využijí se například při rychlé akceleraci nebo při rekuperačním brždění.

Výhody a nevýhody ultrakondenzátorů pro použití v UA shrnuji v následující tabulce 7:

Ultrakondenzátory v UA	
Pozitiva	**Negativa**
Obrovská životnost (mnoho cyklů)	Drahé
Malý vnitřní odpor - mohou dodávat obrovské proudy a vybít se za několik sekund, - mohou přijímat obrovské proudy a nabít se za několik sekund	Riziko extrémně silného zkratu při nesprávné manipulaci
Jednoduché nabíjení - žádné ukončení nabíjení není potřeba, vezmou si jen to co potřebují	Rychlé samovybíjení
Bezpečné a s velkým teplotním pracovním rozsahem	Komplexní vnitřní stavba
Tiché	Lineárně klesající napětí při vybíjení - nutnost použití měniče napětí
Lehké	Nízké napětí článku (okolo 2,5 V) [41] - nutnost sériového zapojení pro většinu aplikací, a tedy nutnost použití balancerů podobným jaké využívají LiPo akumulátory
Bez pohyblivých součástí	Nízká energetická hustota (v porovnání s akumulátory)
Rychlá odezva	

Tabulka 7: pozitiva a negativa ultrakondenzátorů pro použití v UA

Z výše vypsaného můžeme odvodit vhodné využití ultrakondenzátorů v aplikaci pro UA. Jako samostatný zdroj elektrické energie mají malou energetickou hustotu a příliš rychlé samovybíjení. Ale

v kombinaci s akumulátory nebo palivovými články mohou být velice užitečné. Okamžitá dodávka velkých proudů může být vhodná v kombinaci s baterií s velkou kapacitou ale malým parametrem C. V kombinaci s PEMFC jde o vhodný stabilizující prvek, který umožní okamžité dodávky vysokých proudů. Tím zvýší využitelnost PEMFC nejen pro lety s nutností velké vytrvalosti, ale i pro ty co vyžadují okamžitou energii a rychlé změny režimů letu nebo agresivní vzlet.

4.1.2.1.5 Jaderné

Pohon UA pomocí jaderných reaktorů je v dnešní době pro civilní potřeby nemyslitelné. Vojenská aplikace je však reálná. V současnosti existují dva druhy použitelných jaderných reaktorů. Štěpný jaderný reaktor využívá řízené uvolnění jaderné energie štěpením těžkých jader, která je následně zužitkována k ohřevu média (například vody) a poté výrobě elektrické energie v turbíně. Ten je ale pro použití v UA příliš velký a složitý. Radioizotopový termoelektrický generátor (RTG) pak využívá přirozeného rozpadu těžkých prvků. RTG je dlouhodobý a spolehlivý zdroj stejnosměrného elektrického proudu pomocí termočlánků. [42] Teplé konce jsou přitisknuty k topným elementům RTG a studené k vnějšímu obalu a vytváří tak elektrický proud. RTG by mohl nahradit akumulátory a fotovoltaické systémy u rozměrově podobných UA. RTG se v současnosti používají například v kosmických sondách (ať už těch co letí vesmírem nebo těch co zkoumají planety z povrchu – například Curiosity na Marsu), kde je fotovoltaická technologie nedostačující.

Tato technologie přináší velká rizika spojená s havárií nebo poškozením UA a následným spadem radioaktivního materiálu do prostředí.

4.1.3 Hybridní

Hybridní pohonné systémy jsou složené z více typů pohonů. V zásadě se tím však myslí nějaký druh pístového motoru, který vyrábí elektrickou energii a pohání tak elektromotor. Kombinace zdrojů elektrické energie pro elektromotory uváděných v kapitole 4.1.2.1 však do hybridních pohonů nepočítám, protože jejich kombinace jsou průběžně uváděny. Existuje několik druhů těchto pohonů. Spalovací motor může například běžet stále a napájet elektromotor nebo může také startovat jen když je potřeba dobít akumulátor elektromotoru.

Kontinuálně běžící spalovací motor je vhodný pro napájení multirotorových prostředků, které ze zjevných důvodů nemohou mít spalovací motor pro každý rotor. Razantně se tak zvýší jejich vytrvalost. Je potom ovšem třeba počítat s veškerými negativy pístových spalovacích motorů. Zejména spaliny a hluk motoru mohou omezit způsoby využití.

Spalovací motor startující podle potřeby pro dobití akumulátoru je vhodný pro jakýkoliv druh UA. Jeho hlavní výhodou je omezení negativ spalovacích motorů. Když například potřebujeme tichý chod UA, vypneme motor a UA čerpá energii z nabitých akumulátorů. [43] Negativem je ovšem přidaná

komplexnost startovacího systému a naproti UA s čistě pístovým pohonem zde ještě musíme počítat s nemalou hmotností akumulátorů.

4.2 Reaktivní pohony

Reaktivní pohony vyvozují tah tím, že vylučují reakční hmotu v souladu s Newtonovým třetím pohybovým zákonem akce a reakce. Zákon akce a reakce říká: „Proti každé akci vždy působí stejná reakce“. V případě pohonů je akce síla, kterou vypustily trysky spálením paliva (tedy zrychlený vzduch nebo hořící palivo). Reakce je potom síla působící zpětně na motor a přes něj na celou konstrukci hnaného stroje. Můžeme je rozdělit na motory využívající kyslík v atmosféře, které se všeobecně nazývají proudové motory, a na raketové motory, které využívají vlastního okysličovadla k hoření.

4.2.1 Proudové

Proudové motory využívající kyslík v atmosféře vždy investují část získané energie ke stlačení vzduchu a tím zvyšují svou účinnost. Dále je rozdělujeme podle způsobu stlačování vzduchu na:

- Turbínové
    - Jednoproudové
    - Dvouproudové neboli turbodmychadlové
    - Turbovrtulové a turbohřídelové (více v kapitole 4.1.1.3)
- Náporové a scramjety
- Pulzační

Turbínové motory využívají sérii nejprve nízkotlakých a poté vysokotlakých kompresorů (axiálních nebo radiálního, u některých typů motorů se nerozlišuje nízko a vysokotlaký kompresor), které stlačují vzduch vstupující do motoru. Před vstupem do spalovací komory je vzduch zpomalen v difuzoru, kde se také dále zvýší jeho statický tlak. Ve spalovací komoře je do vzduchu rozprášeno palivo z destilátů ropy (kerosin) a zapáleno. V tomto okamžiku je uvolněno teplo za dramatického nárůstu tlaku. Konstrukce motoru umožní tomuto horkému a natlakovanému vzduchu opustit spalovací komoru přes vysokotlakou a poté nízkotlakou turbínu, které pohání kompresory. Vzduch se stále velkou teplotou a hlavně tlakem opustí motor tryskou a vytvoří tak tah. Celý tento proces probíhá naprosto kontinuálně, což zvyšuje jeho efektivitu. Jednoproudové motory jsou účinné pro nadzvukové aplikace. Pro ty podzvukové se více hodí dvouproudový motor [44].

U dvouproudového motoru turbíny pohání ještě dmychadlo, které je umístěno před prvním stupněm kompresoru. Dmychadlo urychluje velké množství vzduchu. Část tohoto vzduchu obtéká jádro motoru s kompresory, spalovací komorou a turbínami a přímo vytváří tah. Poměr tohoto vzduchu vůči vzduchu protékajícím jádrem motoru se nazývá obtokový poměr. Velká část energie vytvořené spalováním paliva je určena k pohonu dmychadla, které také vytváří většinu tahu. Tyto motory jsou účinné

v podzvukových rychlostech, zejména kvůli svému většímu rozměru a principu práce dmychadla. V současnosti to je nejpoužívanější typ pohonu dopravních letadel právě kvůli svému výkonu a účinnosti.

Turbínové motory jsou komplexní a spolehlivé stroje, ale všeobecně lze říci, že jsou velké a s poměrně velkým minimálním výkonem. Nicméně vývoj mikroturbínových motorů v poslední době předvedl motory, které jsou svými vlastnostmi vhodné pro použití i v UA.

Výhody a nevýhody turbínových motorů pro použití v UA shrnuji v následující tabulce 8:

Turbínové motory v UA	
Pozitiva	**Negativa**
Velmi vysoký potenciální tah	Drahé
Vysoká hustota výkonu	Velice komplexní
Proudové reaktivní motory nejsou omezeny zvukovou bariérou jako konce listů vrtulí vrtulových pohonů	Hlučné
Účinné ve velkých výškách a rychlostech (i v nadzvukových pro jednoproudové)	Jet wash - výstup horkých plynů z trysky motoru je velice nebezpečný
Necitlivé na kvalitu paliva	Mnoho součástek
	Velice rychle rotující součásti - při poškození může vést ke kompletnímu zničení, - vyvážení listů kompresorů a turbín je zásadní
	Vysoké vnitřní teploty - zvýšené riziko požáru
	Nižší tepelná účinnost než pístové motory
	Vyšší minimální tah - nemusí být vhodné pro menší typy UA

Tabulka 8: pozitiva a negativa turbínových motorů pro použití v UA

Turbínové motory jsou tedy nejvhodnější pro větší UA. Jednoproudové pro typy, kde počítáme s nadzvukovou rychlostí (většinou tedy vojenské) a ty, u kterých chceme extrémní manévrovatelnost a výkon. Dvouproudové jsou potom vhodné pro ekonomický let ve velké výšce (okolo 10 km). Turbovrtulové stroje jsou potom omezeny v dostupu a rychlosti vrtulí. Spotřeba paliva turbínových a reakčních motorů celkově je vyšší než u pístových motorů, ale naproti nim mohou poskytnout vyšší tah, a tedy vyšší užitečný náklad. Jsou tedy jasnou volbou pro větší UA určené pro velké rychlosti a výšky letu.

Stojí za to zmínit jaderné turbínové motory. Nebyly nikdy použity v praxi, ale jediný způsob jejich využití, který dává smysl je právě pro UA. Jako všeobecný tepelný zdroj (GPHS) se může využít jádro RTG. Tento zdroj tepla může sloužit k vytvoření jaderného turbínového motoru. Nebude už tedy přímo vyrábět elektrickou energii, ale využije se bezprostředně k pohonu UA. Místo spalování chemického tekutého paliva se využije teplo GPHS, který bude v určitém modulu na místě spalovací komory. S teplotou dosahující 2500°K může ohřívat proud vzduchu, pohánět turbínu a vytvářet tah [42]. Tento systém má velký energetický potenciál. Žádný jiný zdroj, který umí lidstvo využívat, nemá tak vysokou energetickou hustotu. UA poháněný tímto systémem by mohl létat nepřetržitě řadu let. Problém nastává s případnými opravami jakýchkoliv součástí UA nebo motoru. Jaderná reakce GPHS se těžko zastavuje a při takto vysokých teplotách jsou opravárenské práce nebezpečné. Počítat se musí i s případným únikem radiace, pokud by se poškodilo pouzdro GPHS. Tento systém by byl příliš drahý, riskantní negativa převažují nad pozitivy i pro vojenské využití.

Náporové motory a scramjety jsou v principu podobné turbínovým, ale liší se způsobem, jakým stlačují vzduch. Tyto motory se spoléhají na tvar vstupního ústrojí nebo na difuzor, tedy na plně pasivní prvky. Nepoužívají žádné pohybující se prvky a jsou jednoduché. Z principu jejich práce tedy nemohou vyvozovat tah za nulové dopředné rychlosti. Smysluplný tah vyvodí až od přibližně 0,5M. Náporové motory operují nejefektivněji za nadzvukových rychlostí. Stlačený vzduch se zpomalí na podzvukovou rychlost, za které je také zapálen s rozprášeným palivem. Ve scramjetech je vzduch stále nadzvukový, a to jim umožňuje operovat efektivně za extrémně vysokých hypersonických rychlostí. Tyto pohony mají potenciál ve vojenství (hypersonické zbraně a průzkumné UA) a kosmonautice.

Pulzační motory jsou potom ty, ve kterých spalování probíhá v pulzech. Mohou být vyrobeny s velice málo nebo dokonce žádnými pohybujícími se součástmi. Vyvozují tah už při nulové rychlosti. Jsou velice lehké a jednoduché, ale mají malý kompresní poměr, a tedy malý specifický impuls. Je určen pro podzvukové rychlosti. Ventily vlivem tlakového pulzu při zážehu paliva uzavřou vstup a vytvoří tak uzavřenou spalovací komoru s výstupní tryskou. Po zážehovém pulsu následuje podtlaková vlna, otevření ventilů a další nasátí vzduchu, rozprášení paliva do vzduchu a zapálení směsi. Pulzační motor může být s ventily anebo bez nich (využívá geometrii). Moderní typy těchto motorů mohou být účinnější než malé jednoproudové motory, které by mohly nahradit (ve vojenských cvičných cílech a modelech). V ČR však Doplněk X zakazuje použití pulzačního motoru k pohonu bezpilotního letadla.

4.2.2 Raketové

Raketové pohony jsou specifické tím, že nevyužívají okysličovadlo, které se nachází v atmosféře (kyslík), ale nesou si ho s sebou. Tato vlastnost jim umožňuje operovat i mimo atmosféru. Dělí se na dvě základní skupiny, a to na motory s tuhým palivem a na ty s kapalným.

Motory s tuhým palivem nemohou měnit tah a ani zastavit reakci. Jsou však velice jednoduché. Je tvořen pouze spalovací komorou a hnací tryskou. Téměř celá spalovací komora je naplněna tuhou směsí paliva a okysličovadla v určitém vzoru. Vzor určuje rychlost spalování, a tedy i čas hoření a vyvozovaný tah. Díky těmto vlastnostem se využívají ve vojenství pro různé typy střel, jako pomocné raketové motory letounů (například pro rychlejší vzlet nebo kratší přistání) nebo jako nosné rakety a mohou být také využity pro vzlet UA. Například modely kluzáků je mohou využít k rychlému startu (ale ne k letu samotnému, který je za pomoci raket zakázán doplňkem X).

Motory s kapalným palivem jsou výkonnější, účinnější a o mnoho komplexnější než motory na tuhé palivo. Jsou obvykle napájeny ze dvou nádrží. V jedné je palivo (kapalný vodík, kerosin, hydrazin nebo jiné) a v druhé okysličovadlo (kapalný kyslík, oxid dusičitý nebo jiné). Nádrže bývají přetlakovány. Palivo a okysličovadlo musí být do spalovací komory dopraveny pod tlakem větším, než je v komoře. K tomu se používá buď tlak inertního plynu nebo výkonných čerpadel. Palivo a okysličovadlo je v trysce rozprášena a zapálena. Tryska a spalovací komora musejí být kvůli vysokým teplotám spalování dobře chlazeny. Existuje několik způsobů chlazení. Regenerativní chlazení využívá proudění chladícího média (samotné palivo) skrz kanálky ve stěně. Další používaný způsob je ablativní chlazení, kdy postupně odtává vrstva materiálu (stejný princip je použit u návratových modulů). Tah motorů řídíme přívodem paliva a okysličovadla a můžeme je zastavit a znovu nastartovat. Tyto motory jsou využívány pro velké rakety. Nejsou vhodné pro vojenské bojové rakety, kvůli dlouhému času přípravy před startem motoru.

Výhody a nevýhody raketových motorů pro použití v UA shrnuji v následující tabulce 9:

Raketové motory v UA	
Pozitiva	**Negativa**
Velmi vysoká hustota výkonu	Neúčinné při malých rychlostech letu - účinnost stoupá až k teoretickým 100 % při rychlosti letu rovnající se rychlosti výstupu spalin
Velmi vysoký potenciální tah	Velmi vysoká spotřeba paliva a okysličovadla - malá vytrvalost
Vyzkoušené principy - u motorů na tuhá paliva i jednoduché	U motorů na kapalná paliva velká komplexnost
Samostatné - možnost použití v oblastech s nízkých obsahem kyslíku v atmosféře nebo ve vesmíru	Riziko exploze - nádrže motorů s tekutým palivem pod vysokým tlakem - vysoké teploty a tlaky při spalování
Účinné při velmi vysokých rychlostech	Některá paliva jsou zároveň velice toxická
	Velká hlučnost a silné vibrace

Tabulka 9: pozitiva a negativa raketových motorů pro použití v UA

Pro UA menších a středních velikostí se hodí pouze a jen motory na tuhá paliva, a to jako pomocné startovací motory.

5 Energetická hustota pohonů

Energetická hustota udává množství energie uložené v daném systému na jednotku objemu (J/m^3) nebo hmotnosti (J/kg). Správná definice je pouze pro vztah na objem, ale toto názvosloví se používá i pro hmotnost, jako nadřazené pojmenování. Množství energie na jednotku hmotnosti se potom správně nazývá specifická energie.

V následující tabulce 10 uvedu přibližné hodnoty energetické hustoty a specifické energie pro zdroje energie jednotlivých pohonů:

Pohon	Zdroj energie	Energetická hustota [MJ/m^3]	Specifická energie [MJ/kg]
Pístový zážehový a rotační	benzín	34 613	46.5
Pístový vznětový	motorová nafta	38 243	45.8
Pístový žhavící	methanol	17 000	21
Reaktivní proudový, pulzační, náporový a turbovrtulový nebo turbohřídelový	kerosin JET A-1	36 656	46.4
Reaktivní jaderný/ elektromotor jaderný (RTG)	plutonium-238	42 523 800 000	2 200 000
Raketový (na tuhá paliva při použití směsi APCP)	hliník	83 700	31
Elektromotor PEMFC	vodík	12 790	142.2
Elektromotor	Li-Po akumulátor	1 440 - 2 628	0.54 - 0.936
Elektromotor	NiMH akumulátor	720	0.216 - 0.432
Elektromotor	Pb akumulátor	100 - 900	0.04 - 0.140
Elektromotor	Ultrakondenzátor	50 - 60	0.01 - 0.036

Tabulka 10: energetické hustoty a specifické energie zdrojů energie pohonů UA (HHV) [35, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52]

V tabulce 10 můžeme pozorovat výrazné rozdíly v hodnotách energetické hustoty a specifické energie jednotlivých zdrojů energie pohonů UA. Paliva pro zážehové a vznětové pístové motory se vyznačují velice podobnými hodnotami. Benzín však vykazuje vyšší specifickou energii a motorová nafta naopak

vyšší energetickou hustotu. Rozhodnutí mezi těmito dvěma systémy tedy nebude záležet na energetickém obsahu paliv, ale na dalších parametrech pohonného systému. Methanol pro žhavící pístové motory potom obsahuje méně než polovinu energie výše zmiňovaných paliv navíc okolo 20% v samotné spalované směsi tvoří olej a další 3-15% nitromethan (který se přidává kvůli správnému spalování). JET A-1 se svým obsahem energie blíží motorové naftě a benzínu. Vodík jako zdroj energie elektromotoru s použitím PEMFC značně vybočuje v energetické hustotě zdroje energie od těch, které využívají akumulátory. U něj však musíme počítat s další hmotností a objemem samotného výměníku a nádrže (především ta je značná). Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, Li-Po akumulátory mají výrazně větší energetickou hustotu i specifickou energii oproti ostatním typům. Zvláště pak Pb akumulátory jsou naprosto nevhodné pro použití v UA a při porovnání s NiMH nebo Li-Po pro ně neexistuje opodstatnění jiné kromě ceny. Ultrakondenzátory jako poměrně nový způsob uchovávání energie pro účely pohonu nemá dobré energetické parametry. Jak je řečeno v předchozí kapitole, jejich předností je především schopnost dodávat vysoké proudy a dobře se tedy hodí do kombinovaných systémů. Raketový motor na tuhá paliva využívající směs APCP, kde je hlavní zdroj energie hliník, má značně vyšší energetickou hustotu (více než dvounásobně vyšší oproti naftě) než specifickou energii (ta je dokonce téměř 1.5krát nižší než nafta). Hliník však tvoří pouze 16% směsi, téměř 70% potom připadá na okysličovadlo [50]. Plutonium-238 je potom v energetických hodnotách naprosto nadřazené všem ostatním zdrojům.

Převod této energie na užitečnou práci není jednoduchý, jak je zmíněno v předchozí kapitole. Průměrná účinnost systému s pístovými motory se pohybuje od 15 do 32%. Turbínové motory jsou v malých velikostech méně účinné než pístové motory, ty ale s narůstající velikostí začínají být nepřiměřeně těžké a pro použití ve větších letounech a tedy i velkých UA (kde jedině mají smysl) se více hodí právě turbínové motory. Účinnost převodu energie vodíku na elektrickou energii PEMFC se udává na přibližně 53%. Převod energie z chemické podoby v Li-Po akumulátorech do elektrické energie je velice účinný. Udává se mezí 90 až 95% Jediný negativní efekt na účinnost této transformace má tvorba tepla v akumulátoru způsobená vnitřním odporem. Ultrakondenzátory mají účinnost této transformace dokonce přes 98%. [55, 56, 57, 58, 59, 60, 61] Jak bylo popsáno v předchozích kapitolách, účinnost fotovoltaiky se pohybuje okolo 20% a samotné BLDC elektromotory vykazují účinnost okolo 90%. Z těchto hodnot vyplývá, že při výběru pohonu se musíme řídit všemi jejich parametry včetně účinnosti, a nezaměřovat se pouze na data z tabulky 10.

Na příkladu jaderných pohonných systémů je dobré zdůraznit důležitost hmotnosti celého systému. Energetické hodnoty vyhodnocené výše je třeba porovnat právě s hmotností jednotlivých provedení systémů a jejich možným výkonem.

5.1 Praktické měření Li-Po akumulátorů

Praktická měření byla uskutečněna na Li-Po akumulátorech. Byly upřednostněny zejména protože jsou v současnosti nejpoužívanějším zdrojem energie pro malé civilní bezpilotní prostředky. Li-Po akumulátory vynikají oproti jiným akumulátorům vyšší energetickou hustotou a specifickou energií (jak jsme se dozvěděli v předchozí kapitole), ale oproti například spalovacím motorům mají tyto hodnoty malé. Je proto důležité dozvědět se co nejvíce o limitech této technologie v praxi. Výsledky měření tedy mohou být užitečným nástrojem při práci s UA anebo s jakýmikoliv jinými stroji a nástroji, které Li-Po akumulátory napájí, kterých je nepřeberné množství.

Cílem měření je zodpovědět otázku, jaký má na vybíjecí charakteristiky Li-Po akumulátorů vliv okolní teplota. Další zájmový parametr bylo stáří a opotřebení baterie. Zajímal nás také vliv tlaku na tyto charakteristiky. Z vybíjecí charakteristiky bylo následně možné vyvodit pokles nebo nárůst energetické hustoty a specifické energie akumulátorů.

Zodpovězení těchto otázek může pomoci uživatelům při výběru správného zdroje energie nebo přímo správného druhu Li-Po akumulátoru. Pokud uživatel nemá na výběr a již vlastní Li-Po akumulátor, měli by mu tyto měření říci co od akumulátoru očekávat v jednotlivých prostředí.

Cíle měření tedy můžeme shrnout do následujících otázek:

- Jaký má teplota okolního prostředí vliv na vybíjecí charakteristiky a energetickou hustotu Li-Po akumulátorů?
- Má na tyto charakteristiky vliv stáří a opotřebení baterie?

5.1.1 Materiály a metody

Měření probíhalo ve spolupráci s laboratoří nedestruktivního zkoušení a diagnostiky materiálu (non destructive testing, NDT) a kalibrace letových zapisovačů Ústavu letecké dopravy fakulty dopravní Českého vysokého učení technického v Praze.

Pro měření byly použity akumulátory PECKA-POWER LiPo - 3S 2200 mAh 11,1 V 3S1P 35 C. Tedy akumulátory mající 3 články zapojené v sérii s nominálním napětím 11,1 V a udávanou kapacitou 2200 mAh a tedy 24,42 Wh.

$$\mathrm{I\,[A]} = \mathrm{Cr} * \mathrm{C\,[Ah]} \tag{1}$$

kde I je proud v Ampérech, Cr je udávaná hodnota C akumulátoru a C je elektrický náboj akumulátoru v Ampérhodinách (neboli kapacita akumulátoru). Výrobce na baterii uvádí maximální trvalý vybíjecí proud 35 C a maximální špičkový proud 50 C, což odpovídá proudu 77 A, respektive 110 A pro špičkovou zátěž podle vztahu (1). Je tedy vhodný pro většinu UA využívaných k rekreačním případně

komerčním účelům. Maximální proud pro nabíjení je uveden jako 1 C, tedy jako 2,2 A. Rozměry akumulátoru jsou 105 x 35 x 23 mm a hmotnost potom 190,6 g, včetně obalu a kabelů (jak silových, tak balančních). Takto udávaná hmotnost a rozměry nám ovšem komplikuje výpočet energetické hustoty a specifické energie, jejichž hodnoty jsou poté nižší.

$$\mathrm{E\,[J]} = 3600 * \mathrm{E\,[Wh]} \tag{2}$$

kde E je energie v Joulech a Watthodinách. Udávanou energii akumulátoru 24,42 Wh můžeme převést prostřednictvím vztahu (2) na 87 912 J. Ty potom upravíme na 0,087912 MJ. Pomocí této hodnoty a rozměrů s hmotností následně získáme specifickou energii akumulátoru 0,46124 MJ/kg a energetickou hustotu 1040,07 MJ/m^3. Tyto hodnoty jsou značně nižší, než udává tabulka 10. To může být způsobeno obalovým materiálem konkrétního výrobce a také již zmíněným započtením kabelů. Balanční kabely umožňují ochranu proti vybití na nižší než doporučené napětí a proti nabití na vyšší než doporučené napětí. To ovšem už záleží na nastavení nabíječky nebo spotřebiče. Balanční kabely k těmto přístrojům pouze dostanou informaci o stavu napětí jednotlivých článků. Výrobce nezná a neuvádí o jaký poddruh Li-Po akumulátoru se jedná.

Akumulátory byly použity dva. Jeden zcela nový a druhý několik let starý a opotřebený. Starý akumulátor již trpěl nafouknutím, které u Li-Po akumulátorů značí značnou degradaci. Tento stav opotřebení také prozrazuje, že s akumulátorem nebylo ideálně zacházeno (z hlediska nabíjení, vybíjení a skladování). Takto notně rozdílné akumulátory nám umožnily dobře porovnat sledované charakteristiky, které by byly pravděpodobně hůře znatelné u méně opotřebeného akumulátoru.

Pro nabíjení a vybíjení byla použita automatická nabíječka Robbe Power Peak I4 EQ-BID 8507. Nabíječka je mimo jiné schopna nabíjet 1-12 Li-Po článků proudem 0,1 - 10 A (maximálně 210 W) a vybíjet proudem 0,1 – 5 A (maximálně 50 W). Disponuje také možností připojení balancéru akumulátoru, zajistí tedy rovnoměrné nabití jednotlivých článků a při vybíjení má funkci přerušení vybíjení při nízkém napětí jakéhokoliv z článků. Nabíjení Li-Po článků funguje automaticky na principu konstantní proud – konstantní napětí (CC-CV metoda). Při použití této metody se baterie nejprve nabíjí konstantním maximálně možným proudem (CC), který je nastavitelný (určíme podle parametru C akumulátoru), a za současně zvyšujícím se napětím. Jakmile napětí dosáhne maximálního napětí baterie, které je přednastaveno pro Li-Po akumulátory na 4,2 V/článek a je to i všeobecně uznávané napětí jako maximální možné, přepne se nabíjení do režimu konstantního napětí (CV). V tomto režimu nabíječka nabíjí tímto maximálním napětím a postupně se snižujícím proudem. Jakmile jakýkoliv článek dosáhne 4,2 V nabíječka tento článek pomocí balančních kabelů vybije o několik setin V a poté opět pokračuje v nabíjení celé baterie. Tento proces může trvat velice dlouho (během balancování je použit maximální proud 300 mA), a to zvlášť u starších a opotřebených akumulátorů, které mají znační rozdíl v napětí článků. Jakmile je napětí článků v mezích, nabíjení se ukončí. Nabíječka má také funkci cyklu, kdy můžeme nastavit opakované nabíjení a vybíjení s určenou časovou prodlevou. Propojení nabíječky

a akumulátoru bylo zajištěno kabely s příslušnými konektory o dostatečné délce, aby bylo možné bezpečné umístění nabíječky. Funkce měření teploty pomocí externího senzoru připojeného do nabíječky nebyla využita z důvodu malého rozsahu teplot, které dokáže snímat.

Nabíječka také má port USB mini. Pomocí tohoto portu byla nabíječka propojena s osobním počítačem s operačním systémem Microsoft Windows. Nainstalovaný software Logview umožnil sledování aktuálních parametrů baterie jako je: napětí jednotlivých článků, celkové napětí, nabíjecí nebo vybíjecí proud, přenesenou energii a čas. Tyto hodnoty umí Logview exportovat do formátu .csv. Data poté byla zpracována v programu Microsoft Excel.

Nabíječka vyžadovala vstupní napětí 11 až 15 V DC. Pro účel přivedení stabilního napětí byl použit spínaný stabilizovaný zdroj Power X-40 dodávající 13,8 V a maximálně 40 A (cca 550 W).

Dále byla využita barokomora laboratoře nedestruktivního zkoušení a diagnostiky materiálu a kalibrace letových zapisovačů. Vzhledem k malé velikosti barokomory a nemožnosti vést do a z ní kabely, musely pokusy v ní probíhat jiným způsobem. Pro vybíjení uvnitř barokomory byla použita žárovka o výkonu 50 W připojená pomocí dostatečně dlouhých kabelů k akumulátoru. Akumulátor byl nabit a poté propojen s žárovkou, celá aparatura byla rychle vložena do barokomory a z té okamžitě odsáván vzduch až na hodnotu 300 hPa, tedy na ekvivalent přibližně 9160 m nad mořem. Čas od začátku odběru energie žárovkou, vložení do barokomory a poté zvlášť čas před odčerpáním vzduchu byl změřen. Jakmile začala žárovka zářit s nižším jasem, byla komora natlakována. Poté se akumulátor připojil k nabíječce a odečetlo se celkové napětí i napětí jednotlivých článků (opět se měřil čas mimo nízký tlak. Tento proces se ukázal jako velice nepřesný. Žárovka v barokomoře zahřívala necirkulující vzduch a v komoře se tedy neúměrně zvedala teplota. Vlivem tohoto nárůstu teploty se začala tavit izolace kabelů a komora se zčásti naplnila kouřem. Kvůli všem zmíněným nepřesnostem se výsledky měření v barokomoře nedají považovat za spolehlivé.

Na počátku byla provedena série cyklů se starým i novým akumulátorem. Tato testovací měření sloužila k získání zkušeností a vyřešení případných nedostatků v procesu. U nového akumulátoru byl zjištěn jeden defektní článek s výrazně nižším napětím. Tento akumulátor byl po reklamaci nahrazen novým a zcela funkčním.

Při měření byly sledovány hlavně parametry celkového napětí, napětí článků a přenesené energie přepočtené na kapacitu udávanou v mAh. Akumulátory byly před každým pokusem již několik hodin ponechány v klidu, pokojové teplotě a nabity. První krok při měření bylo zajištění úplného nabití akumulátoru (4,2 V/článek) zapojením do nabíječky a zapnutím nabíjecího procesu. Jakmile byl proces nabíjení ukončen, akumulátor byl ponechán 10 minut v klidu. Důvodem je vnitřní teplota akumulátoru, která se během nabíjení může zvýšit. Tento čas byl zvolen z toho důvodu, že během posledního úseku nabíjení už teplota v akumulátoru v podstatě nestoupá, vzhledem k malým nabíjecím proudům (nabíječka už jen balancuje články). Po uplynutí tohoto času byl v nabíječce spuštěn vybíjecí program,

který akumulátor vybíjel 48 – 50 W a maximálně 5 A. Tedy pouze s hodnotou C asi 2,27, která je bezpečně pod maximální hodnotou akumulátoru. Vybíjení bylo automaticky zastaveno, jakmile jakýkoliv článek baterie dosáhl 3 V. Po 5 minutách bylo zahájeno nabíjení do maximálního napětí článků 4,2 V. V programu Logview jsem data exportoval a uložil ve formátu .csv.

Měření probíhalo v následujících teplotách:

- 60°C
- 50°C
- Pokojová teplota (cca 22°C)
- 5°C
- -18°C

60°C a 50°C bylo dosaženo pomocí vodní lázně. Vzhledem k tomu, že voda by mohla způsobit zkrat a tedy zničení akumulátorů nebo újmu na zdraví, bylo potřeba tento postup pečlivě vyzkoušet před použitím samotných akumulátorů. Jako nádoba byl použit hrnec. Aby byla vytvořena dostatečná mezera mezi dnem hrnce tedy zdrojem tepla a akumulátorem, byl použit stojan na kterém mohl akumulátor stát v dostatečné vzdálenosti ode dna. K zajištění proti pohybu a uklouznutí baterie v lázni byly použity uzavřené plastové nádoby naplněné vodou, které zajistily pevnou polohu baterie. Experimentovalo se s různými obalovými materiály pro samotnou baterii. Plastové sáčky a pytle byly nepoužitelné. I přes několik vrstev postupně pronikala voda. Proto bylo nakonec přistoupeno k latexovému obalu vhodného tvaru, který naprosto bezproblémově udržel vlhkost mimo baterii, a navíc byl velice tenký a měl velikou tepelnou propustnost. Po uspokojivých zkouškách bylo přistoupeno k samotným měřením v těchto teplotách. Akumulátory byly v lázni ponechány 10 minut, než bylo započato vybíjení. Teploty byly udržovány pomocí plynového hořáku pod hrncem, jehož přípusť byla ručně kontrolována. Teplota pak byla odečítána z rtuťového teploměru s rozsahem až do 200°C a stupnicí po 1°C. Teplota se během všech pokusů držela ± 3°C od cílové.

Měření při pokojové teplotě probíhalo tak jak je popsáno v obecném popisu výše.

5°C bylo dosaženo pomocí kuchyňské lednice, která udržuje tuto teplotu. Akumulátor byl do lednice vložen na asi 2 hodiny. Poté byl akumulátor napojen na nabíječku, dveře lednice opět uzavřeny a byl spuštěn vybíjecí program. Dobré těsnění lednice zajistilo žádný nebo zanedbatelný vstup teplého vzduchu i přes přivřené kabely, který lednice neměla problém kompenzovat.

Stabilních -18°C bylo dosaženo vložením akumulátoru do kuchyňské mrazničky, která stabilně udržuje tuto teplotu. Vzhledem k fyzikálním vlastnostem Li-Po akumulátoru ho není možné nechat úplně zmrznout a očekávat jeho funkci. Chemická reakce uvnitř jednotlivých článků by se zastavila a akumulátor by tak prakticky ztratil veškerou kapacitu. V reálných podmínkách tedy samozřejmě není možné používat Li-Po akumulátory, jejichž vnitřní teplota je takto nízká. Musejí se před použitím zahřát.

U tohoto měření bylo cílem zjištění, jak na akumulátor bude působit určitá doba strávená v takto mrazivém prostředí. Simuluje to reálný příklad z používání baterií, které jsou běžně přenášeny v kapse, převáženy v autě nebo jsou umístěny v jiném prostředí, kde teploty nejsou takto nízké a až těsně před letem nebo jiným použitím baterie jsou vloženy do spotřebiče. Tyto pokusy měly ukázat, jak moc musí uživatel spěchat po vystavení akumulátoru těmto teplotám s jejich použitím. Předpokladem při pokusu bylo, že po počátku odebírání proudu z akumulátorů, začne vnitřní odpor zahřívat akumulátor a mrazivé teploty tedy již neohrozí funkci. Akumulátor byl tedy vložen do mrazáku spolu s kabely. Mrazák, opět jako lednice, těsnil velice dobře i přes kabely. Po uplynutí určeného času byl zapnut vybíjecí program na nabíječce.

Dále proběhly měření v pokojové teplotě po jednotlivých pokusech v teplotách jiných než pokojových. Důvodem byla zejména potřeba ověření, zda tyto extrémní teploty neměly vliv na další měření, a tedy na dlouhodobou kapacitu akumulátorů.

5.1.2 Výsledky

V této podkapitole uvedu výsledky měření. Většina výsledků bude v podobě grafů nebo tabulek. V následující kapitole potom budou výsledky diskutovány a vyváděny z nich závěry.

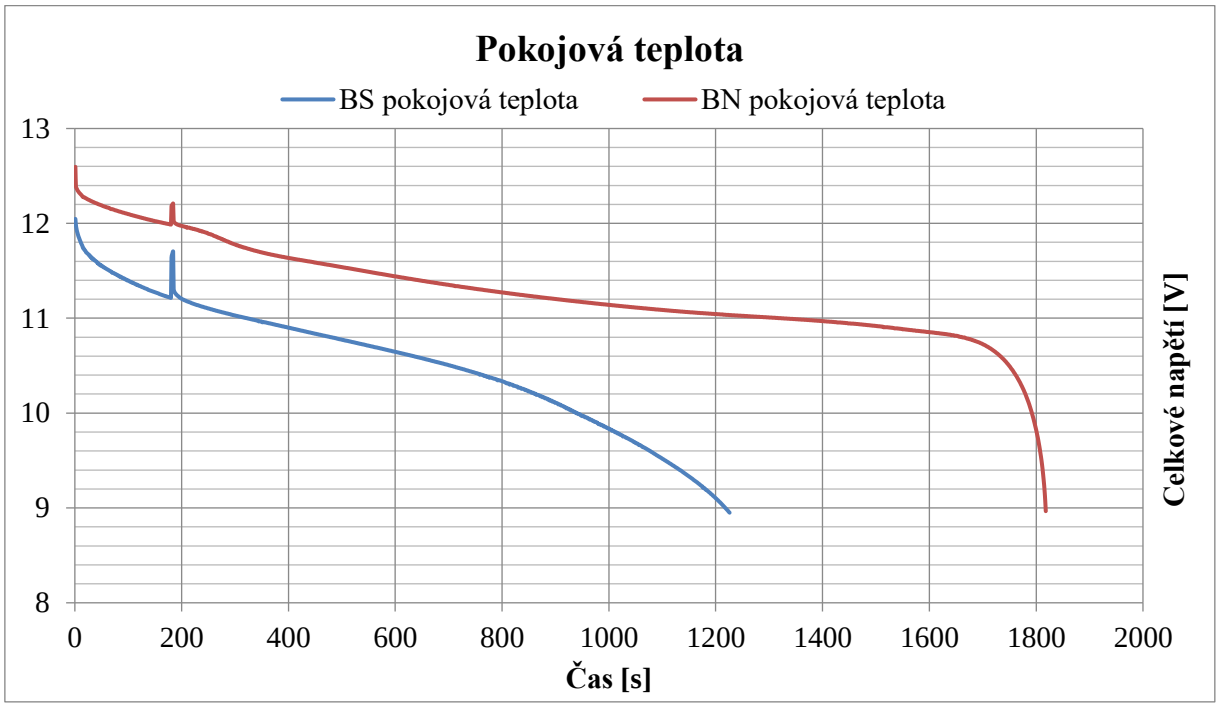
	kapacita [mAh]	
Měření	Stará baterie	Nová baterie
50°C	1516	2257
60°C	1530	2250
pokojová teplota podruhé	1479	2249
pokojová teplota po 50°C	1378	2245
pokojová teplota	1599	2236
pokojová teplota po 5°C	1556	2230
pokojová teplota po 60°C	1288	2230
pokojová teplota po -18°C na 25 minut	1291	2223
pokojová teplota po -18°C	1230	2223
pokojová teplota po -18°C na 20 minut	1368	2222
5°C	1465	2172
-18°C	963	2134
-18°C na 10 minut	1134	2126
-18°C na 25 minut	17	2111
-18°C na 25 minut podruhé	802	2106
-18°C na 20 minut	974	2103
-18°C podruhé	950	

-18°C na 30 minut	3	
pokojová teplota po -18°C na 10 minut	1420	
pokojová teplota po -18°C na 30 minut	1309	

Tabulka 11: kapacita akumulátorů při jednotlivých měřeních

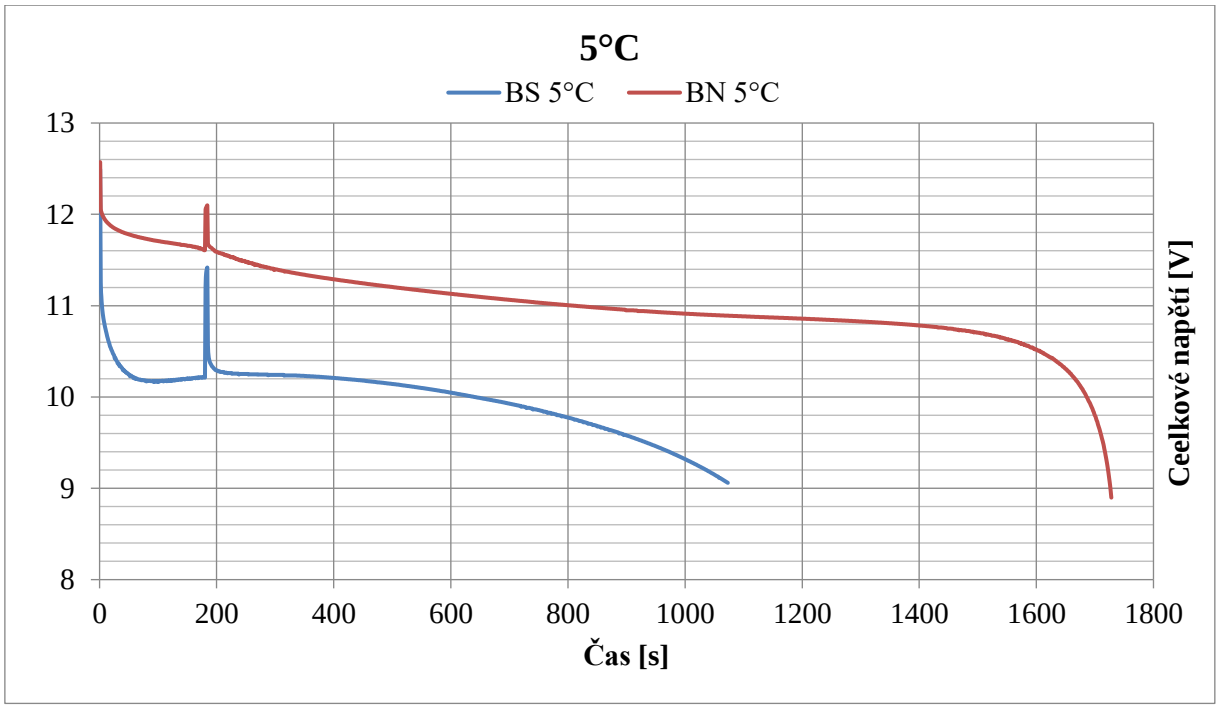
V tabulce 11 můžeme vidět souhrn kapacit staré a nové baterie při jednotlivých měřeních. Stará baterie absolvovala více měření, protože byla měřena první a některé výsledky bylo třeba ověřit druhým pokusem, aby existovala jistota správného provedení pokusu.

Postupný seznam podle pořadí měření s jednotlivými kapacitami je uveden v Příloze I. Najdeme tam také grafy pro zřetelnější zobrazení rozdílu.



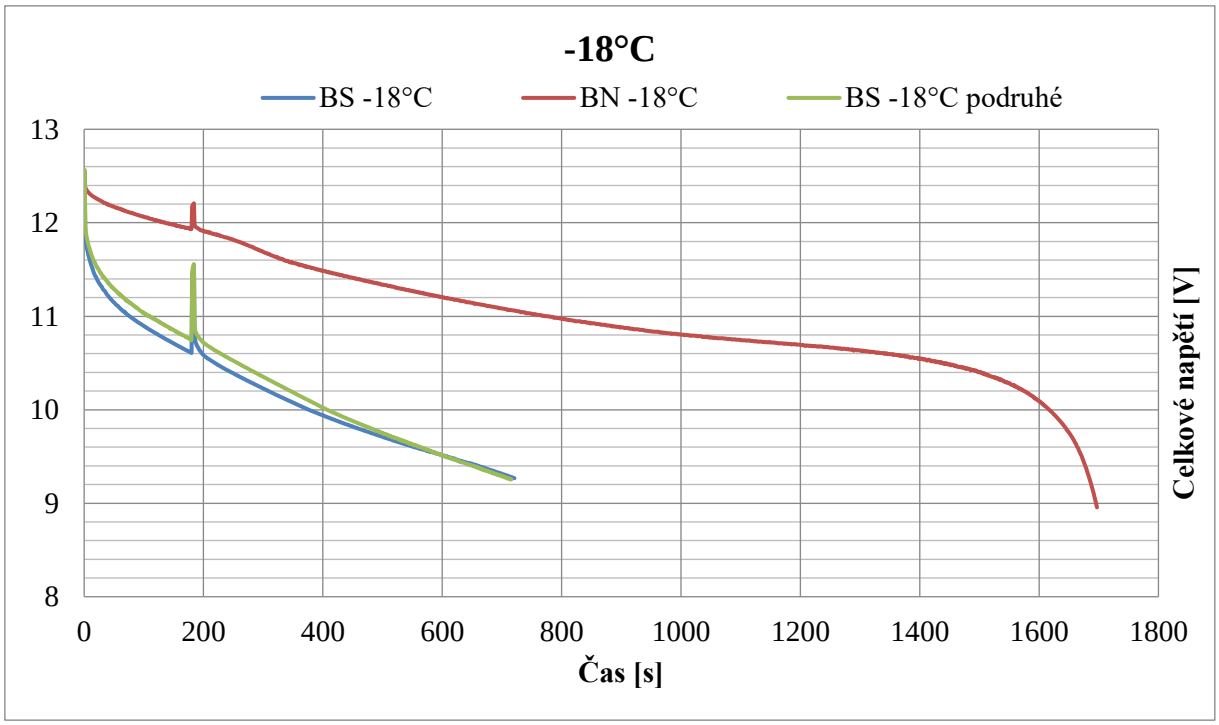
Graf 1: pokles napětí v čase při pokojové teplotě

V grafu 1 můžeme pozorovat celkové napětí akumulátoru ve voltech v závislosti na čase v sekundách při pokojové teplotě (22°C). Zkratka BS značí baterii starou a zkratka BN poté značí baterii novou. Tyto zkratky budou používány i ve všech následujících grafech. Mezi sekundou 180 až 200 můžeme vidět krátké skokové navýšení napětí. Toto navýšení se vyskytuje u všech pokusů. Je důsledkem vybíjecího procesu akumulátoru.



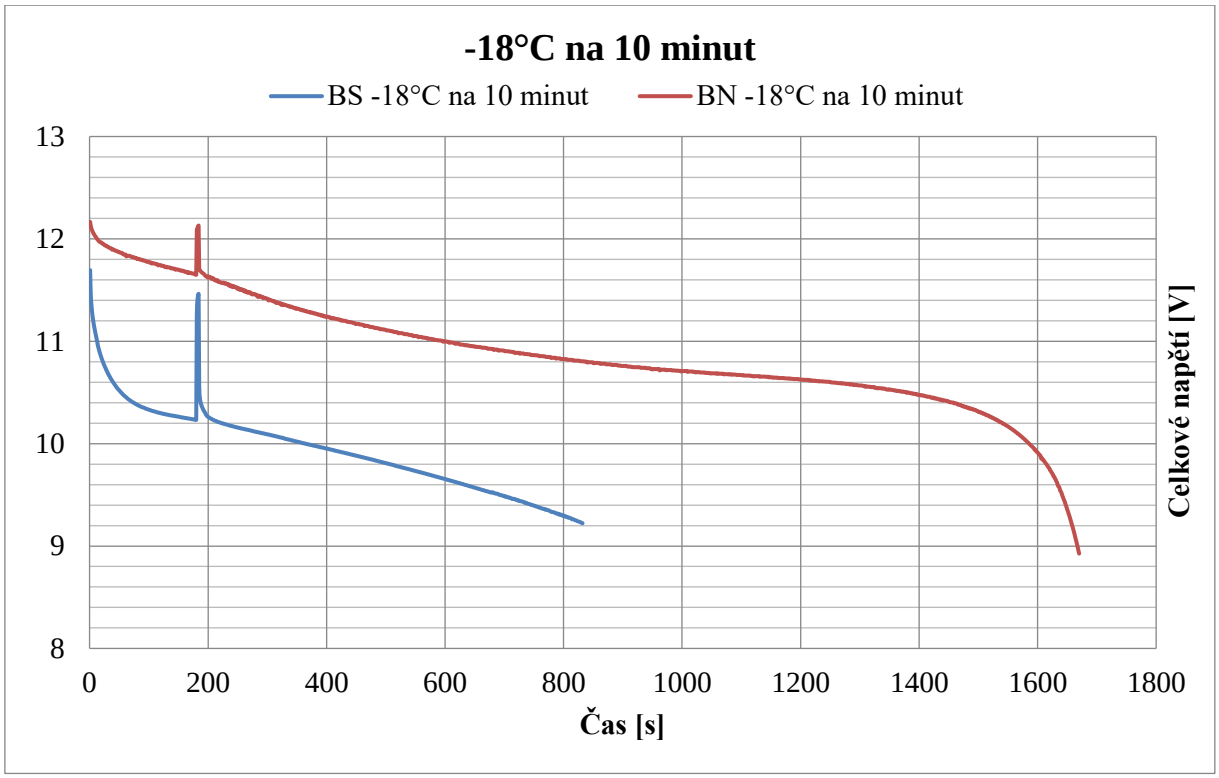
Graf 2: pokles napětí v čase při 5°C

Graf 2 znázorňuje pokles napětí v čase při stabilních 5°C.



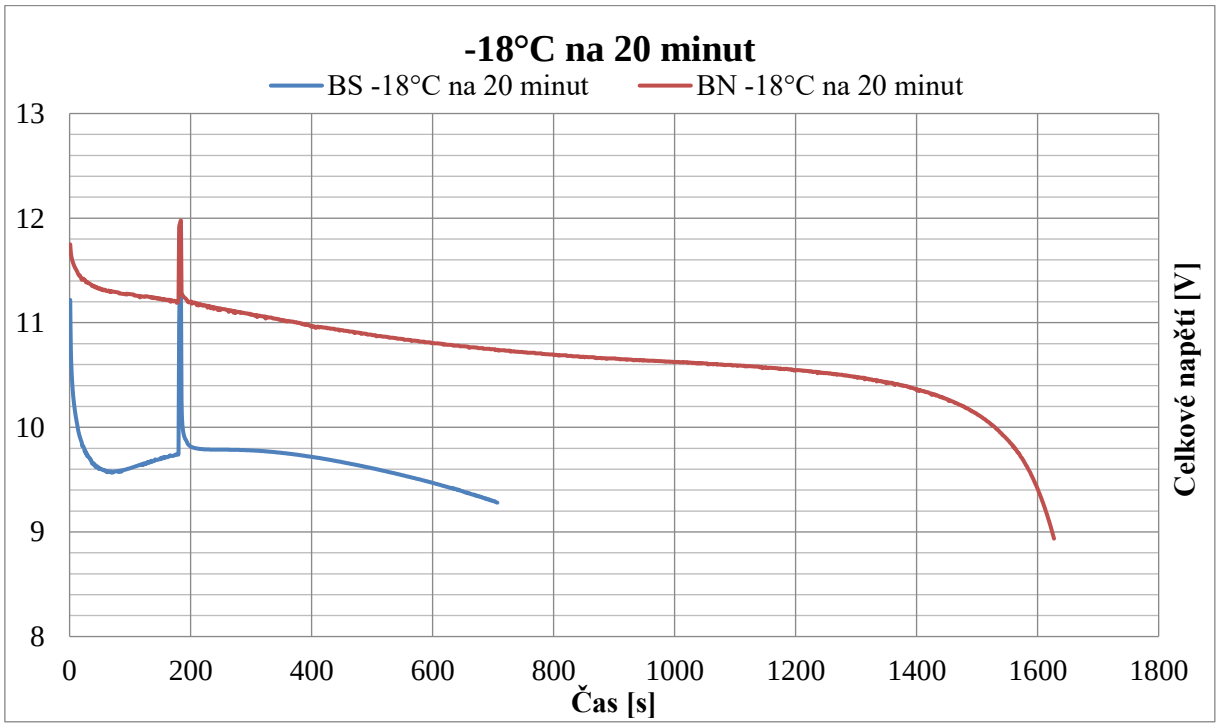
Graf 3: pokles napětí v čase při -18°C

V grafu 3 vidíme stejnou závislost při -18°C, kdy se k vybíjení přistoupilo ihned po vložení akumulátoru do tohoto prostředí.



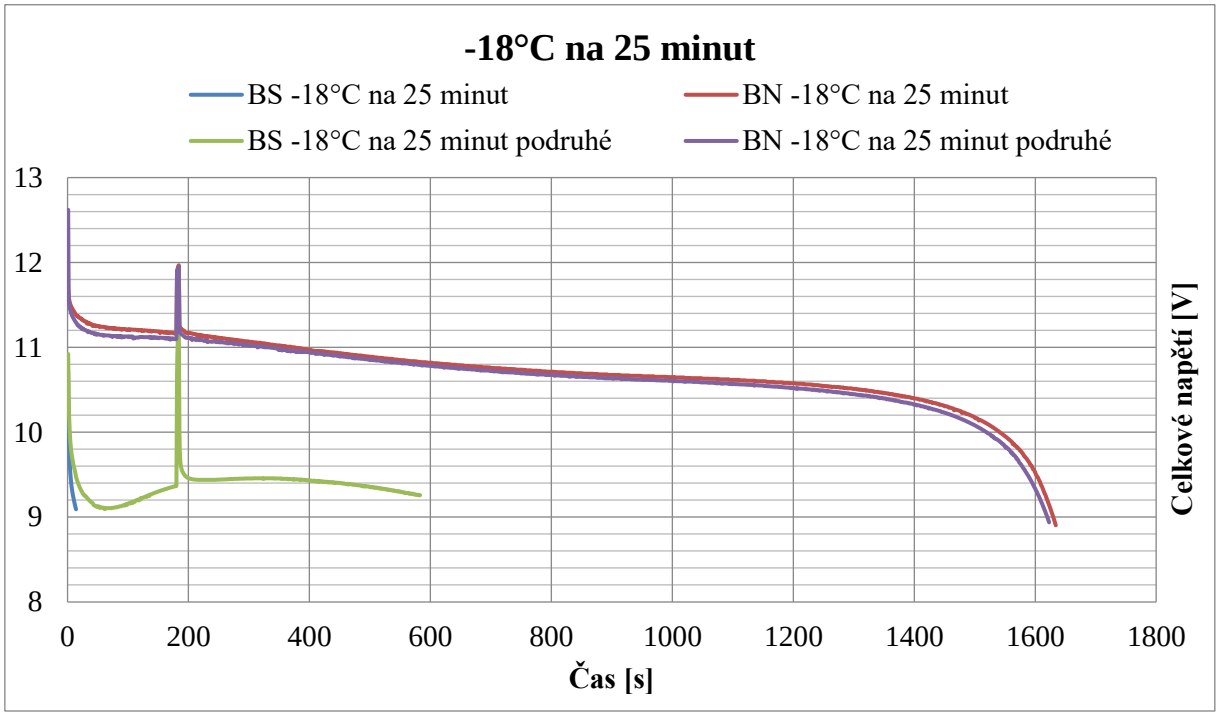
Graf 4: pokles napětí v čase při -18°C (vloženo 10 minut před vybíjením)

Pro měření znázorněném v grafu 4 byly akumulátory vloženy do -18°C a po 10 minutách v tomto prostředí byl započat vybíjecí cyklus (jak je popsáno v předchozí kapitole).



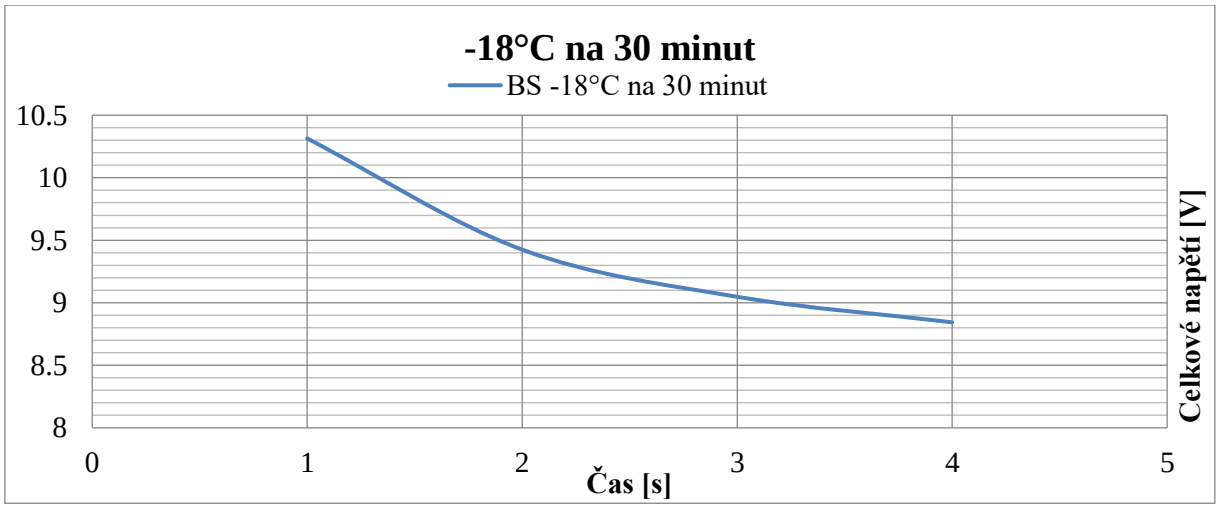
Graf 5: pokles napětí v čase při -18°C (vloženo 20 minut před vybíjením)

Graf 5 poté zobrazuje stejný druh pokusu, s tím rozdílem, že byly akumulátory vloženy na 20 minut před vybíjením.



Graf 6: pokles napětí v čase při -18°C (vloženo 25 minut před vybíjením)

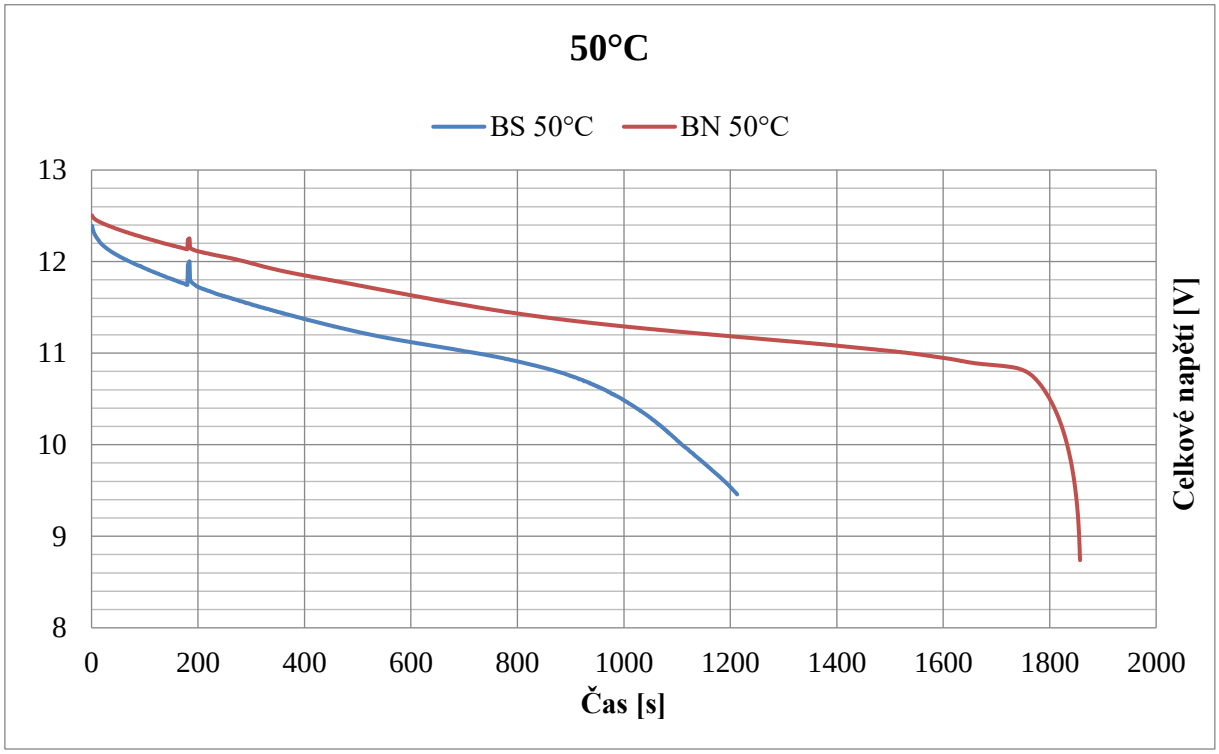
V grafu 6 můžeme vidět čtyři měření při teplotě -18°C s akumulátory vloženými do této teploty 25 minut před začátkem vybíjení. Byla provedena dvě měřené pro každý akumulátor.



Graf 7: pokles napětí v čase při -18°C (vloženo 30 minut před vybíjením)

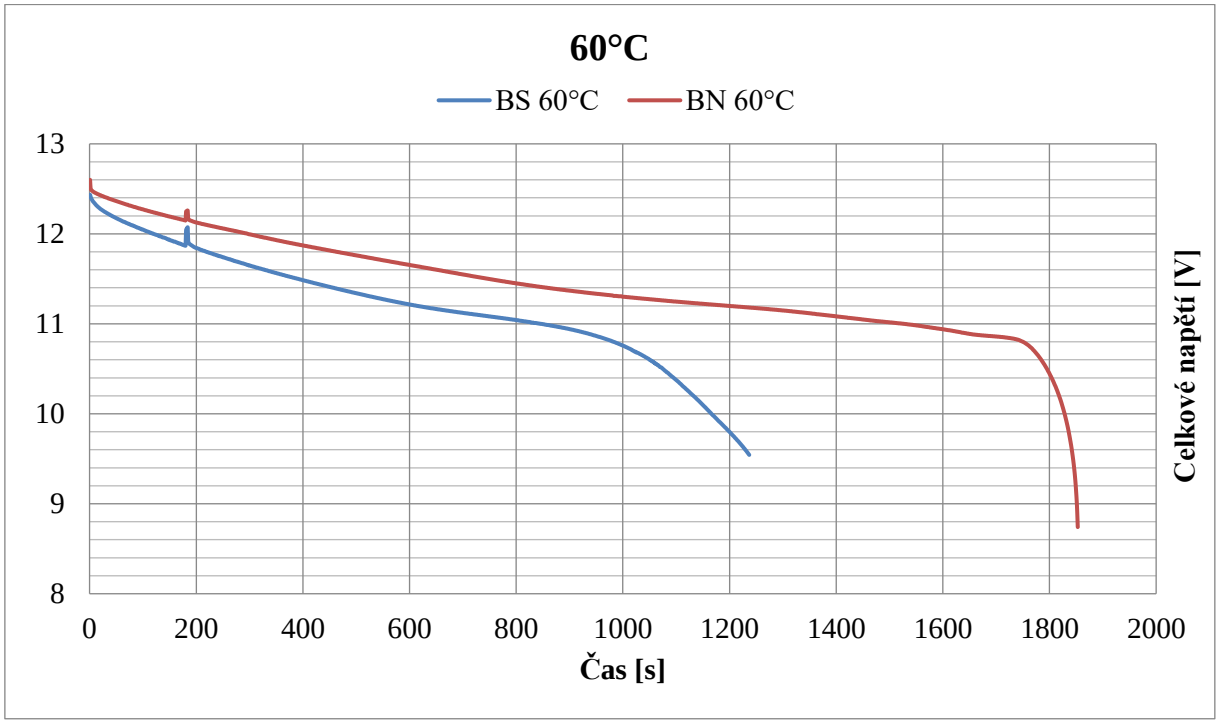
Graf 7 obsahuje pouze data měřená při vybíjeni starého akumulátoru vloženého do -18°C 30 minut před vybíjením. Při těchto opakovaných pokusech se starým akumulátorem bylo zjištěno, že akumulátoru

okamžitě klesne napětí pod zvolenou mez. Nový akumulátor tedy nebyl měřen. Hlavním důvodem je potřeba uchování jeho poměrně dobrého stavu pro další využití Ústavem.



Graf 8: pokles napětí v čase při 50°C

Na grafu 8 můžeme vidět pokles napětí při měření v 50°C jak je popsáno v předchozí kapitole.



Graf 9: pokles napětí v čase při 60°C

Graf 9 potom ukazuje pokles při 60°C.

Grafy měření při pokojové teplotě, které proběhly po měření v jednotlivých teplotách jsou uvedeny v Příloze II.

V Příloze III najdeme složené grafy z měření v pokojové teplotě, nízkých teplotách, vysokých teplotách a také graf porovnávající -18°C a 60°C. Tyto grafy slouží k názornějšímu zobrazení výsledků a jsou proto uvedeny v příloze.

5.1.3 Diskuze

V této podkapitole budou diskutovány výsledky uvedené v té předchozí a v přílohách I, II a III.

Z tabulky 11 je na první pohled patrný rozdíl mezi novým a starým akumulátorem. Nový se pohybuje u své deklarované kapacity 2200 mAh, zatímco starý a již opotřebovaný akumulátor má kapacitu při pokojové teplotě okolo 1500 mAh při prvních pokusech, což je přibližně pouze 68% deklarované kapacity. Tento výsledek byl očekávaný.

V příloze I můžeme vidět seřazení výsledků podle pořadí měření. Kapacita staré baterie se s přibývajícími pokusy snižovala. Pobyt v extrémních podmínkách pro ni byl tedy degradující. Vliv degradace bude dále diskutován u jednotlivých výsledků, které byly ovlivněny. Nová baterie si oproti tomu udržela deklarovanou kapacitu při pokojové teplotě i po provedení pokusů v extrémních teplotách. Z těchto výsledků vyplývá, že stáří a opotřebení baterie má značný vliv na její schopnost odolat extrémním prostředím bez následků pro další používání. A naopak nová baterie omezený počet cyklů v těchto prostředích přečká bez dalších následků. Tyto závěry jsou podpořeny také složeným grafem pokojových teplot v příloze III, kde vidíme značný rozptyl konce křivky vybíjení u starého akumulátoru. Naopak nový má tyto konce sdružené.

Samotné vybíjecí charakteristiky můžeme velice dobře pozorovat na grafu 1. Je zde patrný zřetelný rozdíl těchto charakteristik mezi novou a starou baterií. Nová má téměř lineární pokles napětí s časem až do bodu, kdy začne napětí strmě klesat. Proto je pro delší životnost baterie vhodnější nastavit vyšší napětí na článek pro ukončení vybíjení než 3 V, které byly použity v pokusech. Při takto prudkém poklesu napětí na konci křivky hrozí překročení hranice 3 V a degradace článků. Pokud bychom ukončili vybíjení na začátku tohoto prudkého snížení napětí, přibližně na hodnotě 10,7 V a tedy asi 3,56 V/článek využitá kapacita by v tu chvíli byla 2088 mAh. Tato kapacita se rovná 94,9% udávané kapacity 2200 mAh a 93,4% reálné získané kapacity 2236 mAh při tomto konkrétním pokusu. Pro pouhých 5,1 až 6,6% kapacity se takto nízká hranice nevyplatí a pro normální využití lze doporučit hranici alespoň 3,5 V. Sníží se tím opotřebovávání akumulátoru, který je náchylný na podvybíjení (jak víme z předchozích kapitol) a tedy vzroste životnost. Je nutné připomenout, že se tato hranice liší podle druhu Li-Po akumulátoru a tato určitá se vztahuje pouze pro testovaný druh.

To však platí pouze o neopotřebované baterii. Jak vidíme na druhé křivce grafu 1 patřící staré baterii, 10,7 V je dosaženo velice rychle. Baterie nemá žádný výrazný pokles na konci křivky, avšak vidíme strmější téměř lineární pokles. U starších a opotřebovaných baterií se tedy vyplatí nastavit nižší limit napětí na článek při vybíjení. Kromě zřejmého důvodu velice nízké kapacity při vyšším limitu, také z ekonomických důvodů. Baterii je třeba (v prostředí normálního využívání) v dohledné době vyměnit (nebezpečí plynoucí z nafouknutí, ztráta kapacity). Nižší kapacita může zamezit použití pro účel ke kterému byla původně určena. Nižší limit nám tedy pomůže ji pro tento účel využívat o něco déle. Jakmile začne výrazně klesat kapacita akumulátoru je podle těchto měření vhodné postupně snižovat limit napětí na článek při vybíjení. Toto všeobecné pravidlo se může dobře uplatnit při použití jakýchkoliv Li-Po akumulátorů.

Pro měření v 5°C byla očekáván výsledek s nevýrazně menší dostupnou kapacitou. Z grafu 2 a tabulky 11 je patrný tento pokles o jednotky procent. Přibližně 1,3% u nové baterie vůči deklarované kapacitě a 2,8% vůči změřené aktuální (pro další měření referenční) při pokojové teplotě. 8,4% je potom pokles kapacity u staré baterie vůči změřené kapacitě při pokojové teplotě. Porovnáním grafů 1 a 2 můžeme pozorovat zásadní rozdíl na začátku křivek. Napětí zde velice rychle po začátku vybíjecího procesu pokleslo u nové baterie až k 11,8 V oproti 12,2 V při pokojové teplotě. Stará baterie má potom tento pokles ještě výraznější a dosahuje až k hodnotě 10,2 V oproti 11,5 V při pokojové teplotě. Tento pokles můžeme očekávat mnohem výraznější v nižších teplotách (jak budeme pozorovat u dalších pokusů). Je zajímavé, že rozdíl v kapacitě není více než 8,4% u staré baterie i přes výrazný počáteční pokles napětí. Vysvětlení můžeme hledat v další části křivky. Po tomto poklesu následuje mírný růst napětí a to i přes kontinuální průběh vybíjení. Nárůst napět je způsoben tvorbou tepla uvnitř akumulátorů vlivem vnitřního odporu při vybíjení. Tento vnitřní odpor je všeobecně nežádoucí jev, který se výrobci snaží minimalizovat, protože snižuje efektivitu předávání energie akumulátoru. Zde ale pomohl zahřát akumulátor a tím zvýšit jeho použitelnou kapacitu. Pokud by efekt neexistoval mohli bychom očekávat podobný nebo prudší průběh křivky než při pokojové teplotě. Vidíme zde výrazný rozdíl mezi novou a starou baterií ve schopnosti odolat nižším teplotám. Zahřátí nového akumulátoru nelze na křivce rozpoznat. Zahřátí nám tedy zajistilo obdobný průběh křivky jako při pokojové teplotě. Snížení kapacity na křivce můžeme pozorovat v onom počátečním poklesu napětí. Po vybití byly baterie subjektivně teplé (stejně jako po pokusu v pokojové teplotě). Dá se tedy říci, že toto zahřívání samo sníží efekt který má teplota prostředí 5°C.

U vyhodnocování grafu 3, který znázorňuje měření v -18°C je potřeba zdůraznit rozdíl oproti měření v -5°C. Do -18°C (graf 3) byly akumulátory vloženy a ihned poté byl zahájen vybíjecí program. Oproti tomu v 5°C byly baterie uloženy několik hodin, aby veškeré jejich součásti dosáhly této teploty. Můžeme pozorovat další pokles v dostupných kapacitách. U nového akumulátoru činí pouhých 4,6% a u starého potom 35,8% od referenčního měření v pokojové teplotě. Tento výsledek opět dokazuje vysokou schopnost nového akumulátoru odolat nepříznivým teplotním podmínkám. Opotřebovaný

akumulátor měl velice výrazný pokles kapacity. Na křivce nového akumulátoru můžeme vidět strmější průběh než na grafu 1 Avšak tvar křivky zůstává obdobný. Můžeme si také povšimnout, že nedošlo k prudkému prvotnímu poklesu napětí. Pokud tedy nedojde k podchlazení akumulátoru a s vybíjením se začne okamžitě po přechodu do nízkých teplot, můžeme očekávat takto dobré vlastnosti. U tohoto pokusu proběhly dvě měření se starým akumulátorem. Není zde vidět tak patrný počáteční pokles napětí jako u grafu 2, ale je přesto větší než při pokojové teplotě (graf 1). Zjevný ovšem je značně strmý pokles napětí. Křivce schází charakteristický oblouk, jaký byl vidět v předchozích grafech. Měření starého akumulátoru probíhalo až jako 14. respektive 16. v pořadí a je ovlivněno degradací akumulátoru (jak je řečeno v začátku podkapitoly).

V grafu 4 je zaznamenáno měření, kdy se do -18°C vložily akumulátory na 10 minut a poté bylo zahájeno vybíjení. Nový akumulátor registroval pokles kapacity o 5% a starý potom o 25% z referenčních hodnot. Pokles kapacity pro nový akumulátor nebyl výrazný oproti měření při okamžitém vybíjení v -18°C. Můžeme to opět vysvětlit pohledem na křivku v grafu. Vidíme rychlý počáteční pokles napětí na přibližně 11,9 V. Další průběh křivky je však velice podobný měření v 5°C až na její větší strmost z čehož vyplývá kratší čas vybíjení a nižší kapacita. Stará baterie také prodělala rychlý počáteční pokles napětí, a to na asi 10,4 V. Z počátečního poklesu napětí staré i nové baterie při porovnání s poklesem v 5°C vyplývá, že se za 10 minut pobytu v -18°C akumulátory nestihly ochladit natolik jako při delším pobytu v 5°C. Z dalšího porovnání křivek je však jasné, proč je celková kapacita nižší. Důvodem je neschopnost tepla vytvářeného vnitřním odporem kompenzovat kontinuální pobyt v nižší teplotě. Křivky jsou tedy strmější a kapacita nižší. Zvláště u křivky starého akumulátoru můžeme pozorovat absenci nárůstu napětí během vybíjení, který je přítomen v grafu 2 (5°C). V grafu 4 je křivka po prvotním poklesu spíše lineární.

Graf 5 znázorňuje měření v -18°C s akumulátory vloženými 20 minut před započnutím vybíjení. Z tabulky 11 můžeme vyčíst další snížení kapacity obou akumulátorů. A to o 6% pro nový a 35% pro starý (z referenčních hodnot). Opět můžeme pozorovat výrazný počáteční pokles napětí. Pro nový akumulátor na hodnotu 11,3 V a pro starý potom dokonce na 9,6 V. Po tomto poklesu následuje u nového akumulátoru standardní křivka podobná ostatním měřením v -18°C. Starý akumulátor má výrazný nárůst napětí po počátečním poklesu. Nárůst je přibližně o 0,2 V a křivka je podobná té v grafu 2 (5°C). Zde můžeme opět zdůraznit přínos vnitřního odporu. 20 minut již byla dostatečná doba pro ochlazení akumulátorů, aby se projevil výrazný pokles napětí a je potřeba opatrnosti při využívání starších akumulátorů při vysokých proudech, kdy by mohlo klesnout okamžitě pod mezní hodnotu.

Na grafu 6 můžeme pozorovat průběh vybíjení akumulátorů uložených v -18°C na 25 minut před počátkem vybíjení. V tomto případě byly oba akumulátory měřeny dvakrát. Pro nový akumulátor byl zaznamenán pokles z referenční kapacity o 5,6 a 5,8%. U starého potom o 98,9 a 46,5%. Znovu se potvrzuje, že nový akumulátor dobře odolává nízkým teplotám. 5 minut navíc oproti předchozímu

pokusu mu kapacitu nesnížilo. Můžeme zde u něj pozorovat standardní křivku kterou očekáváme v -18°C. Prvotní pokles napětí na hodnotu přibližně 11,2 V byl očekávaný. Starý akumulátor se s dalšími 5 minutami v mrazu vyrovnával o poznání hůře. Při jednom z pokusů mu dokonce okamžitě po začátku vybíjení kleslo napětí pod nastavenou mez a měl tedy v podstatě nulovou kapacitu. Pokles při druhém měření byl podobný, a to na hodnotu přibližně 9,1 V. Při tomto pokusu však nedošlo k překročení hranice žádným z článků, jeden se však dostal na hodnotu 3,002 V. Stačilo tedy pouze další 2 mV poklesu, než začalo napětí stoupat, aby se vybíjení přerušilo. Při obou pokusech je napětí tak blízko této hranici, že by stačilo minimálně zvýšit odebíraný proud a mez by byla jistě překročena. Druhý pokus se starým akumulátorem se opět vyznačuje výrazným nárůstem napětí po prvotním poklesu způsobeným vnitřním odporem a tvorbou tepla. Tentokrát dokonce o přibližně 0,4 V. Je zajímavé pozorovat, že celkové napětí, kdy dojde k překročení limitu je vyšší než nejnižší hodnota při prvotním poklesu.

	Celkové napětí [V]	Napětí článku 1 [V]	Napětí článku 2 [V]	Napětí článku 3 [V]
Prvotní pokles	9,116	3,009	3,21	3,002
Konec vybíjení	9,258	3	3,357	3,007

Tabulka 12: limitní hodnoty napětí starého akumulátoru při -18°C na 25 minut

Jak vidíme v tabulce 12, tento jev je dán vyšším napětím článku 2. Tento článek je v lepším stavu než zbylé dva a v této teplotě má lepší výkony. Pro celkovou kapacitu akumulátoru to však nemá význam. Celý akumulátor je závislý na vlastnostech nejhoršího (či nejslabšího) článku. Je možné se domnívat, že článek 2 je ve středu baterie mezi článkem 1 a 2. Působí na něj tedy mnohem více zahřívání během vybíjení. Tento čas pobytu v -18°C můžeme označit za limitní pro starší akumulátor a vůbec ho nelze doporučit pro reálné využívání. Vyšší teplota nebo kratší čas by měly zmírnit efekt, ale jakoukoliv teplotu pod 0°C je třeba respektovat zejména pro efekt počátečního poklesu napětí. Pokud totiž ze začátku využívání nebudeme odebírat dostatečný proud, akumulátor se nezahřeje, a to nám prakticky prodlužuje čas pobytu v mrazivém prostředí. Naopak pokud začneme odebírat příliš velký proud hrozí nám okamžitý pokles pod nastavenou mez. Je proto třeba najít kompromis a začít s vybíjením co nejdříve, ale pozvolna. Uvedený postup zajistí nižší další opotřebení akumulátoru a vyšší aktuální kapacitu. Čím je akumulátor starší, opotřebovanější nebo trpí „nafouknutím“, tím bude náchylnější na popisované jevy.

Graf 7 znázorňuje pokus se starým akumulátorem při -18°C a pobytem akumulátoru v mrazu na dobu 30 minut. Z důvodů popsaných v předchozí podkapitole byl zkoušen pouze starý akumulátor. Jak vidíme, napětí pokleslo okamžitě pod limitní hodnotu a vybíjení bylo ukončeno. Kapacita tedy byla téměř nulová.

V grafu 8 můžeme pozorovat křivky napětí v čase pro měření v 50°C. Od měření ve vyšších teplotách byl očekáván nárůst kapacity. Nový akumulátor vykázal nárůst o 0,94% od referenční hodnoty a o 2,6% od deklarované. Starý akumulátoru potom narostla kapacita o 1% od referenční hodnoty. Je ovšem důležité upozornit na fakt, že toto měření starého akumulátoru probíhalo kdy, již byla zaznamenána jistá degradace. Pokud bychom jako referenci pro starší akumulátor braly hodnotu posledního měření v pokojové teplotě, tak nárůst činí dokonce přes 10,8%. První věcí, která nás může upoutat na křivkách je jejich větší podobnost ke křivkám z měření v pokojové teplotě. Křivka nového akumulátoru je na konci strmější a tedy déle drží napětí na nominální úrovni. Starý akumulátor má výraznější pokles napětí na konci křivky a křivka je více než v jiných měřeních podobná novému akumulátoru. Je pouze nepatrně strmější. Jak vidíme akumulátor samozřejmě neudržel napětí, tak dlouho jako nový, ale je vidět, že vyšší teplota působila pozitivně na průběh vybíjení. Počáteční pokles napětí, který jsme sledovali u předchozích měření je zde také, ale jeho vliv je značně menší. Dokonce menší než v pokojové teplotě. U nového akumulátoru jde o pokles na 12,4 V a u starého na asi 12,15 V. Zde tedy nehrozí ani u starého akumulátoru snížení napětí pod mezní hodnotu při silné počáteční zátěži.

Na posledním grafu 9 najdeme měření při 60°C. Jako v předchozím případě i zde došlo k nárůstu kapacity. U nového akumulátoru činil tento nárůst 0,6% od referenční hodnoty a 2,6% od deklarované výrobcem. 2% byl nárůst kapacity starého akumulátoru od původní referenční hodnoty. Avšak od posledního měření v pokojové teplotě před tím v 60°C je nárůst dokonce o 11%. Rozdíl mezi 50 a 60°C již tedy není tak výrazný. Obě křivky jsou tvarem shodné s 50°C. Je zde však již téměř neznatelný pokles napětí na začátku vybíjení. U nového akumulátoru napětí pokleslo na přibližně 12,45 V a u starého na asi 12,25 V.

Všeobecně můžeme říci, že vyšší teploty zlepšují chemické reakce uvnitř článků a zejména starším akumulátorům pomohou k větší dostupné kapacitě. Na novější už však nemají takový pozitivní efekt. Pravidelné vystavování akumulátorů vysokým teplotám, na které nejsou určeny však snižuje životnost akumulátorů. Při 45°C dokonce dochází ke snížení až o 50% cyklů oproti využívání ve 20°C [54]. Naopak v případě nízkých teplot se chemické reakce uvnitř akumulátorů zpomalují a zvyšuje se také vnitřní odpor. Tento efekt ovšem zapříčiní větší zahřívání akumulátoru, a tedy jak jsme pozorovali zvyšování napětí článků i přes probíhající vybíjení. Toto zahřátí tak postupně zvýší teplotu uvnitř článků a tím sníží vnitřní odpor.

6 Optimalizace pohonu pro jednotlivé typy

Z předchozích kapitol je zřejmé, že typů bezpilotních prostředků, způsobů jejich pohonu a možností jejich využití je mnoho. Vždy je proto důležité nejprve definovat co od UA očekáváme za výsledky, jaká máme omezení provozu a jaký je finanční rozpočet. Po této definici bude značně zúžen výběr typu bezpilotního prostředku. Výběr typu je do určité míry vázán na výběr pohonu. Jak bylo popsáno v předchozích kapitolách musíme se řídit požadavky na velikost a hmotnost samotného UA, spotřebu zdroje energie pohonu, a tedy požadovaný dolet nebo vytrvalost.

Ať už bude motiv k využití UA jakýkoliv, je v současné době nejvhodnější držet se osvědčených technologií, jakými jsou pístové pohony a elektromotory. Relativní novinky jako jsou PEMFC a ultrakondenzátory nebo využití reaktivních pohonů jsou stále pro civilní využití v podstatě nedostupné. Důvodem pro to je zejména nedostatečná předpisová základna pro jejich efektivní využívání a nepřipravenost technologií nebo nedostatečná nabídka na trhu. To však neplatí pro všechny způsoby využití. V případě využití pro sport a rekreaci je tento argument irelevantní a optimalizace pohonu je podřadná věc. Nic tak nebrání vlastnoruční výrobě UA s například jednoduchým proudovým pohonem (ne však už s raketovým nebo pulzačním, protože jejich využití v UA by odporovalo předpisu). Komerční využití novějších technologií není zcela nemožné, ale již to vyžaduje značné investice do vývoje UA. Mimo vojenské (a některé rekreační) využití je také zcela nelogické použití proudového pohonu pro bezpilotní prostředky typu VTOL, a to zejména z důvodu potřeby velkého tahu. Poměr tahu a hmotnosti musí být pro VTOL větší než 1. Jak bylo popsáno v předchozích kapitolách takto vysoký tah u proudových pohonů není možné vytvořit bez enormního nárůstu velikosti pohonné jednotky (zvýšení množství vzduchu na který působíme) a tedy hmotnosti a nebo ještě větší zrychlení výstupních plynů, což vyžaduje nadmíru zvýšenou spotřebu pohonných hmot. Současné aplikace proto počítají s VTOL s vrtulovými pohony, neboť ty ovlivňují velké množství vzduchu a samotný motor je poměrně lehký a zůstává zachována i přijatelná spotřeba paliva při visu.

V následující tabulce 13 navrhuji příhodné kombinace pohonů, typů UA a vhodný způsob využití. Návrh vychází ze současného způsobu využívání, dostupné literatury a poznatků získaných v předchozích kapitolách. Rekreační a vojenské využití není bráno v potaz. Jak již bylo řečeno, rekreačně můžeme využívat jakýkoliv druh a záleží jen na našem zájmu. Vojenské využití je tak rozsáhlé, že by se našel způsob použití ve všech typech UA. Tabulka určuje optimální typ pohonu a UA pro jednotlivé způsoby využití jak z hlediska ekonomických, tak i praktických. Jsou samozřejmě možné i jiné kombinace, tato tabulka ale vychází z poznatků z předchozích kapitol a udává kombinace nejvhodnější pro současný stav vývoje technologií spolu s předpokládaným uvolněním některých omezujících zákonů. Samozřejmě i zde se způsoby využití prolínají pro jednotlivé druhy pohonů a typů UA. Záleží na našich preferencích, které nejdou určit všeobecně, ale každý si je musí stanovit podle informací z předchozích kapitol. Hmotnost zátěže nejde snadno určit, protože každý z popsaných typů pohonů je možné škálovat.

Efektivita škálování jednotlivých systémů je popsána v příslušných podkapitolách. Pro účely tohoto přehledu ale můžeme určit jako velmi lehkou zátěž do 2 kg, lehkou zátěž do 10 kg, střední do 20 kg a těžkou přes 20 kg. UA s pevnými nosnými plochami jsou velice specifické, protože v případě jejich malých velikostí není v podstatě možné použít jejich trup pro přepravu nákladu nebo senzorů a velikost nákladu tak značně ovlivňuje jejich letové parametry a vytrvalost (na rozdíl od rotorových typů, kde tento efekt není tak výrazný). Naopak při jejich větší velikosti již můžeme využít trup (pokud se nejedná o samokřídlo) a tím se velmi zvýší maximální hmotnost a velikost nákladu.

Pohon	Typ UA	Využití
Vrtulový s vratným pístovým motorem (všechny druhy paliva)	Pevné nosné plochy	Lehčí zátěž, opakované použití při kratší vytrvalosti (okamžité doplnění paliva) nebo střední zátěž při delší vytrvalosti (do 10 hodin)
	Jeden nebo dva nosné rotory	Střední zátěž, opakované použití při kratší vytrvalosti (okamžité doplnění paliva)
Vrtulový s elektromotory a akumulátory	Pevné nosné plochy	Velmi lehká a nerozměrná zátěž při krátké vytrvalosti (do 30 minut – platí pro ostatní využití v této kategorii pohonu)
	Jeden nebo dva nosné rotory	Lehká až střední zátěž při krátké vytrvalosti – vhodné pro amatérské využití
	Multirotorové	Velmi lehká až lehká zátěž při krátké vytrvalosti – vhodné pro amatérské využití
	Hybridní	Lehká zátěž s krátkou vytrvalostí (záleží na typu hybridu)
Vrtulový s elektromotory, PEMFC a ultrakondenzátory	Pevné nosné plochy	Lehká až střední zátěž při střední (více než hodinu) až dlouhé vytrvalosti (přes 10 hodin)
	Jeden nebo dva nosné rotory	Střední až těžká zátěž při střední (více než hodinu) až dlouhé vytrvalosti (přes 10 hodin)
Vrtulový s elektromotory, fotovoltaikou a akumulátory	Pevné nosné plochy	Velmi lehká zátěž při dlouhodobé vytrvalosti (dny)
Turbovrtulové	Pevné nosné plochy	Těžká a velká zátěž při střední vytrvalosti (hodiny)
	Hybridní	Těžká a velká zátěž při střední vytrvalosti (hodiny)
Reaktivní proudové s palivem z derivátů ropy	Pevné nosné plochy	Velmi těžká zátěž při střední vytrvalosti (hodiny) a při potřebě vysoké cestovní hladiny

Tabulka 13: optimalizace pohonů a typů UA podle využití

K tabulce 13 je nutné doplnit, že UA s jakékoliv rotorové UA jsou velice vhodné pro podvěšení nákladu. A protože se u nich nepředpokládá aerodynamická čistota, může tento náklad být rozměrný. Pro toto podvěšení se hodí kamery, fotoaparáty a všechny další senzory. Mají tak k dispozici nepřerušované zorné pole na zem.

7 Závěr

Právní a předpisové aspekty provozu bezpilotních prostředků jsou probrány v první části práce. Definovali jsme si zde jednotlivé pojmy v probírané problematice a určili současné hranice možností samotného provozu s bezpilotními prostředky. Ať už se jedná o modely letadel nebo bezpilotní letadla a systémy. Byla probrána i další legislativa týkající se provozu UA včetně odpovědnosti za škodu a ochranu osobních údajů. Veškerá tato současná legislativa je značně omezující pro úplné využití UA v různých aplikacích, jsou proto velice důležité projekty pro jejich další integraci.

Kapitola tři se věnuje definici a rozdělení jednotlivých typů bezpilotních prostředků. V první části podle konstrukce, kde jsme si definovali dva hlavní typy UA a popsali jejich vlastnosti. A to na typy s pevnými nosnými plochami a s nosným rotorem nebo rotory. Další část kapitoly byla věnována možnostem využití UA v praxi. Vymezení jednotlivých způsobů využití je důležité pro určení požadovaného vybavení UA a výběr správného typu.

V kapitole čtyři jsme se seznámili s možnými kandidáty pro pohon bezpilotní prostředků. Rozdělili jsme je podle způsobu vyvození tahu na vrtulové a reaktivní pohony. Vrtulové pohony jsou v civilním sektoru téměř výlučně využívány, a to z důvodů omezení vyplývající ze současné legislativy. V kapitole jsme se dozvěděli nejen o nejrozšířenějších vrtulových pohonech jako jsou elektromotory s akumulátory nebo spalovací motory s přímočarým pohybem pístu, ale také o všech dalších alternativách, které dnešní technologie nabízejí. Tyto alternativy nejsou snadné na zavedení do praxe ať už z legislativních důvodů, ale také z důvodů finančních. Například UA s vrtulovým pohonem a elektromotory napájené vodíkovým palivovým článkem jsou jednoznačně výhodnější pro některé současné aplikace, ale jedná se o komplexní technologii a její provázání s UA je vývojově náročné. U jednotlivých pohonů jsme si poukázali na pozitiva a negativa jejich aplikace v UA.

Kapitola pět se věnovala energetické hustotě pohonů. Pro porovnání byla uvedena tabulka energetické hustoty a specifické energie zdrojů energie pohonů popisovaných v předchozí kapitole. Spolu s tabulkou bylo však upozorněno na její zavádějící podstatu, která se týká efektivity přenosu energie a dalších parametrů pohonů. V druhé části kapitoly jsme se zaobírali praktickým měřením vybíjecích charakteristik a kapacity Li-Po akumulátorů v různých teplotách. Měřili jsme baterii novou a starší, která byla již značně opotřebovaná. Porovnávali jsme tedy jejich schopnost vyrovnat se s nepříznivým prostředím, kterým by mohly být vystaveny ve skutečném provozu UA. Zjistili jsme, že vyšší teploty zlepšují chemické reakce uvnitř článků akumulátoru, a především pak starším akumulátorům na pokraji životnosti přispějí k větší dostupné kapacitě. Na novější akumulátory však vyšší teplota nemá tak výrazný efekt. Dále jsme zjistili, že při nízkých teplotách se chemické reakce v článcích zpomalují a zvyšuje se také vnitřní odpor akumulátoru. Zvýšený vnitřní odpor snižuje efektivitu přenosu energie, ale také způsobuje nezanedbatelné zahřátí článků. Jak jsme sledovali, dochází také v tu chvíli ke zvýšení

napětí článků, ačkoliv právě probíhalo vybíjení. Důsledkem zahřátí je snížený vnitřní odpor, který opět zvyšuje efektivitu přenosu energie. Při delším pobytu v nízkých teplotách akumulátory trpěly při počátku vybíjení na rychlé snížení napětí, které bylo u starého akumulátoru velmi výrazné. Při pokusech s delším pobytem akumulátoru v nízké teplotě došlo k tomu, že starý akumulátor již nevykazoval žádnou kapacitu, protože mu napětí kleslo pod stanovenou mez okamžitě po začátku vybíjení. Starší akumulátor je tedy všeobecně citlivý na extrémní teploty a nový je naopak snáší mnohem lépe.

Poslední kapitola pak shrnuje poznatky z předchozích kapitol a optimalizuje kombinace pohonů pro jednotlivé typy a způsoby využití bezpilotních prostředků. Pomáhá tak orientaci případným zájemcům o implementaci těchto technologií do jejich odvětví.

Použité zdroje

[1] ČESKO. *Zákon č. 49/1997 Sb., o civilním letectví a o změně a doplnění zákona č. 455/1991 Sb., o živnostenském podnikání (živnostenský zákon), ve znění pozdějších předpisů*. In: Zákony pro lidi.cz [online]. © AION CS 2010-2018 [cit. 6. 2. 2018]. Dostupné z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1997-49

[2] ČESKO. *Dohoda č. 147/1947 Sb., úmluva o mezinárodním civilním letectví*. In: Zákony pro lidi.cz [online]. © AION CS 2010-2018 [cit. 6. 2. 2018]. Dostupné z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1947-147

[3] *Právní aspekty provozu dronů v ČR.* Droneweb [online]. 15.12.2017 [cit. 2018-02-06]. Dostupné z: http://www.droneweb.cz/legislativa-provozu-dronu/item/193-pravni-aspekty-provozu-dronu-v-cr

[4] *Informace související s provozem bezpilotních letadel a modelů letadel*. Úřad pro civilní letectví [online]. [cit. 2018-02-08]. Dostupné z: http://www.caa.cz/letadla-bez-pilota-na-palube/informace-souvisejici-s-provozem-bezpilotnich-letadel-a-1

[5] ČESKO. *Předpisy řady L: L 2 - Pravidla létání*. In: Letecká informační služba. 2017. Dostupné také z: https://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/print/L-2_cely.pdf

[6] *Jaká vzdálenost je z pohledu ÚCL považována za bezpečnou?* Úřad pro civilní letectví [online]. [cit. 2018-02-16]. Dostupné z: http://www.caa.cz/letadla-bez-pilota-na-palube/jaka-vzdalenost-je-z-pohledu-ucl-povazovana-za-bezpecnou

[7] *Unmanned aircrafts*. European Commission [online]. [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: http://ec.europa.eu/growth/sectors/aeronautics/rpas_en

[8] *Opinion No 01/2018: Introduction of a regulatory framework for the operation of unmanned aircraft systems in the 'open' and 'specific' categories*. In: . EASA. Dostupné také z: https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/Opinion%20No%2001-2018.pdf

[9] *U-Space*. SESAR: Joint Undertaking [online]. Publications Office of the European Union, 2017 [cit. 2018-02-19]. DOI: 10.2829/335092. Dostupné z: https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/U-space%20Blueprint%20brochure%20final.PDF

[10] ČESKO. *Zákon č. 89/2012 Sb., občanský zákoník*. In: Zákony pro lidi.cz [online]. © AION CS 2010-2018 [cit. 19. 2. 2018]. Dostupné z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-89#p2927

[11] *Právní aspekty provozu dronů II*. Droneweb [online]. 26.12.2017 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: http://www.droneweb.cz/legislativa-provozu-dronu/item/195-pravni-aspekty-dronu-ii

[12] ČESKO. *§ 16 odst. 2 písm. s) zákona č. 114/1992 Sb., České národní rady o ochraně přírody a krajiny*. In: Zákony pro lidi.cz [online]. © AION CS 2010-2018 [cit. 19. 2. 2018]. Dostupné z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1992-114#p16-2-s

[13] NASA *Armstrong Fact Sheet: Helios Prototype*. NASA [online]. 2014 [cit. 2018-02-26]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/centers/armstrong/news/FactSheets/FS-068-DFRC.html

[14] *Jak vrtulník létá a jak se řídí?*. PELIKANDANIEL.COM [online]. [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: http://www.pelikandaniel.com/?sec=page&id=5

[15] ABSOLON, Stanislav, Hana HAVLOVÁ a David HŮLEK. *UAV Drive Units Testing at Pork Tissue*. MAD - Magazine of Aviation Development [online]. 2018, 6(1), 17- [cit. 2018-03-01]. DOI: 10.14311/MAD.2018.01.03. ISSN 1805-7578. Dostupné z: https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/mad/article/view/4725

[16] KLEMENTOVÁ, T. *Legislativa pro využití dronu v realitní praxi*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, 2017. 91 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Klika. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=146743

[17] *Amazon Prime Air*. Amazon.com [online]. c1996-2018 [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: https://www.amazon.com/Amazon-Prime-Air/b?ie=UTF8&node=8037720011

[18] *Ambulance Drone*. Delft University of Technology [online]. Delft [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: https://www.tudelft.nl/en/ide/research/research-labs/applied-labs/ambulance-drone/

[19] ČEŘOVSKÝ, David. *Využití dronů v praxi v rámci IZS*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2017, 64 s. Dostupné také z: http://hdl.handle.net/10563/41244. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta aplikované informatiky, Ústav elektroniky a měření. Vedoucí práce Adámek, Milan.

[20] KARAS, Jakub a Tomáš TICHÝ. *Drony*. Brno: Computer Press, 2016. ISBN 978-80-251-4680-4.

[21] PECHANEC, Vilém, Ales VÁVRA a Ivo MACHAR. *Using of the UAV Technology for Data Monitoring in Precision Agriculture with Example of Sugar Beet*. Listy Cukrovarnické a Reparské. 2014, vol. 130, no. 5-6, s. 162. ISSN 1210-3306.

[22] ÓMEZ, Cristina a David R. GREEN. *Small unmanned airborne systems to support oil and gas pipeline monitoring and mapping.* Arabian Journal of Geosciences. 2017, vol. 10, no. 9, s. 1-17. ISSN 1866-7511.

[23] MENG, Xuelian et al. *Photogrammetric UAV Mapping of Terrain under Dense Coastal Vegetation: An Object-Oriented Classification Ensemble Algorithm for Classification and Terrain Correction.* Remote Sensing. 2017, vol. 9, no. 11, s. 1187. ISSN 2072-4292.

[24] DONATEO, Teresa, Luigi SPEDICATO, Gianluca TRULLO, A. Paolo CARLUCCI a Antonio FICARELLA. *Sizing and Simulation of a Piston-prop UAV*. Energy Procedia

[online]. 2015, 82, 119-124 [cit. 2018-04-12]. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.12.003. ISSN 18766102. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610215026521

[25] *Aircraft Rotary Engine News Letter* [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: http://www.rotaryeng.net/

[26] GRIFFIS, Christopher, Timothy WILSON, Jeffrey SCHNEIDER a Peter PIERPONT. *Unmanned Aircraft System Propulsion Systems Technology Survey*. Daytona Beach, 2009. Report. Embry-Riddle Aeronautical University, Department of Electrical, Computer, Software, & Systems Engineering. Dostupné z: http://commons.erau.edu/publication/72

[27] ŠIMON, Josef. Jak se dělá elektromotor. ELEKTRO: odborný časopis pro elektrotechniku. 2011(02), 36-43. ISSN 1210-0889. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42921.pdf

[28] MIYAMASU, Masataka a Kan AKATSU. *Efficiency comparison between Brushless dc motor and Brushless AC motor considering driving method and machine design.* In: IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society [online]. IEEE, 2011, 2011, s. 1830-1835 [cit. 2018-04-29]. DOI: 10.1109/IECON.2011.6119584. ISBN 978-1-61284-972-0. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/document/6119584/

[29] REID, Concha M., Michelle A. MANZO a Michael J. LOGAN. *Performance Characterization of a Lithium-Ion Gel Polymer Battery Power Supply System for an Unmanned Aerial Vehicle* [online]. In: . 2004-11-02, s. - [cit. 2018-04-30]. DOI: 10.4271/2004-01-3166. Dostupné z: http://papers.sae.org/2004-01-3166/

[30] *NiCd Technical Hand Book: GP Batteries* [online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20070927222904/http://www.gpbatteries.co.uk/downloads/technical_handbooks/GP_NiCd_Technical.pdf

[31] *Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2006/66/ES ze dne 6. září 2006: o bateriích a akumulátorech a odpadních bateriích a akumulátorech a o zrušení směrnice 91/157/EHS (Text s významem pro EHP).* EVROPSKÝ PARLAMENT A RADA EVROPSKÉ UNIE, 2006. Dostupné z: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/ALL/?uri=celex:32006L0066

[32] FETCENKO, M. A. et al. *Recent advances in NiMH battery technology.* Journal of Power Sources. 2007, vol. 165, no. 2, s. 544-551. ISSN 0378-7753.

[33] SALT, John. *Understanding RC LiPo Batteries. RCHelicopterFun.com* [online]. c2008-2018, March 2018 [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: https://www.rchelicopterfun.com/rc-lipo-batteries.html

[34] *Li-ion baterie: principy, provoz, rady (1. část).* Cnews.cz: Od transistorů, až po PC sestavy [online]. 15.4.2011 [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: https://www.cnews.cz/li-ion-baterie-principy-provoz-rady-1-cast/

[35] BUCHMANN, Isidor. *Types of Lithium-ion Batteries.* Battery University: Basic to Advanced Battery Information from Battery University [online]. c2018 [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion

[36] REID, Concha, Michelle MANZO a Michael LOGAN. *Performance Characterization of a Lithium-Ion Gel Polymer Battery Power Supply System for an Unmanned Aerial Vehicle*. 2004. Dostupné z: https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20050019219.pdf

[37] BECHNÍK, Bronislav. *Stručná historie fotovoltaiky*. TBZ-info: stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov. 2014, 16. ISSN 1801-4399. Dostupné také z: https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11652-strucna-historie-fotovoltaiky

[38] *What are the most efficient solar panels on the market?* EnergySage: Get competing solar quotes online [online]. c2009-2017, 13 March 2018 [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: https://news.energysage.com/what-are-the-most-efficient-solar-panels-on-the-market/

[39] GREEN, Martin A. a Stephen P. BREMNER. *Energy conversion approaches and materials for high-efficiency photovoltaics*. Nature Materials. 2016;2017;, vol. 16, no. 1, s. 23-34. ISSN 1476-1122.

[40] DONATEO, Teresa et al. *A new approach to calculating endurance in electric flight and comparing fuel cells and batteries.* Applied Energy. 2017, vol. 187, s. 807-819. ISSN 0306-2619.

[41] BUCHMANN, Isidor. *How does a Supercapacitor Work?* Battery University: Basic to Advanced Battery Information from Battery University [online]. c2018, 21.4.2017 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor

[42] TURBA, Ronald. Design of a nuclear propulsion system for an unmanned aerial vehicle. Nashville, Tennessee, 2011. Masters thesis. Vanderbilt University.

[43] BLACKWELDER, Philip Scott. UAV Mission Optimization through Hybrid-Electric Propulsion: ProQuest Dissertations Publishing, 2017. ISBN 0355458136;9780355458138;.

[44] JACK D. MATTINGLY a WITH A FOREWORD BY HANS VON OHAIN. Elements of gas turbine propulsion. Tata McGraw-Hill ed. New Delhi, Toronto: Tata McGraw-Hill, 2005. ISBN 978-007-0606-289.

[45] PRELAS, Mark. *Nuclear-Pumped Lasers* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2016 [cit. 2018-10-21]. ISBN 978-3-319-19844-6.

[46] *Fossil and Alternative Fuels: Energy Content*. Engineering ToolBox [online]. 2008 [cit. 2018-10-21]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/fossil-fuels-energy-content-d_1298.html

[47] *Energy Storage Density*. Engineering ToolBox [online]. 2008 [cit. 2018-10-21]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/energy-density-d_1362.html

[48] *Rechargeable Batteries: Battery Life Calculator*. Engineering ToolBox [online]. 2009 [cit. 2018-10-21]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/rechargeable-batteries-d_1219.html

[49] *Battery Knowledge*. BatterySpace.com/AA: Portable Power Corp. [online]. [cit. 2018-10-21]. Dostupné z: https://www.batteryspace.com/batteryknowledge.aspx

[50] *SOLID ROCKET BOOSTERS*. Kennedy Space Center's Science, Technology and Engineering [online]. NASA/KSC Information Technology Directorate, 2016, 1988 [cit. 2018-10-21]. Dostupné z: https://science.ksc.nasa.gov/shuttle/technology/sts-newsref/srb.html

[51] *Product Comparison*. In: MAXWELL TECHNOLOGIES: ULTRACAPACITORS [online]. 2014 [cit. 2018-10-21]. Dostupné z: http://www.maxwell.com/images/documents/Product_Comparison_Matrix_3000489_2.pdf

[52] *Technical data: XL660 Supercapacitors*. In: Electrical Sector: Eaton [online]. 2017, s. 3 [cit. 2018-10-21]. Dostupné z: http://www.cooperindustries.com/content/dam/public/bussmann/Electronics/Resources/product-datasheets/bus-elx-ds-10339-xl.pdf

[53] CIRIGLIANO, Daniele. *Engine-type and Propulsion-configuration Selections for Long-duration UAV Flights*. Irvine California, Milano Italia, 2017. M.Sc. Thesis. Politecnico di Milano Space Propulsion Laboratory, University of California Irvine Mechanical and Aerospace Engineering. Vedoucí práce Prof. William A.Sirignano PhD. Prof. Feng Liu PhD, Irvine Prof. Filippo Maggi PhD. Dostupné z: https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/134017/1/UAV%20Propulsion%20-%20Cirigliano.pdf

[54] BU-502: Discharging at High and Low Temperatures. Battery University [online]. Isidor Buchmann, c2019, 25.01.2018 [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/discharging_at_high_and_low_temperatures

[55] BARBIR, Frano. PEM fuel cells: theory and practice. 2nd ed. Boston: Elsevier/Academic Press, c2013. ISBN 978-0-12-387710-9.

[56] TAHANI, Mojtaba, Saeed JAVAN a Mojtaba BIGLARI. A comprehensive study on waste heat recovery from internal combustion engines using organic Rankine cycle. Thermal Science [online]. 2013, 17(2), 611-624 [cit. 2019-05-12]. DOI: 10.2298/TSCI111219051T. ISSN 0354-9836. Dostupné z: http://www.doiserbia.nb.rs/Article.aspx?ID=0354-98361200051T

[57] STARK, Anthony. Brake Specific Fuel Consumption (BSFC). X-engineer.org: Engineering Tutorials [online]. 2017 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: https://x-engineer.org/automotive-engineering/internal-combustion-engines/performance/brake-specific-fuel-consumption-bsfc/

[58] TONA, Cesare, Paolo RAVIOLO, Luiz PELLEGRINI a Silvio DEOLIVEIRA. Exergy and thermoeconomic analysis of a turbofan engine during a typical commercial flight. The Energy Journal. 2010, (35), 8. DOI: 10.1016/j.energy.2009.06.052 . ISSN 0360-5442.

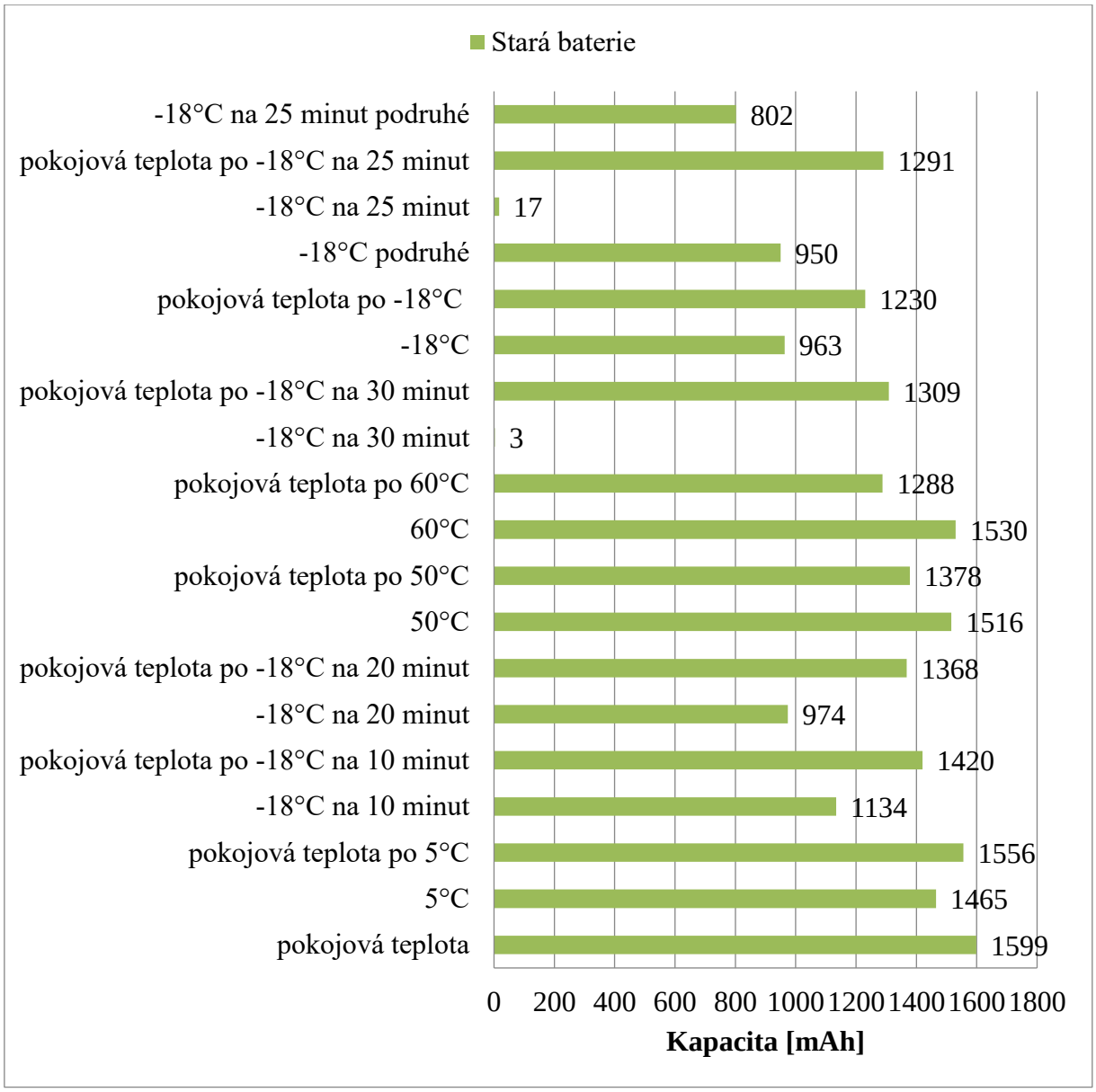
[59] BUCHMANN, Isidor. BU-808b: What Causes Li-ion to Die?. Battery University: Basic to Advanced Battery Information from Battery University [online]. 2019, 31.08.2017 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/bu_808b_what_causes_li_ion_to_die

[60] VALOEN, Lars a Mark SHOESMITH. THE EFFECT OF PHEV AND HEV DUTY CYCLES ON BATTERY AND BATTERY PACK PERFORMANCE [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: http://umanitoba.ca/outreach/conferences/phev2007/PHEV2007/proceedings/PluginHwy_PHEV2007_PaperReviewed_Valoen.pdf

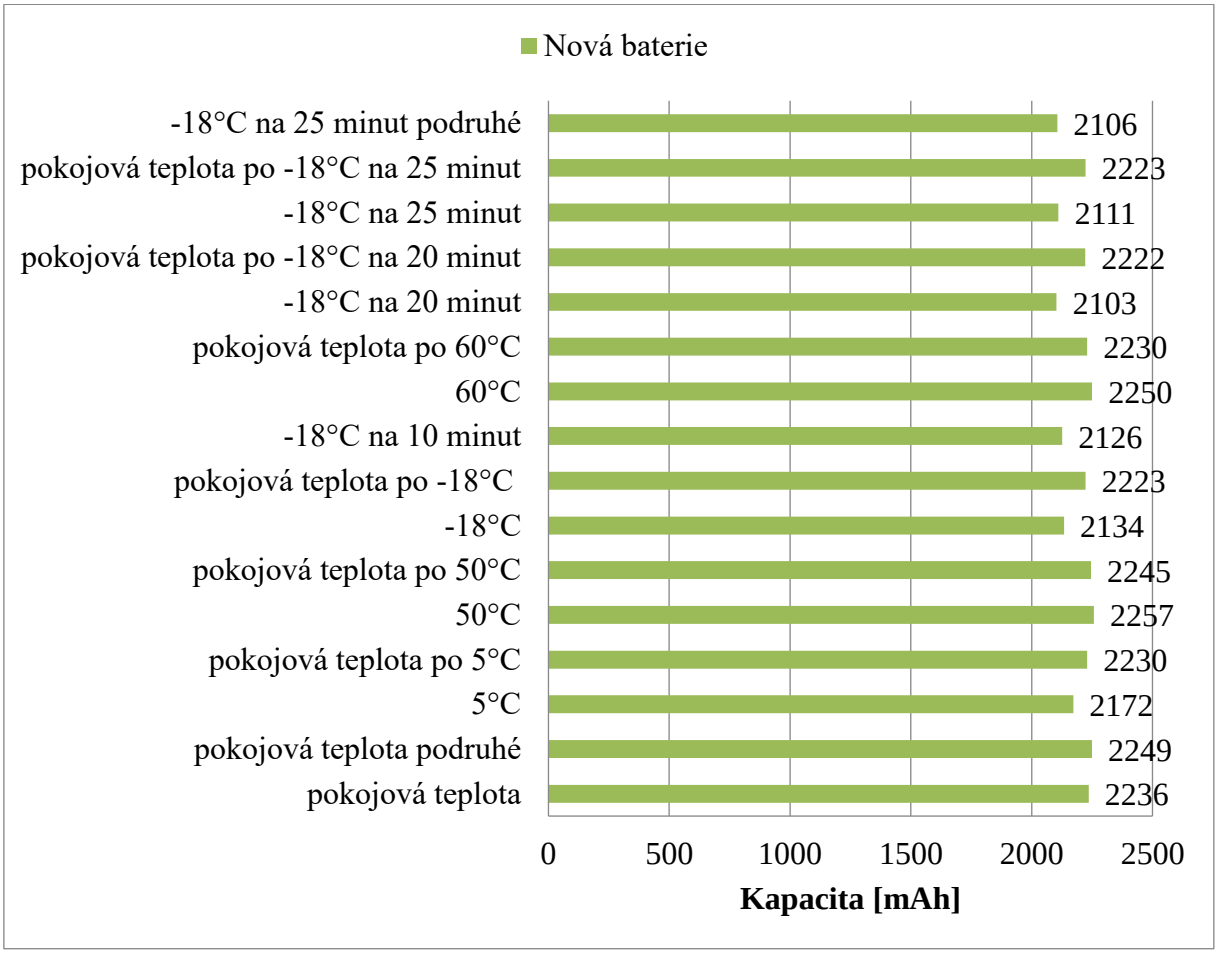
[61] Battery VS Supercapacitor. SupercapTech.com: Supercapacitor is not a battery: charging is ultra fast [online]. 2016, 2016 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: https://www.supercaptech.com/battery-vs-supercapacitor

Příloha I

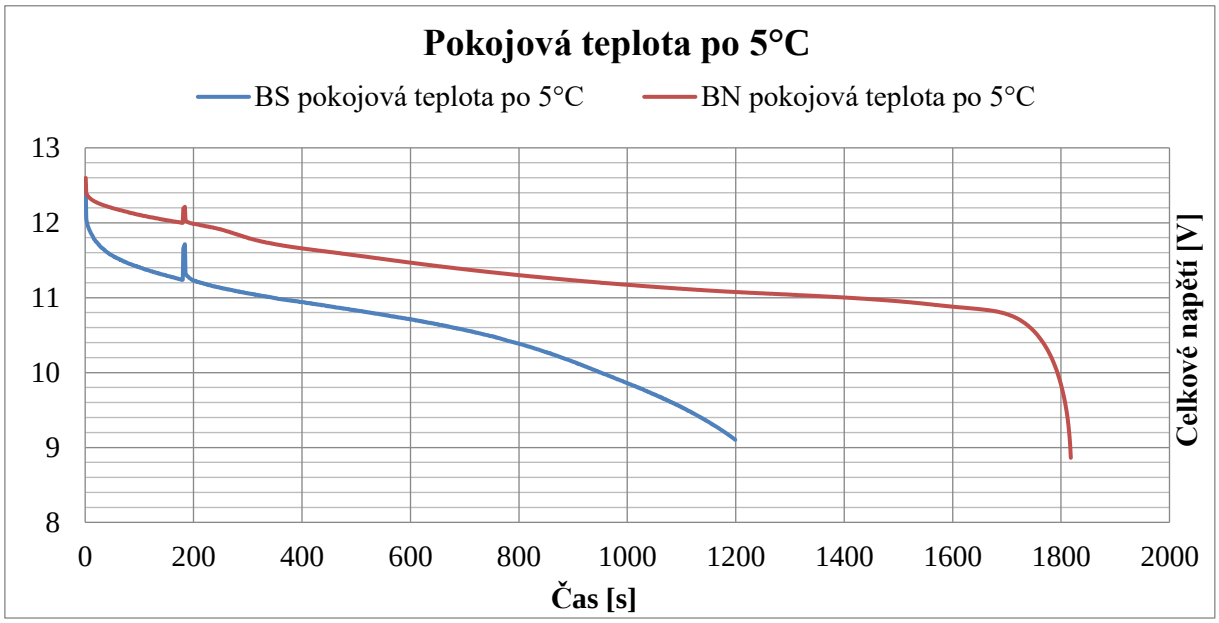
	kapacita [mAh]	
Měření	Stará baterie	Pořadí měření
pokojová teplota	1599	1
5°C	1465	2
pokojová teplota po 5°C	1556	3
-18°C na 10 minut	1134	4
pokojová teplota po -18°C na 10 minut	1420	5
-18°C na 20 minut	974	6
pokojová teplota po -18°C na 20 minut	1368	7
50°C	1516	8
pokojová teplota po 50°C	1378	9
60°C	1530	10
pokojová teplota po 60°C	1288	11
-18°C na 30 minut	3	12
pokojová teplota po -18°C na 30 minut	1309	13
-18°C	963	14
pokojová teplota po -18°C	1230	15
-18°C podruhé	950	16
-18°C na 25 minut	17	17
pokojová teplota po -18°C na 25 minut	1291	18
-18°C na 25 minut podruhé	802	19

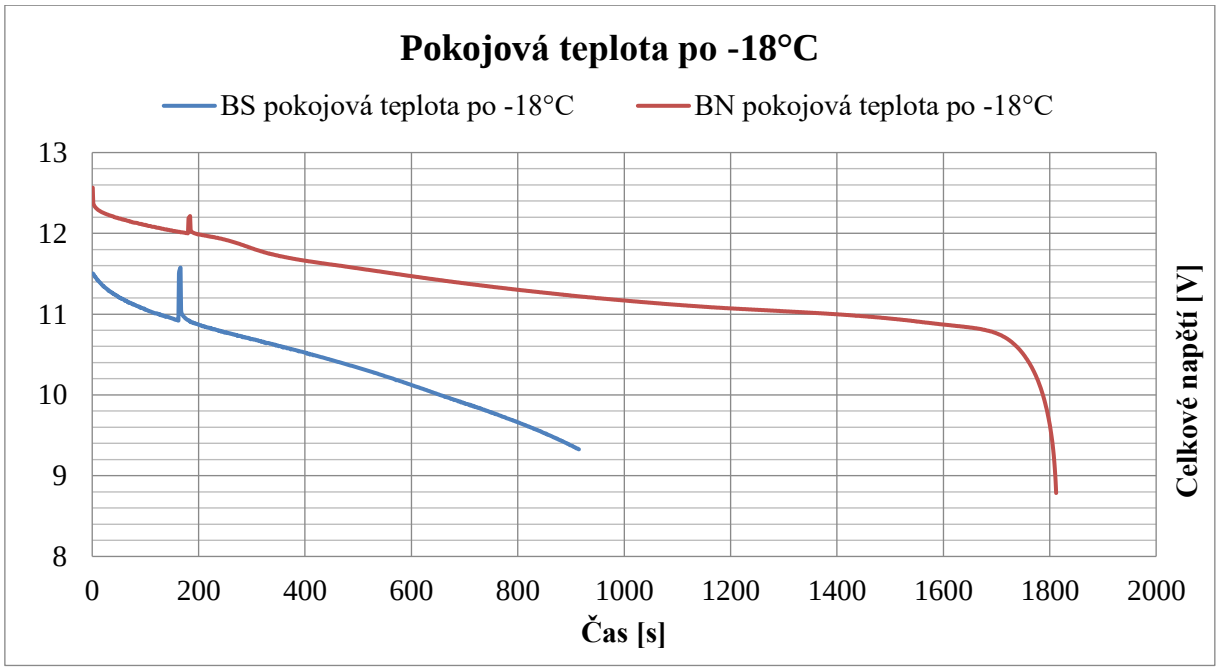

Stará baterie
-18°C na 25 minut podruhé
802
pokojová teplota po -18°C na 25 minut
1291
-18°C na 25 minut
17
-18°C podruhé
950
pokojová teplota po -18°C
1230
-18°C
963
pokojová teplota po -18°C na 30 minut
1309
-18°C na 30 minut
3
pokojová teplota po 60°C
1288
60°C
1530
pokojová teplota po 50°C
1378
50°C
1516
pokojová teplota po -18°C na 20 minut
1368
-18°C na 20 minut
974
pokojová teplota po -18°C na 10 minut
1420
-18°C na 10 minut
1134
pokojová teplota po 5°C
1556
5°C
1465
pokojová teplota
1599
0 200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800
Kapacita [mAh]

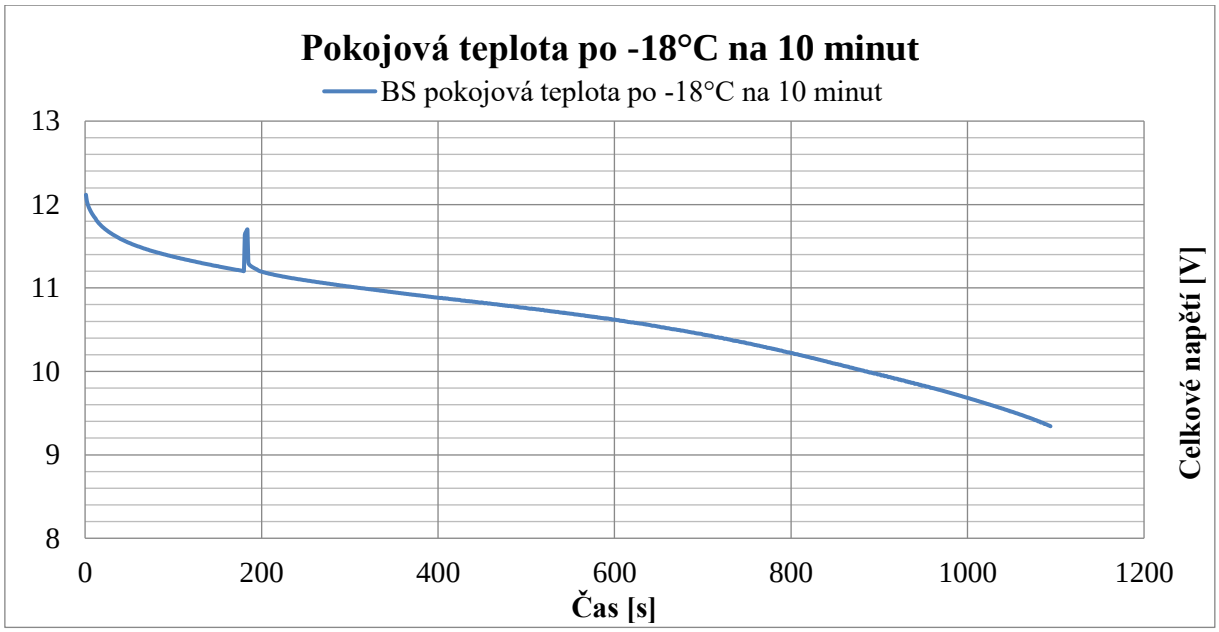
	kapacita [mAh]	
měření	Nová baterie	Pořadí měření
pokojová teplota	2236	1
pokojová teplota podruhé	2249	2
5°C	2172	3
pokojová teplota po 5°C	2230	4
50°C	2257	5
pokojová teplota po 50°C	2245	6
-18°C	2134	7
pokojová teplota po -18°C	2223	8
-18°C na 10 minut	2126	9
60°C	2250	10
pokojová teplota po 60°C	2230	11
-18°C na 20 minut	2103	12
pokojová teplota po -18°C na 20 minut	2222	13
-18°C na 25 minut	2111	14
pokojová teplota po -18°C na 25 minut	2223	15
-18°C na 25 minut podruhé	2106	16

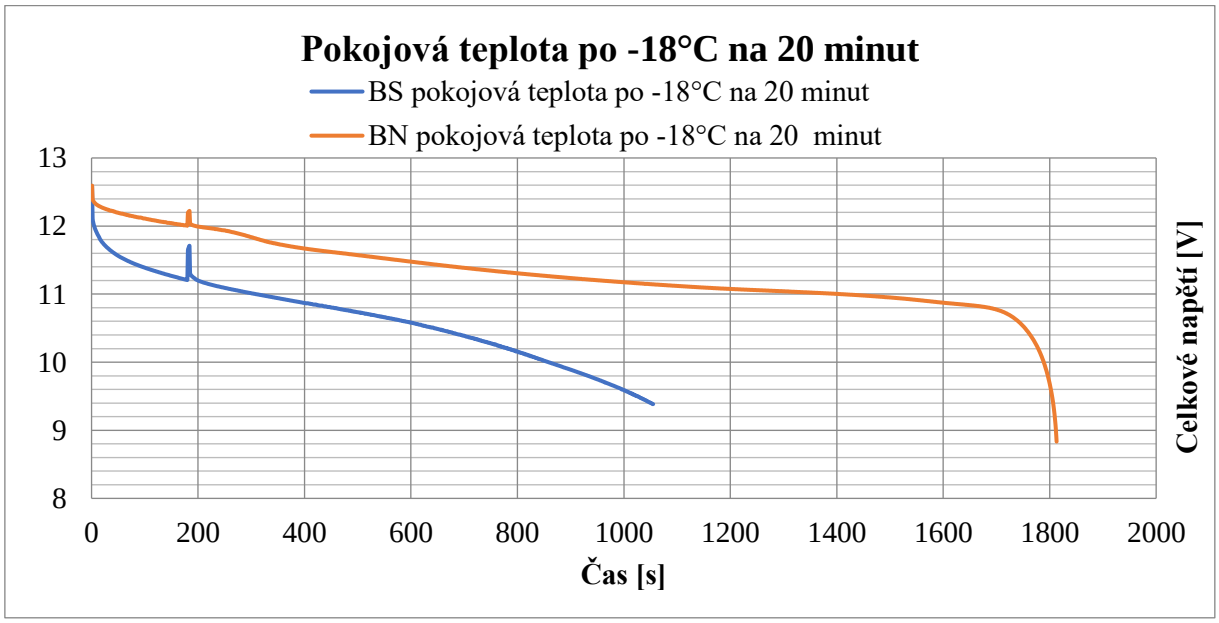


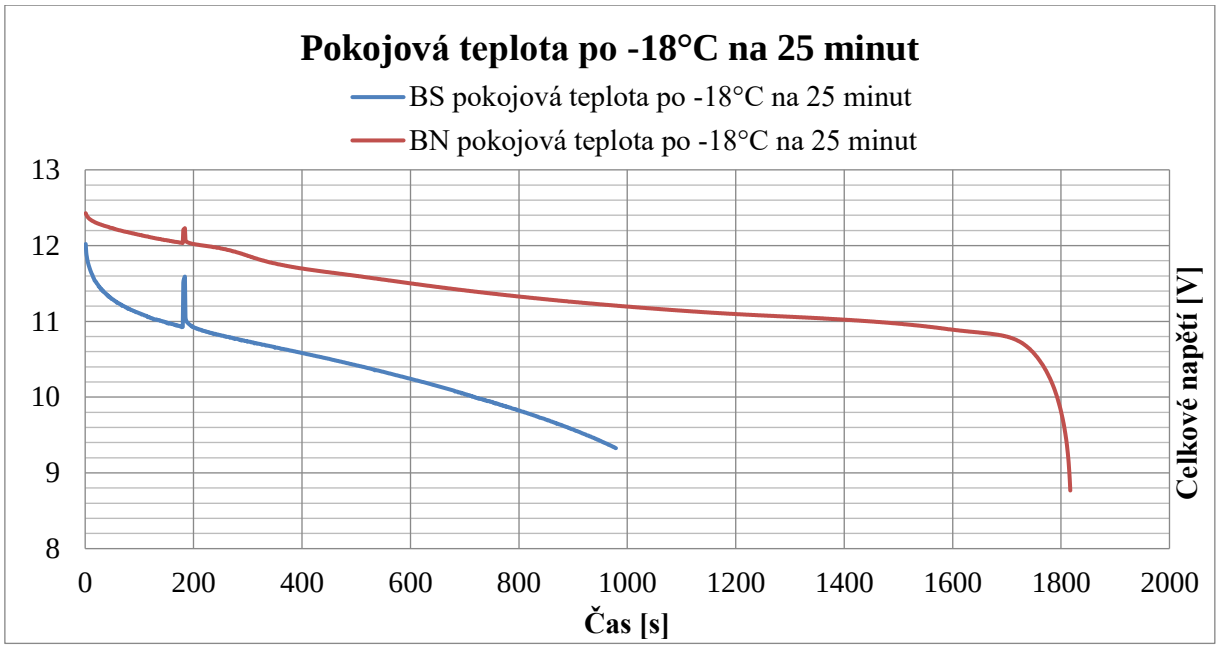
Příloha II

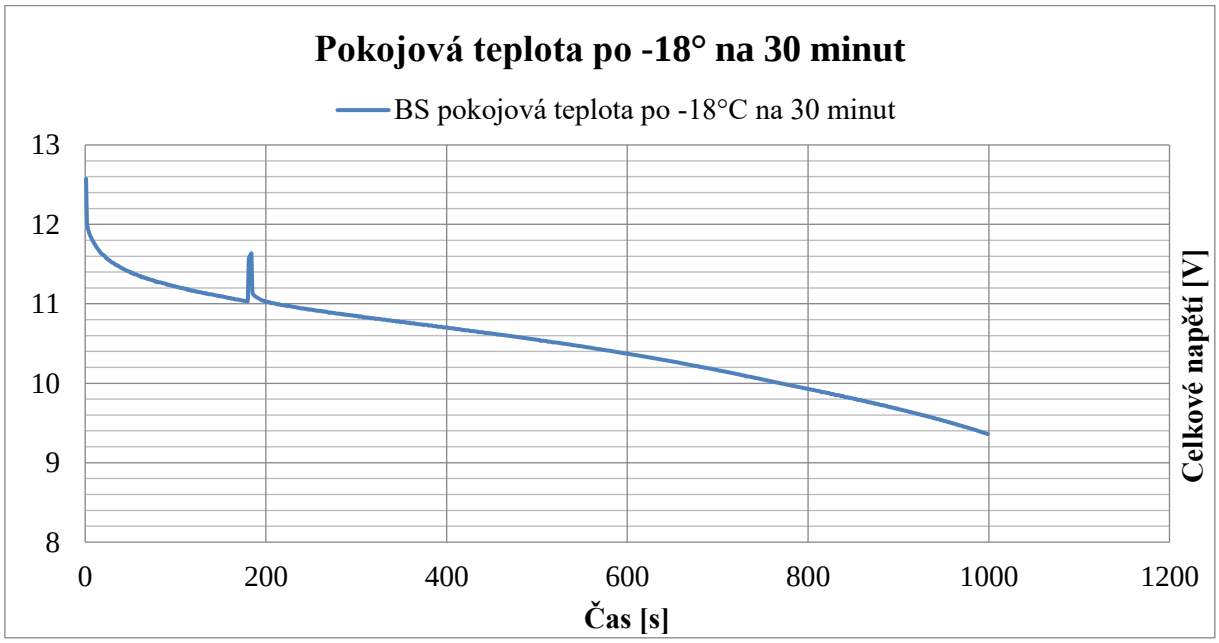

Pokojová teplota po 5°C
BS pokojová teplota po 5°C
BN pokojová teplota po 5°C
13
12
11
10
9
8
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
Čas [s]
Celkové napětí [V]

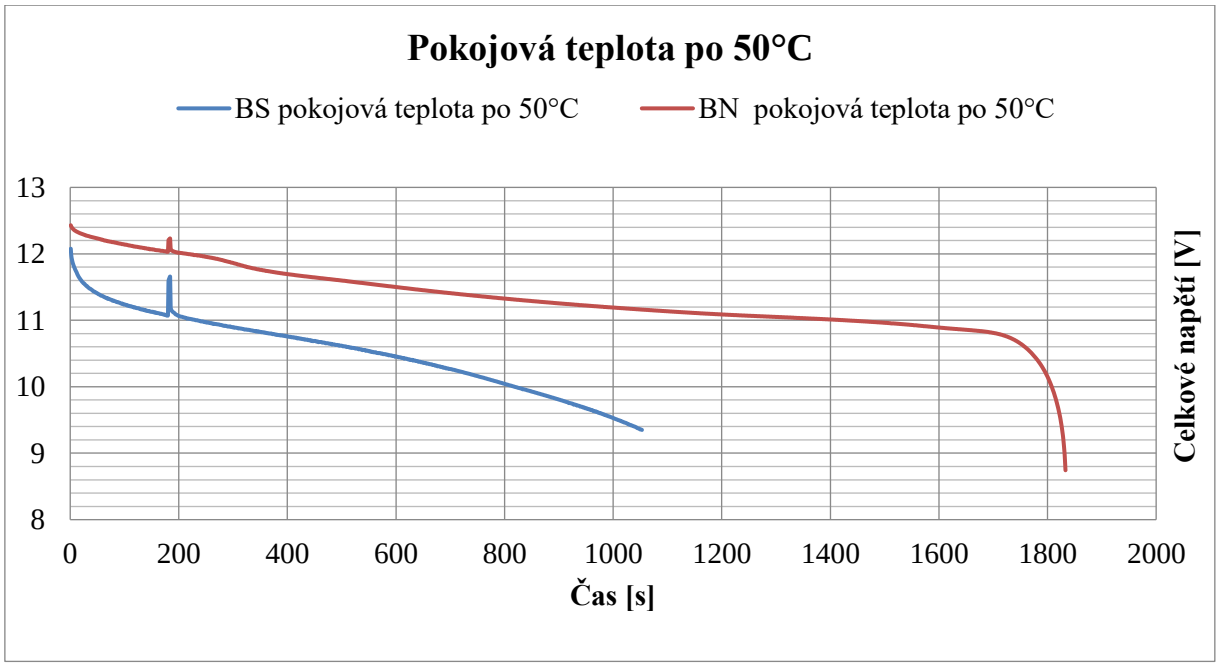

Pokojová teplota po -18°C
BS pokojová teplota po -18°C
BN pokojová teplota po -18°C
13
12
11
10
9
8
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
Čas [s]
Celkové napětí [V]

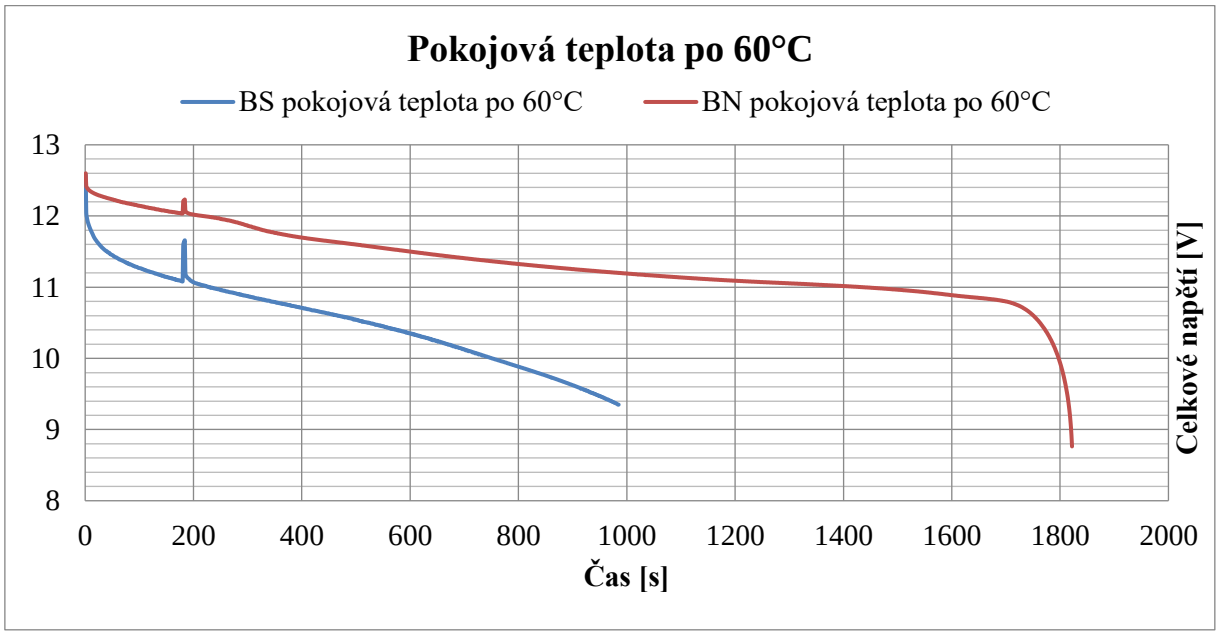

Pokojová teplota po -18°C na 10 minut
BS pokojová teplota po -18°C na 10 minut
13
12
11
10
9
8
0
200
400
600
800
1000
1200
Čas [s]
Celkové napětí [V]


Pokojová teplota po -18°C na 20 minut
BS pokojová teplota po -18°C na 20 minut
BN pokojová teplota po -18°C na 20 minut
13
12
11
10
9
8
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
Čas [s]
Celkové napětí [V]

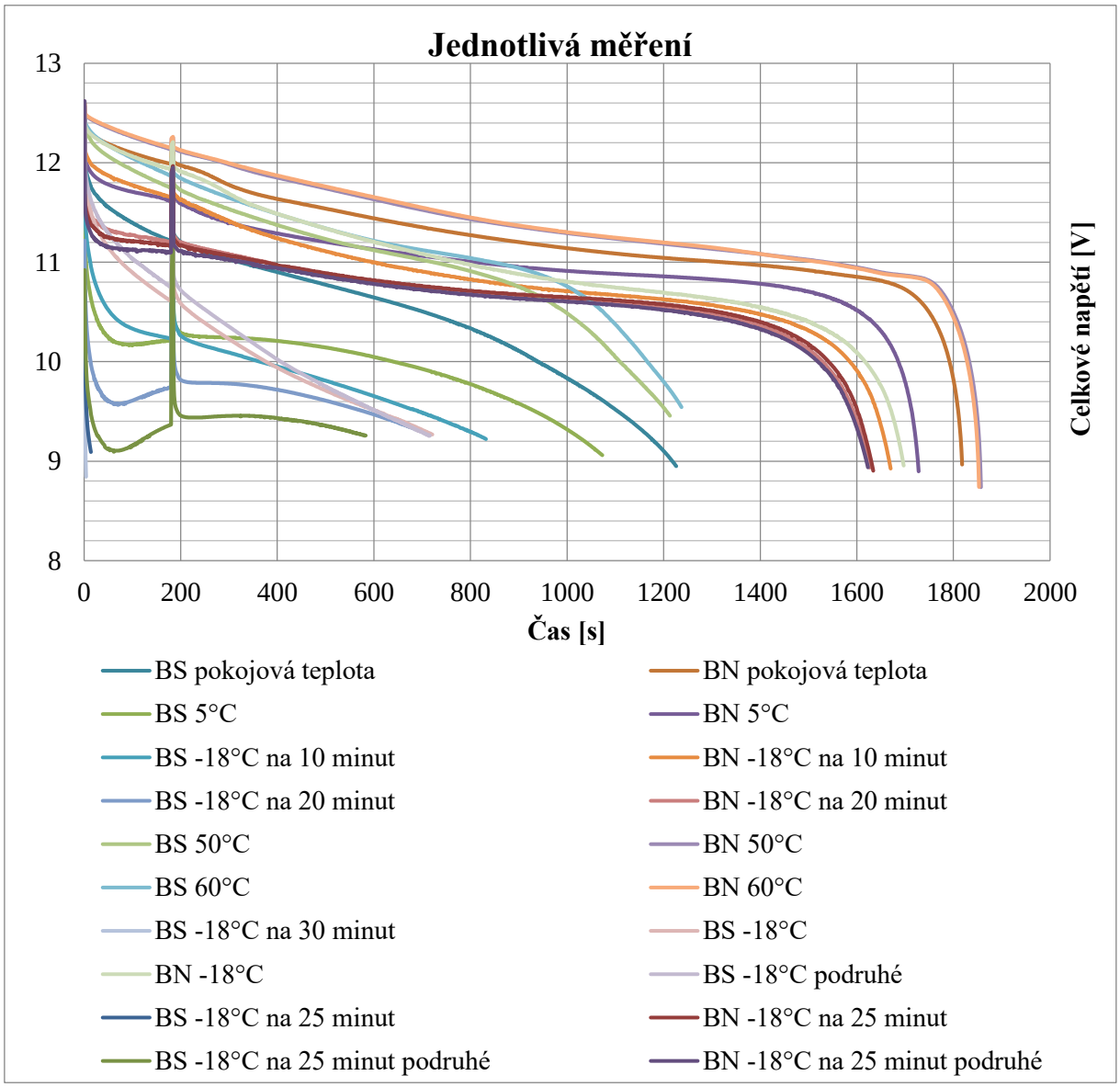

Pokojová teplota po -18°C na 25 minut
BS pokojová teplota po -18°C na 25 minut
BN pokojová teplota po -18°C na 25 minut
13
12
11
10
9
8
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
Čas [s]
Celkové napětí [V]

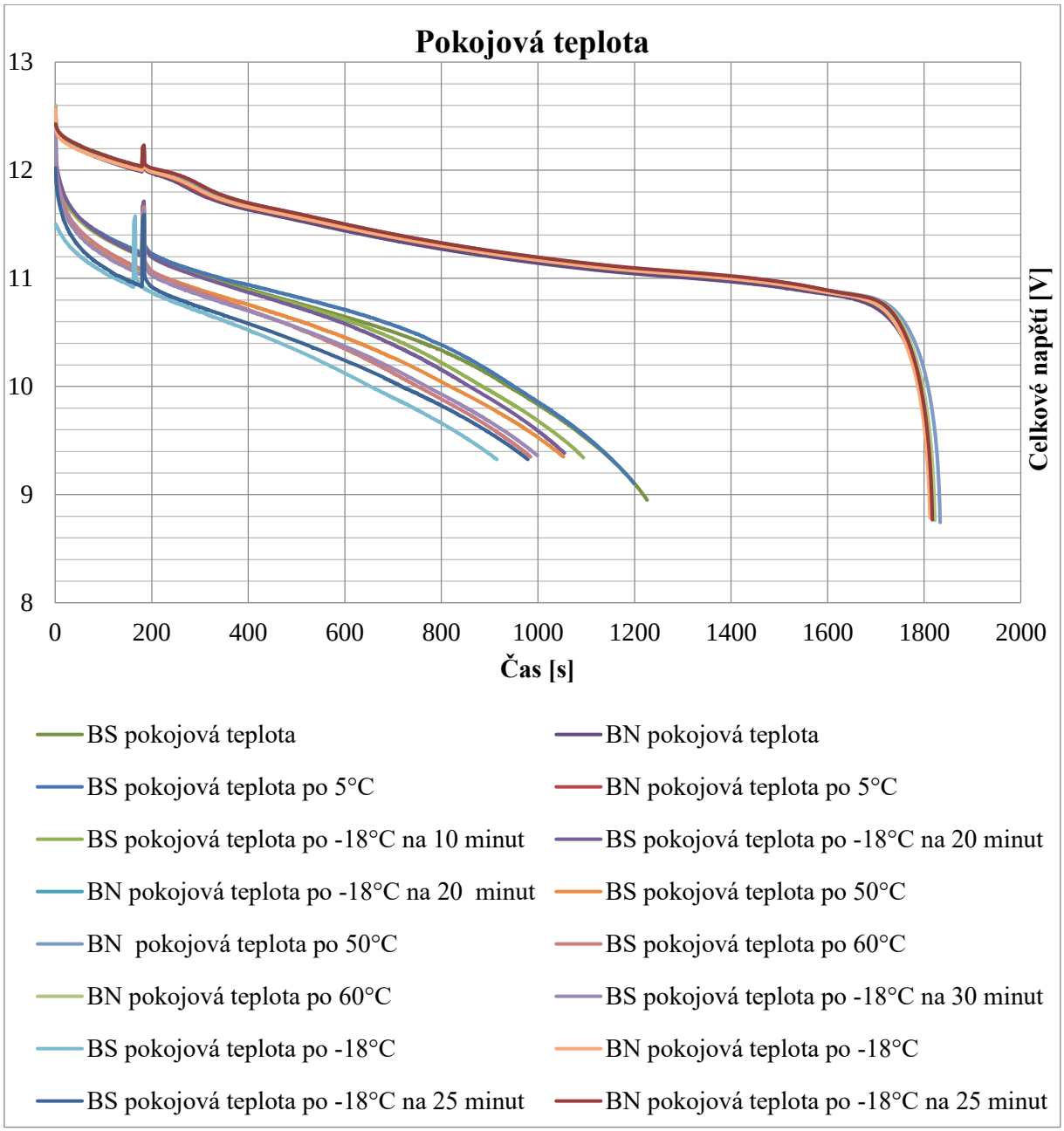

Pokojová teplota po -18° na 30 minut
BS pokojová teplota po -18°C na 30 minut
13
12
11
10
9
8
0
200
400
600
800
1000
1200
Čas [s]
Celkové napětí [V]

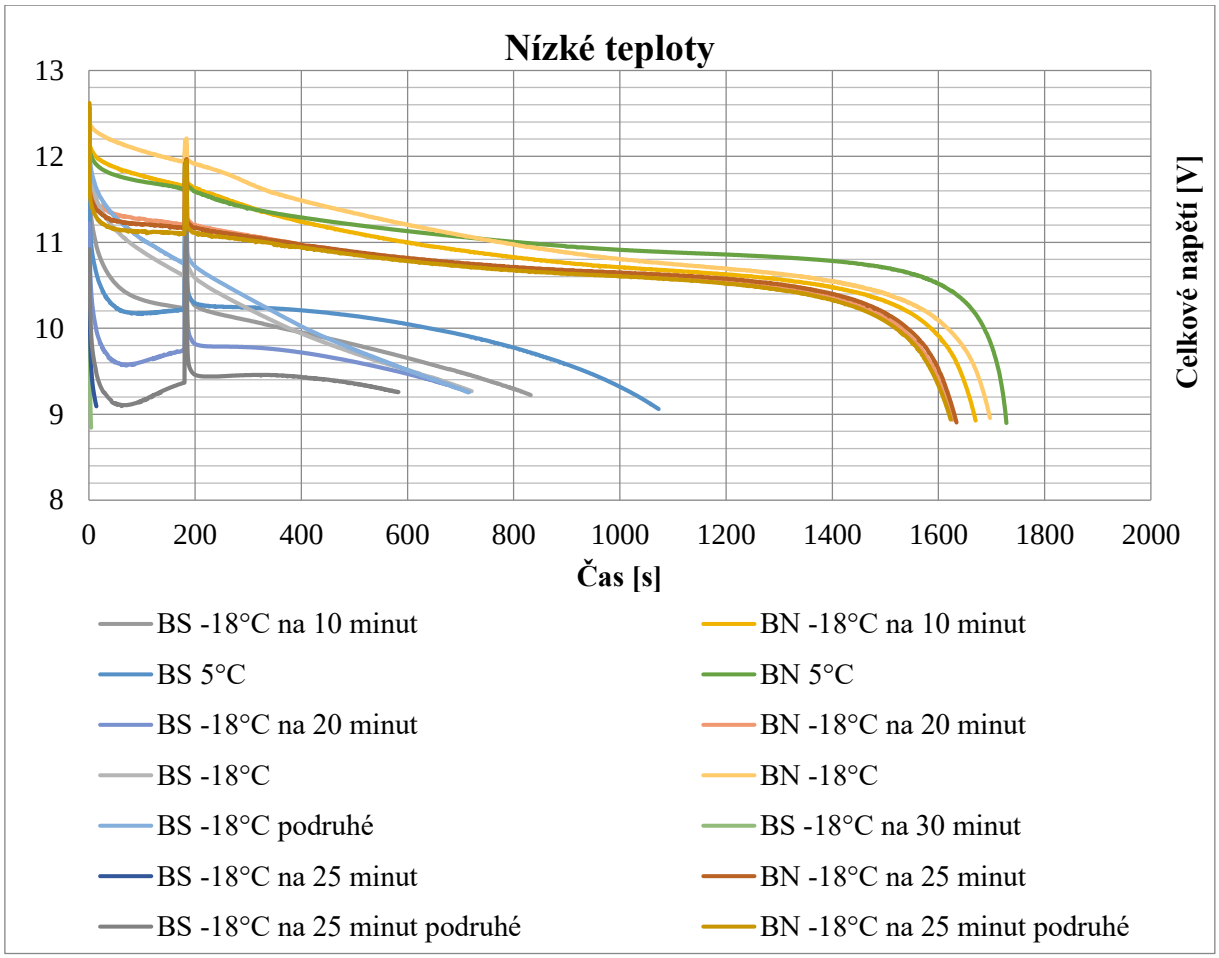

Pokojová teplota po 50°C
BS pokojová teplota po 50°C
BN pokojová teplota po 50°C
13
12
11
10
9
8
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
Čas [s]
Celkové napětí [V]

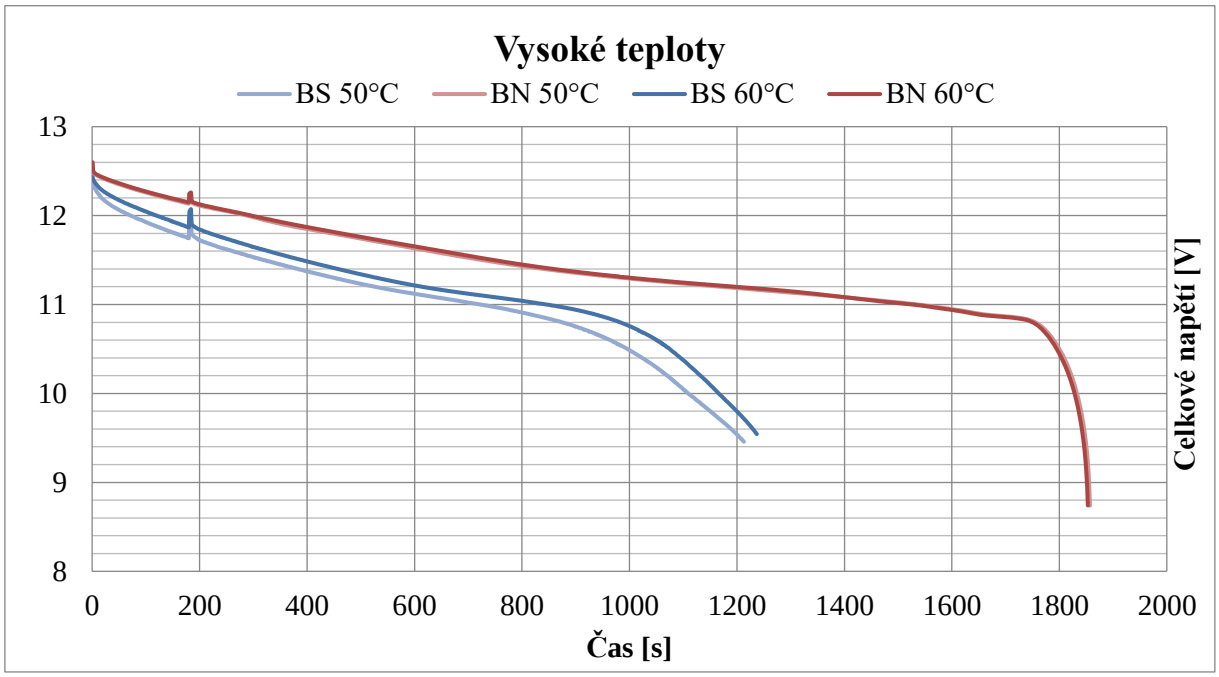

Pokojová teplota po 60°C
BS pokojová teplota po 60°C
BN pokojová teplota po 60°C
13
12
11
10
9
8
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
Čas [s]
Celkové napětí [V]

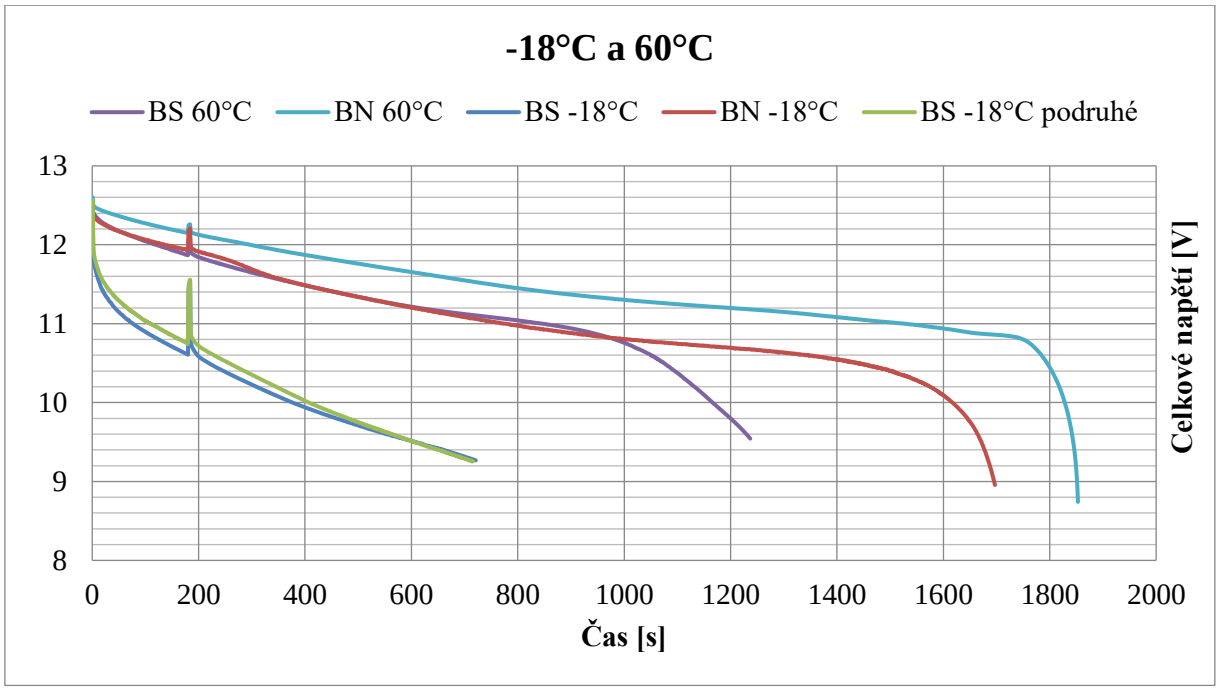
Příloha III


Jednotlivá měření
13
12
11
10
9
8
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
Čas [s]
Celkové napětí [V]
BS pokojová teplota
BN pokojová teplota
BS 5°C
BN 5°C
BS -18°C na 10 minut
BN -18°C na 10 minut
BS -18°C na 20 minut
BN -18°C na 20 minut
BS 50°C
BN 50°C
BS 60°C
BN 60°C
BS -18°C na 30 minut
BS -18°C
BN -18°C
BS -18°C podruhé
BS -18°C na 25 minut
BN -18°C na 25 minut
BS -18°C na 25 minut podruhé
BN -18°C na 25 minut podruhé


Pokojová teplota
13
12
11
10
9
8
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
Čas [s]
Celkové napětí [V]
BS pokojová teplota
BN pokojová teplota
BS pokojová teplota po 5°C
BN pokojová teplota po 5°C
BS pokojová teplota po -18°C na 10 minut
BS pokojová teplota po -18°C na 20 minut
BN pokojová teplota po -18°C na 20 minut
BS pokojová teplota po 50°C
BN pokojová teplota po 50°C
BS pokojová teplota po 60°C
BN pokojová teplota po 60°C
BS pokojová teplota po -18°C na 30 minut
BS pokojová teplota po -18°C
BN pokojová teplota po -18°C
BS pokojová teplota po -18°C na 25 minut
BN pokojová teplota po -18°C na 25 minut


Nízké teploty
13
12
11
10
9
8
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
Čas [s]
Celkové napětí [V]
BS -18°C na 10 minut
BN -18°C na 10 minut
BS 5°C
BN 5°C
BS -18°C na 20 minut
BN -18°C na 20 minut
BS -18°C
BN -18°C
BS -18°C podruhé
BS -18°C na 30 minut
BS -18°C na 25 minut
BN -18°C na 25 minut
BS -18°C na 25 minut podruhé
BN -18°C na 25 minut podruhé


Vysoké teploty
BS 50°C
BN 50°C
BS 60°C
BN 60°C
13
12
11
10
9
8
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
Čas [s]
Celkové napětí [V]


-18°C a 60°C
BS 60°C
BN 60°C
BS -18°C
BN -18°C
BS -18°C podruhé
13
12
11
10
9
8
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
Čas [s]
Celkové napětí [V]