

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra zadávající téma diplomové práce

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Identifikace vnitřního odporu lithiového článku v režimu nabíjení

Autor práce: **Martin Mañas**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Tomáš Komrska, Ph.D.**

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Martin MAŇAS**
Osobní číslo: **E19B0019P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Identifikace vnitřního odporu lithiového článku v režimu nabíjení**
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Sestavte laboratorní testovací stand pro nabíjení lithiového článku.
2. Proveďte sérii měření nabíjení lithiového článku pro různé kombinace velikosti nabíjecího proudu a teploty okolí (alespoň čtyři velikosti proudu v kombinaci s alespoň čtyřmi teplotami okolí).
3. Proveďte identifikaci vnitřního odporu článku v závislosti na teplotě a stavu nabití.
4. Stanovte účinnost nabíjení v závislosti na teplotě okolí a velikosti nabíjecího proudu.




Rozsah bakalářské práce: **30-40**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

C. Lin, C. Hsieh and K. Chen, „A Li-Ion Battery Charger With Smooth Control Circuit and Built-In Resistance Compensator for Achieving Stable and Fast Charging,“ in IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, vol. 57, no. 2, pp. 506-517, Feb. 2010, doi: 10.1109/TCSI.2009.2023830.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Komrška, Ph.D.**
Research and Innovation Centre for Electrical
Engineering

Datum zadání bakalářské práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2022**

Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan

Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

Abstrakt

Předmětem bakalářské práce je stanovení vnitřního odporu lithiového článku při nabíjení. Práce zkoumá změnu vnitřního odporu, zejména s ohledem na změnu teploty a velikost nabíjecího proudu. Popisuje lithiový článek, princip jeho fungování a možnosti stanovení vnitřního odporu při nabíjení. Jádrem práce je experimentální část zahrnující nabíjení pulzním i konstantním proudem při změnách teploty okolí, je zkoumán vliv teploty a nabíjecího proudu na velikost vnitřního odporu a účinnost nabíjení.

Klíčová slova

baterie, lithiový článek, nabíjení, napětí, proud, účinnost, vnitřní odpor, elektromobilita

Abstract

The subject of the bachelor thesis is to determine the internal resistance of a lithium battery during charging. The thesis examines the change in internal resistance, especially with regard to the change in temperature and amount of the charging current. It describes the lithium battery, the principle of its operation and the possibility of determining the internal resistance during charging. The core of the thesis is the experimental part including charging with pulse and constant current with changes in ambient temperature, the influence of temperature and charging current on the amount of internal resistance and charging efficiency are examined.

Key Words

battery, lithium cell, charging, voltage, current, efficiency, internal resistance, elctomobility

Poděkování

Děkuji panu Doc. Ing. Tomáši Komrskovi, Ph.D. za vedení své bakalářské práce. Chci poděkovat panu Ing. Luboši Streitovi, Ph.D. a Bc. Davidu Sonntagovi.

Obsah

Úvod.....	1
1 Trakční baterie na bázi lithia	2
1.1 Elektromobilita a nabíjení elektrických a hybridních vozidel	2
1.2 Druhy lithiových článků.....	2
1.2.2 Základní parametry článku	4
1.2.3 Nabíjení lithiového článku.....	5
1.3 Matematický model.....	5
1.3.1 Theveninův model	5
1.3.2 Stanovení vnitřního odporu	7
1.3.3 Účinnost nabíjení	8
2 Experimentální měření	9
2.1 Laboratorní prototyp	9
2.2 Měřený lithiový článek.....	10
2.3 Stanovení vnitřního odporu.....	11
2.4 Nabíjení při změně teploty okolí a velikosti nabíjecího proudu	14
2.5 Účinnost	23
Závěr	25
Zdroje.....	1
Seznam grafů, obrázků a tabulek	2
Seznam příloh	4
Příloha.....	I

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Veličina	Jednotka
R_0	Vnitřní odpor článku	[Ω]
Q	Náboj	[C]
T	Teplota článku	[$^{\circ}\text{C}$]
U	Napětí	[V]
I	Proud	[A]
t	Čas	[h]
η	Účinnost	[-]
P_Z	Ztrátový výkon	[W]
P_{DOD}	Dodávaný výkon	[W]
E_Z	Ztrátová energie	[Wh]
E_{DOD}	Dodaná energie	[Wh]
E_{BAT}	Energie v baterii	[Wh]
C	Kapacita	[F]
Q_{SI}	Elektrický náboj	[J]
$Q_{A/h}$	Elektrický náboj v ampérhodinách	[Ah]
U_{OCV}	Napětí naprázdno	[V]
U_{in}	Napětí napájecího zdroje	[V]

Úvod

Cílem této práce je stanovit velikost vnitřního odporu lithiového článku v režimu nabíjení, analyzovat jeho vlastnosti v tomto režimu a dopady na nabíjecí proces, zejména na účinnost.

Cílovou aplikací je především elektromobilita, kde rychlost a účinnost nabíjení trakčních baterií bezpochyby patří mezi aktuální, velmi diskutovaná témata. Ačkoli kompletní trakční baterie elektrických vozidel je složitý systém obsahující desítky až stovky článků a účinnost nabíjení závisí mimo jiné také na způsobu a intenzitě balancování, které je prováděno řídicím systémem baterie (battery management system – BMS), klíčovým faktorem jsou vlastnosti každého jednotlivého článku. Práce se zaměřuje právě na samotný lithiový článek.

Lithiový článek je elektrochemický systém, kde především teplota má zásadní vliv na vnitřní procesy. Současně elektrická a hybridní vozidla představují aplikační oblast, kde je celý systém elektrického pohonu včetně baterie vystaven změnám teploty okolí, což má dopad i do procesu nabíjení. Z hlediska uživatele elektrických a hybridních vozidel je důležitá zejména rychlost nabíjení, která je často srovnávána s dobou potřebnou pro doplnění paliva u vozidel se spalovacími motory, ale také účinnost nabíjení, která má přímý dopad do nákladů na provoz vozidla. Oba tyto parametry přímo ovlivňuje velikost vnitřního odporu baterie.

První část práce se tedy zaměřuje právě na stanovení vnitřního odporu, jakožto klíčového parametru lithiového článku. Práce zkoumá změny odporu v závislosti na teplotě a stavu nabití baterie. Tyto závislosti jsou analyzovány a aplikovány při následném stanovení ztrát a účinnosti nabíjení. Pro identifikaci vnitřního odporu je zapotřebí volba vhodné metody měření a výběr vhodného modelu článku. Model článku aplikovaný v této práci je založený na ideálním zdroji napětí spojeným v sérii s vnitřním odporem a vychází z rozšířeného Théveninova modelu bateriového článku bez uvažování RC členů modelující časové konstanty při dynamických dějích, které nejsou primárně relevantní pro stanovení účinnosti nabíjení.

Závislosti vnitřního odporu a účinnosti nabíjení na teplotě jsou zkoumány v rozmezí 0 – 35 °C. Z důvodu zpomalení chemických procesů při nižších teplotách je očekáván nárůst vnitřního odporu při poklesu teploty. To má zásadní vliv na účinnost nabíjení, která klesá především v zimním období. Dále je zkoumán vliv velikosti nabíjecího proudu. Jelikož Jouleovy ztráty jsou úměrné kvadrátu proudu, je očekávána výrazně nižší účinnost nabíjení pro vyšší nabíjecí proudy.

1 Trakční baterie na bázi lithia

1.1 Elektromobilita a nabíjení elektrických a hybridních vozidel

Ať již se jedná o plně elektrický vůz (BEV) či hybrid (PHEV), nabíjení trakční baterie probíhá připojením vozidla k vnějšímu zdroji elektrické energie, případně rekuperací při dynamickém brždění. Tento princip je ale sám o sobě definován a zároveň limitován několika veličinami, a to kapacitou neboli velikostí baterie, rychlostí nabíjení, maximálním výkonem či napětím. Elektrická vozidla jsou při použití vnějšího zdroje nabíjena dvěma způsoby: nabíjením střídavým a stejnosměrným proudem.

Střídavé nabíjení je rozděleno na jednofázové a třífázové a pro toto nabíjení je nabíječka s usměrňovačem umístěna ve voze.

Stejnosemnné nabíječky, tj. rychlonabíjecí stanice, jsou dražší a složitější na výstavbu, a dobíjecí místo musí mít dostatečně dimenzovanou infrastrukturu pro odběr požadovaného výkonu. Výkon rychlodobíjecích stanic se v současné době pohybuje v desítkách až stovkách kW.

Tabulka 1: Nabíjecí doby pro různé druhy nabíjecích stanic [16]

Nabíjecí čas pro 100 km dojezdu	Dodávka energie	Výkon	Napětí	Max. proud
6-8 hodin	jedna fáze	3,7kW	230 V AC	16 A
3-4 hodin	jedna fáze	7,4kW	230 V AC	32 A
2-3 hodin	tři fáze	10kW	400 V AC	16 A
1-2 hodin	tři fáze	22kW	400 V AC	32 A
20-30 minut	tři fáze	43kW	400 V AC	63 A
20-30 minut	DC napětí	50kW	400– 500 V DC	100–125 A
10 minut	DC napětí	120kW	300–500 V DC	300-350 A

1.2 Druhy lithiových článků

Lithiové baterie jsou v dnešní době absolutně nepoužívanější technologií.

Lithiové baterie se dělí podle vnitřního chemického složení na šest hlavních druhů. Baterie na bázi kobaltu známá také jakožto lithium-iontové kobaltnaté jsou vyrobené z uhličitanu lithného a kobaltu. Katoda je z oxidu kobaltu a anoda je vytvořena

z vrstev grafitu. Velkou výhodou toto typu baterie je že mají velkou energetickou hustotu, a proto se často používají v mobilních telefonech, noteboocích a ve velkém množství i v elektrických automobilech, kromě velké kapacity mají ale nevýhody, jedna z nich je relativně krátká životnost, nízká tepelná stabilita a omezený výkonový zatížení.

Lithium manganové baterie jsou jedny z prvních lithium iontových baterií, které se objevily na trhu. Baterie se vyznačují velkou tepelnou stabilitou a jsou bezpečnější na použití. Díky větší bezpečnosti se používají ve zdravotnických zařízeních a u elektrických pohonů, kde by při nárazu mohlo dojít k poškození baterií a jejich vznícení.

Lithium-železo fosfátové. Hlavním parametrem je nízký vnitřní odpor, vyšší bezpečnost a teplotní stabilita při provozu. Dalšími výhodami jsou dlouhá životnost a odolnost. Baterie lze skladovat plně nabitě, aniž by to ovlivnilo délku jejich životnosti. Velkou nevýhodou toho to typu je menší napětí než u ostatních typů lithiových článků.

Dalším typem jsou baterie složené na bázi LiNiMnCoO_2 . Tento typ vznikl hlavně kvůli vysoké ceně kobaltu, jehož obsah je zde omezen na 20 % a zbytek je nahrazen 60 % niklu a 20 % manganu. Hlavní výhodou je tak cena, která je výrazně menší než při použití článku založeném pouze na kobaltu.

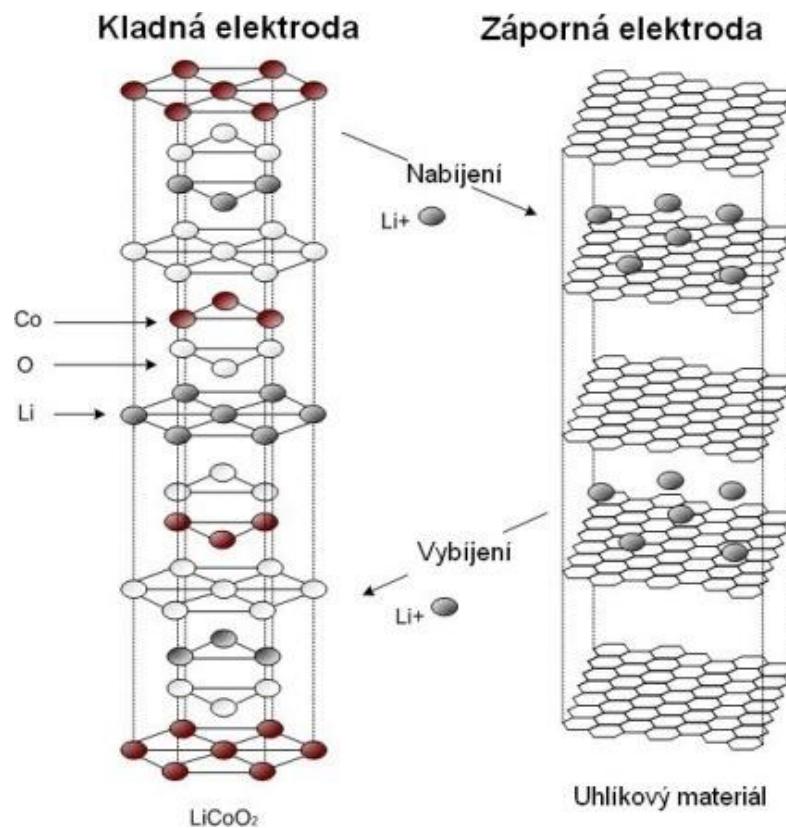
Předposledním typem je takzvaná NCA baterie, která vykazuje dobrou životnost a velkou kapacitu, používají se v pohonných jednotkách a uložistích elektrické energie.

Posledním typem jsou lithium titanové baterie, které umožňují rychlé nabíjení. Tato výhoda je kompenzována nižším napětím a nižší hustotou energie oproti jiným lithiovým technologiím [1].

Lithiový článek je tvořen kladnou elektrodou, zápornou elektrodou a separátorem. Kladnou elektrodu je vyrobena z LiXO_2 , kde X značí určitý kov, záleží na technologii, např. CO, Ti, Mn apod. Zápornou elektrodu tvoří grafit. Elektrody jsou odděleny separátorem, který zabraňuje vnitřnímu zkratu a který je napuštěn elektrolytem, aby byl možný průchod kladných iontů lithia.

Nabíjení probíhá tak, že při přiložení elektrického napětí se z katody LiXO_2 uvolňují kladně nabitě ionty lithia, které procházení přes separátor směrem k anodě. Materiál anody je grafit, který tvoří vrstvy a při nabíjení dochází k tzv. vmezeřování neboli interkalaci, tj. ukládání iontů lithia do materiálu anody, mezi jednotlivé vrstvy zobrazené na obrázku 1 záporné elektrody.

Stav nabití je však pro článek nestabilním stavem, stabilní stav je naopak stav vybitý. Při vybíjení dochází k opačnému procesu. Kdy ionty putují přes separátor zpět směrem ke katodě [3].



Obr. 1: Atomická struktura Lithium iontové baterie

1.2.2 Základní parametry článku

Mezi hlavní parametry patří kapacita článku. Ačkoli kapacita je standardní elektrickou veličinou udávanou se ve faradech, v oblasti baterií a bateriových článků se pojem kapacita ustálil pro vyjádření elektrického náboje, který je článek schopný pojmout. Navíc se v případě baterií tato kapacita vyjadřující náboj neudává v coulombech (C), což je jednotka definovaná v soustavě SI, nýbrž se ustálilo označení kapacity v Ah, případně v mAh.

Při nabíjení je obvykle nutné stanovit velikost dodaného náboje, což lze pomocí integrace měřeného nabíjecího proudu:

$$Q = \int i dt. \quad (1.1)$$

Je však nezbytné zajistit čidlo proudu s dostačující přesností.

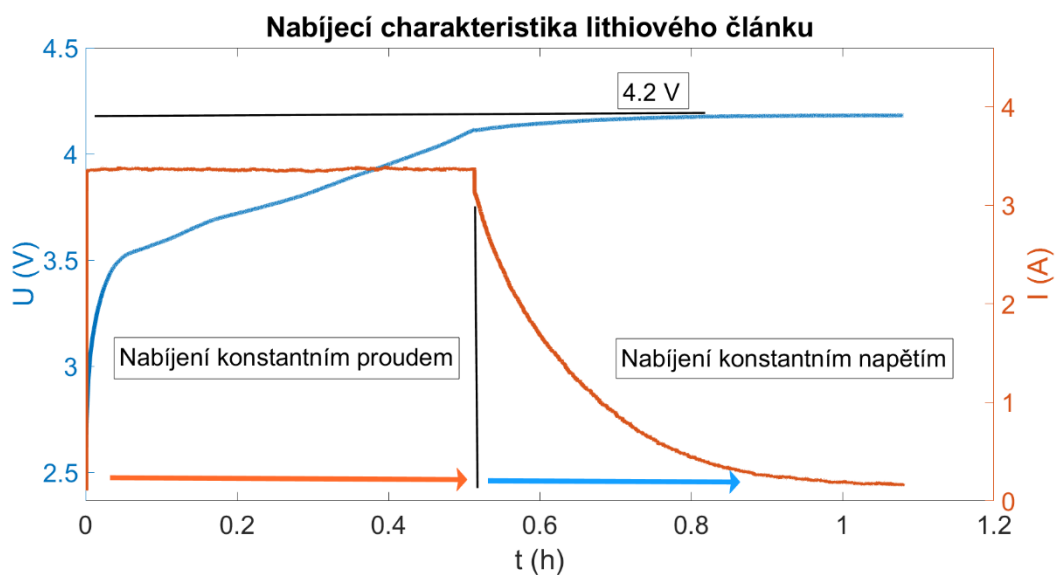
Důležitým parametrem je napětí. Obvyklý rozsah napětí lithiových článků je 2,5 až 4,2 V, případně 4,15 až 4,35 V, záleží na konkrétní technologii. Důležité je, tyto limity nesmí být porušeny; v případě minimálního napětí by došlo ke škodlivému úplnému vybití článku způsobující jeho degradaci, při porušení maximálního napětí pak vedle izolačního namáhání hrozí vznícení článku.

Napěťová charakteristika článku naprázdno (angl. open circuit voltage - OCV) je získána za podmínek ustáleného stavu článku, tj. chemické rovnováhy uvnitř článku. OCV lze změřit pomocí pulzního vybíjení nebo nabíjení kdy je nutné zajistit dostatečně velké časové odstupy mezi pulzy na to, aby byl článek co nejlíže chemické rovnováze.

Velikosti vybíjecích proudů současných článků se pohybují v desítkách ampérů. Nabíjecí proudy naopak nabývají podstatně nižších hodnot, řádově jednotky ampérů. Lithiový článek použitý pro tuto práci má vybíjecí proud 30 A, což je 13 krát více než jeho nabíjecí proud. Jeho vnitřní odpor se pohybuje obvykle kolem 15 mΩ.

1.2.3 Nabíjení lithiového článku

Nabíjecí cyklus lithiového článku se skládá ze dvou část, první část je tvořena nabíjením pomocí konstantního proudu a tato část setrvává přibližně do stavu nabití kolem 90 %, kde se napětí dostává na hodnotu 4,2 V. Po dosažení 4,2 V se nabíjení dostává do druhé části kdy je konstantní napětí a postupně se snižuje proud. Celý nabíjecí cyklus je možno vidět na Obr.2.



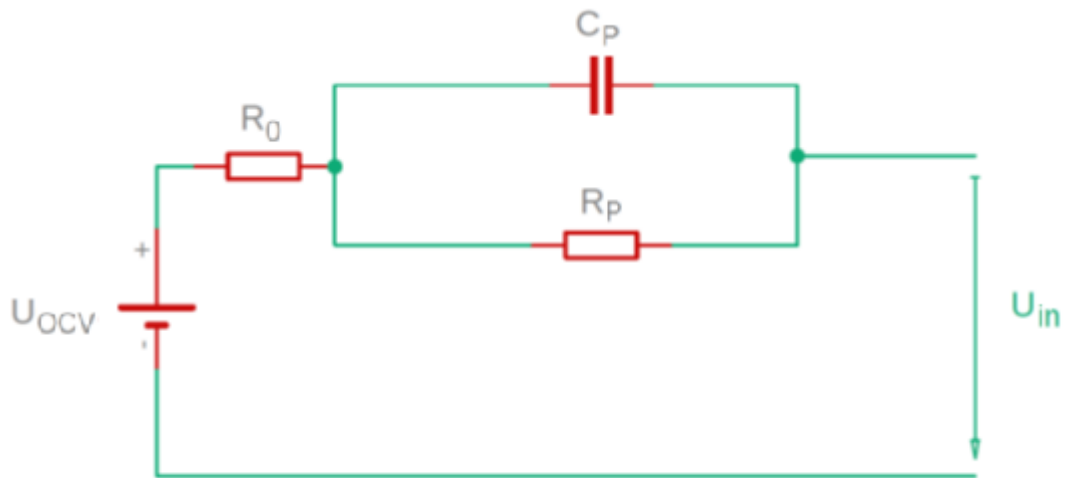
Obr. 2: Nabíjecí charakteristika [16]

1.3 Matematický model

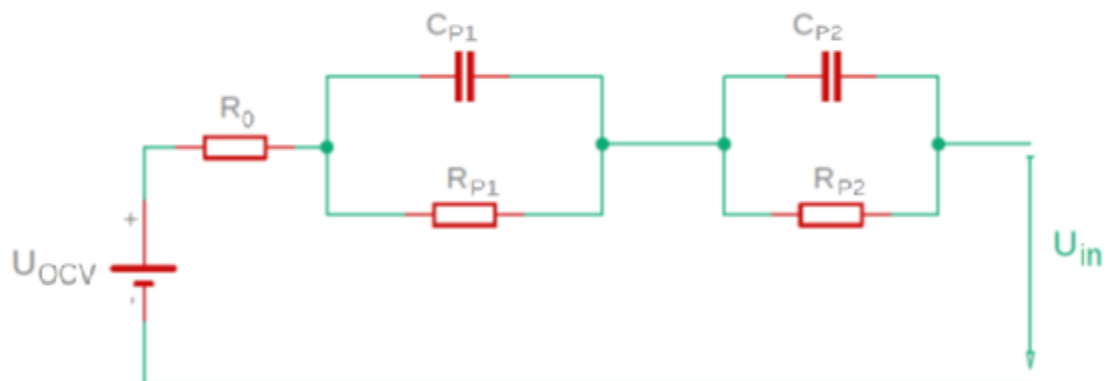
1.3.1 Theveninův model

Theveninův model je nepoužívanější matematický model, který slouží k modelování elektrických veličin a chování baterie. Používají se modely prvního, druhého až n- tého řádu. Theveninův model se skládá z ideálního zdroje napětí U_{ocv} , vnitřního odporu R_0 zapojeného

do série a do série zapojeného jednoho nebo více paralelních RC obvodů, modelujících časové konstanty dynamických dějů.



Obr. 3: Theveninův model prvního řádu



Obr. 4: Theveninův model druhého řádu

Všechny parametry Théveninova modelu jsou funkcí stavu nabití, teploty, stárnutí a pro jejich identifikaci lze využít měření proudu a napětí na baterii při zatížení pomocí proudových pulzů za různých podmínek. Časová délka a časové rozestupy pulzního zatížení se stanovují s ohledem na požadovanou četnost identifikovaných bodů v rámci nabíjecí či vybíjecí charakteristiky. Doba odpojení zátěže nebo zdroje nabíjení musí být dostatečně dlouhá, aby se stihly ustálit elektrochemické jevy. Přibližně je postačující 30 minutový interval.

Přesnost modelu lze zvýšit přidáním více paralelních RC obvodů, typicky se používají dvě nebo tři RC články. Přidáním sice navýšíme přesnost, ale zároveň zvýšíme složitost modelu. V praxi se používají obvykle jeden či dva RC články.

1.3.2 Stanovení vnitřního odporu

Vnitřní odpor R_0 je odpor, který reprezentuje vlastnosti elektrolytu a elektrody a separátoru a slouží jako model komplikovaných chemických procesů zohledňující především úbytek napětí při zatížení a ztráty při nabíjení či vybíjení. RC články zase modelují časové konstanty přechodových dějů, kterých je v případě bateriových článků více, RC větve popisují rychlou a pomalou dynamiku, první větve popisuje povrchový efekt a reakční kinematika na elektrodách, druhá větve představuje pomalou dynamiku článku a nacházejí se zde dlouhé až hodinové procesy, které představují procesy v organickém elektrolytu a aktivním materiálu [14].

Pro identifikaci vnitřního odporu byl využit zjednodušený Theveninův model, jednou z hlavních úprav byla eliminace RC paralelních větví.

Pro zjednodušený Theveninův model lze uvést následující opodstatnění: Pokud je článek zapojen naprázdno, obvodem naprázdno neprotéká žádný proud, a to znamená že kapacitor v RC článku bude vlivem paralelního odporu vybitý (viz. obr. 3). Stav baterie naprázdno je dosaženo, pokud je ponechán článek delší čas bez připojeného zdroje napájení, přibližně 30 minut a více.

Po připojení zdroje nabíjení dojde ke skokovému nárůstu napětí na článku o napětí $R_0 I$. Protože kapacitor RC článku je zcela vybitý, lze v prvním okamžiku předpokládat, že celá část proudu protéká přes tento vybitý kapacitor a na paralelně připojeném odporu R_p není žádný úbytek napětí (viz obr. 3). Změna napětí oproti napětí naprázdno tedy odpovídá pouze úbytku $R_0 I$.

Díky této úvaze lze počítat vnitřní odpor R_0 bez uvažování RC paralelní větve, která bude mít nulové napětí a R_0 se bude po úpravě rovnat

$$R_0 = \frac{u_{in} - u_{OCV}}{i}, \quad (1.2)$$

kde u_{in} je napětí přiložené napájecím zdrojem, který dodává proudové pulzy do článku, u_{OCV} je napětí článku naprázdno před připojením článku ke zdroji. Hodnota R_0 je značně ovlivněna teplotou, stářím baterie.

1.3.3 Účinnost nabíjení

Vnitřní odpor R_0 má klíčový vliv na účinnost nabíjení, kterou lze stanovit porovnáním dodané energie a energie uložené v článku:

$$\eta = \frac{E_{BAT}}{E_{DOD}}. \quad (1.3)$$

Účinnost je pak dána podílem energie baterie a energie dodané zdrojem napětí. Pro výpočet účinnosti nabíjení je tedy zapotřebí určit energii uloženou v baterii. Jedním ze způsobů je výpočet uložené energie pomocí rozdílu energie dodané a energie ztracené neboli energie vyzařené do okolí v podobě tepla.

Energii dodanou lze určit pomocí integrálu dodaného výkonu podle času jako

$$E_{DOD} = \int u i dt. \quad (1.4)$$

Jouleovy ztráty, které jsou přímo úměrné kvadrátu proudu a velikosti odporu lze vypočítat jako

$$E_Z = \int i^2 R_0 dt. \quad (1.6)$$

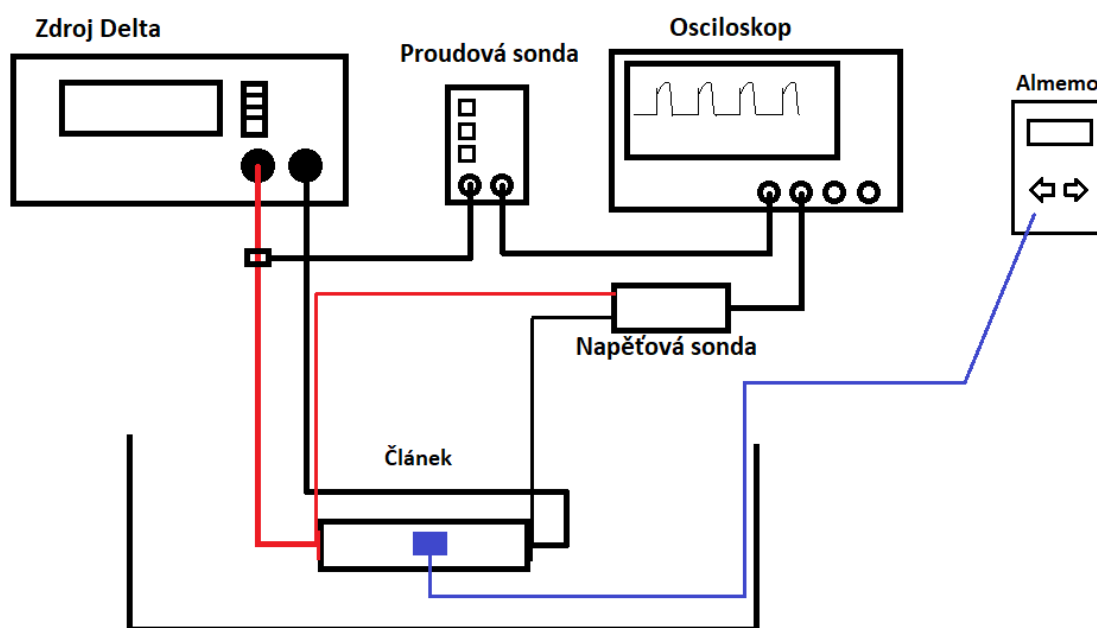
Energii uloženou v baterii lze také stanovit měřením odebrané energie při vybíjení. To je však ovlivněno vybíjecími ztrátami. Druhým způsobem je stanovení uložené energie ze znalosti vnitřního odporu a výpočtem Jouleových ztrát, která je vypočtena jako

$$E_{BAT} = E_d - E_Z. \quad (1.5)$$

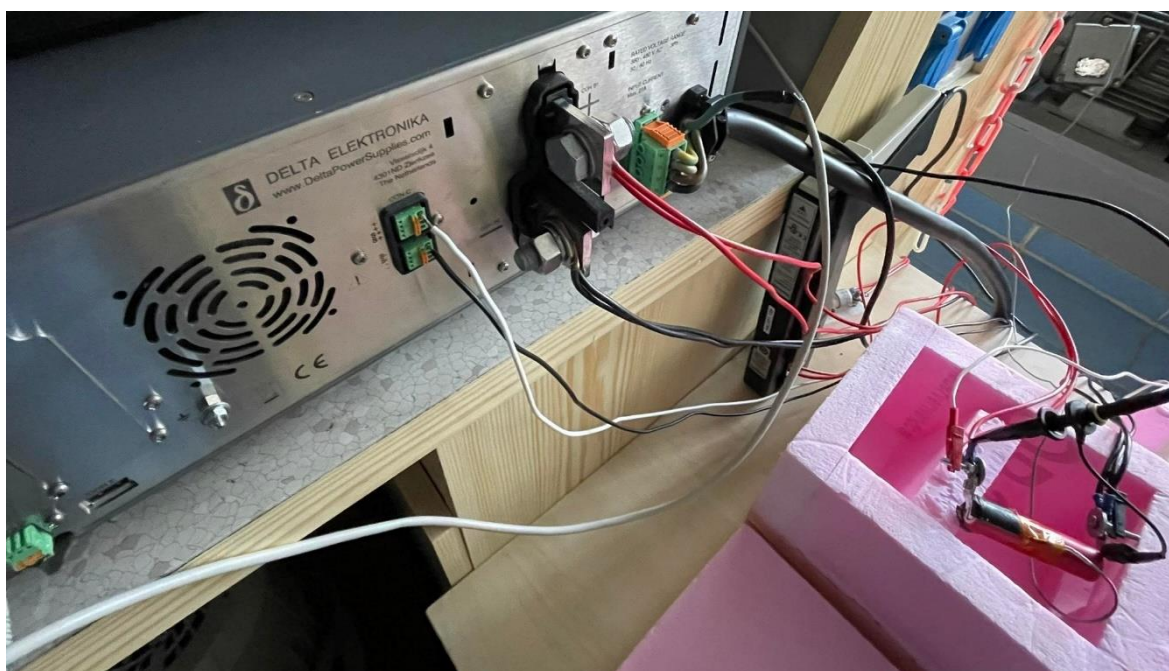
2 Experimentální měření

2.1 Laboratorní prototyp

Obr. 5 ukazuje schéma zapojení laboratorního prototypu sestaveného pro měření nabíjení lithiových článků, vlastní prototyp je vidět na obr. 6.



Obr. 5: Uspořádání a schéma zapojení laboratorního prototypu pro měření lithiových článků



Obr. 6: Sestavený laboratorní prototyp pro měření lithiových článků

Měřený článek byl napájen programovatelným zdrojem Delta SM70-CP-450 s maximálním napětím 70 V. Baterie byla připojena k osciloskopu Tektronik MSO4054 přes proudovou sondu TCP404XL s adaptérem TCPA 500A_{DC} a diferenční sondu P5205 pro měření napětí. Na článku bylo dále přilepeno teplotní čidlo Pt100-2 zapojené do měřicí stanice ALMEMO AHLBORN 2590, která zaznamenává teplotu. Dále byly do zdroje Delta připojeny sence kontakty, které byly připojeny co nejbližší k měřenému článku a sloužily ke kompenzaci úbytku napětí na kabelech zdroje. Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 5.

Tabulka 2: Měřicí přístroje

Delta	SM70-CP-450	
Osciloskop	Tektronik MSO4054	500441
Almemo	2590 AHLBORN	2071989
Almemo čidlo	ZA 9030-FS2, Pt100-2	
Proudová sonda	TCP404XL	TCPA 500A DC
Proudová adaptér	Tektronik TCPA 400	
Diferenční sonda	P5205	NO. B031500
Adaptér k diferenční sondě	Tektronik, TPA-BNC	

Chladicí box byl zkonstruován z tvrzeného polystyrenu, který byl vytvarován do podoby kvádrové krabice s otevíratelným víkem a otvorem z jedné strany, kam byl posléze umístěn Peltierův článek s chladičem. Peltierův článek byl napájen zdrojem stejnosměrného napětí o hodnotě 12 V a výkonu 350 W, který byl dostatečně účinný, aby snížil teplotu na polovinu pokojové teploty. Pro další snížení teploty na 0 °C byla baterie zabalena do plastového sáčku a vložena do kostek ledu.

2.2 Měřený lithiový článek

Jedná se o velmi rozšířený, cylindrický lithiový článek s technologií LiCoO₂ o maximálním napětí 4,2 V a maximálním vybíjecím proudem 30 A. Kompletní přehled parametrů článku uvádí tabulka 3.

Tabulka 3: Parametry měřeného článku [15]

Výrobce	SANOY
Model	NCR20700A
Velikost	20700
Kapacita	3300 mAh
Maximální vybíjecí proud	30 A
Nabíjecí proud	2.2 A
Nominální napětí	3.6 V
Maximální napětí	4.2 V
Minimální napětí	2.5 V
Nabíjecí teplota	10 °C až 45 °C
Skladovací teplota	-20 °C až 60 °C

Pro identifikaci vnitřního odporu baterie byly měřeny hodnoty proudu a napětí měnící se v čase.

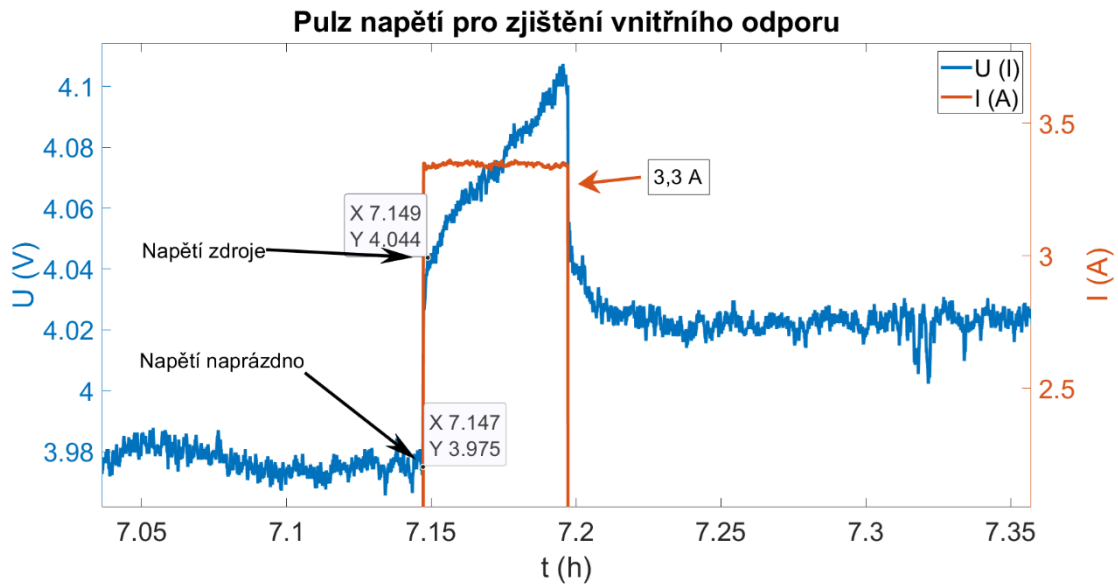
2.3 Stanovení vnitřního odporu

Měření pro stanovení vnitřního odporu baterie v režimu napájení probíhalo v laboratoři pomocí pulzního nabíjení, kdy byl zadán do laboratorního zdroje delta program, který vytvářel definované proudové pulzy. Měření bylo provedeno pro pulzy o velikosti 1 C (3,3 A) pro 4 různé teploty.

Vnitřní odpor byl stanoven na základě změny napětí při připojení či odpojení nabíjecího zdroje.

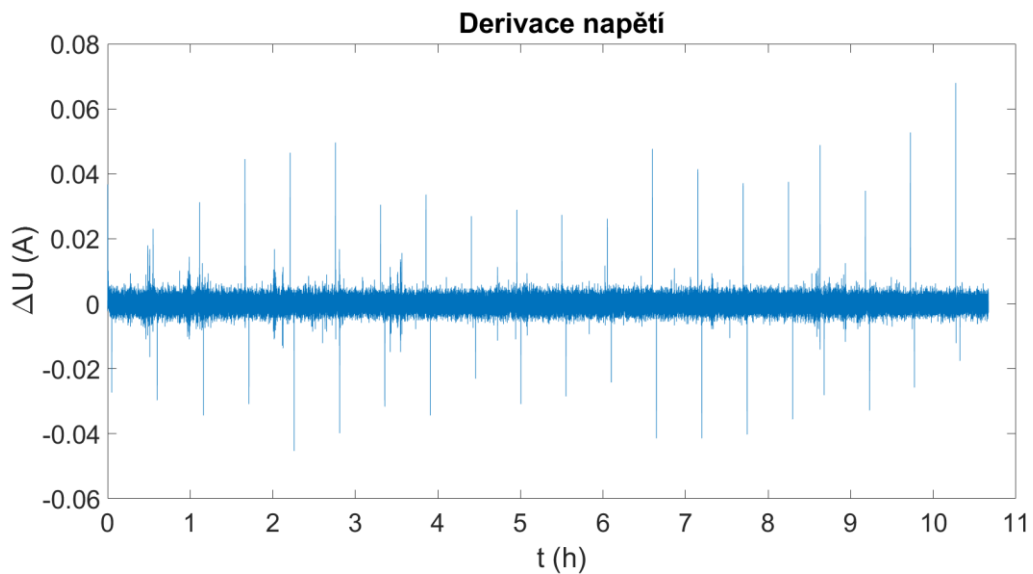
Rozložení proudových pulzů bylo navrženo rovnoměrně tak, abychom rozdělili nabíjecí charakteristiku alespoň do 20 bodů pro jednu teplotu měření a doba mezi jednotlivými pulzy byla minimálně 30 minut.

Obr. 7 ukazuje přechodový děj připojení a odpojení zdroje napětí k baterii. Článek je podobu 3 minut dobíjen konstantním proudem 3,3 A. Připojení a odpojení zdroje provází změny napětí sloužící k identifikaci. Na obr. 7 jsou vyznačeny hodnoty napětí naprázdno U_{OCV} , napětí zdroje U_{in} a velikost proudového impulzu.

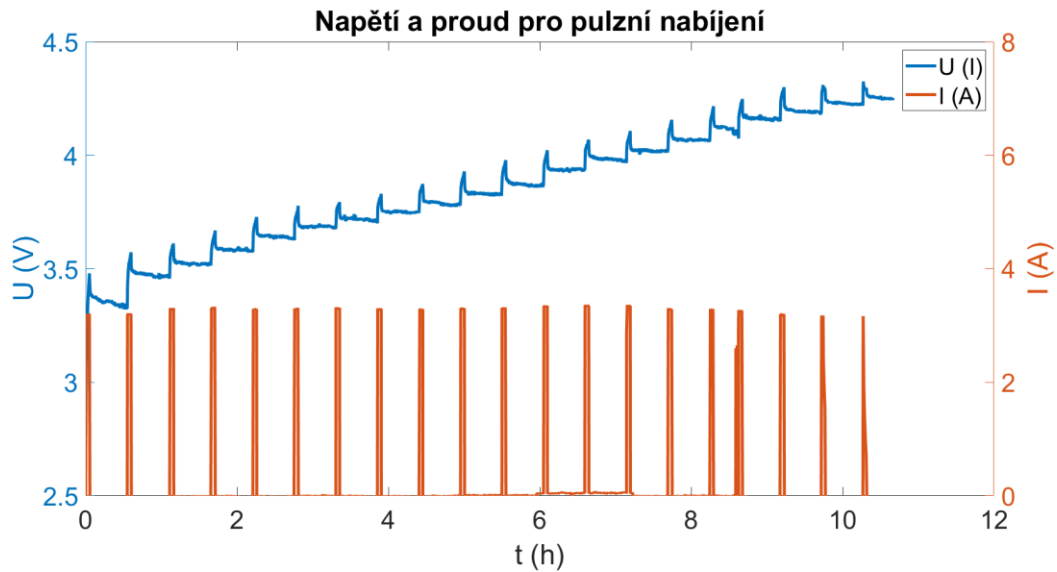


Obr. 7: Pulz pro určení vnitřního odporu

Výpočet vnitřního odporu je proveden pomocí (1.2). Pro zjednodušení byla provedena automatizace extrahování dat z naměřených hodnot, a sice pomocí derivace zobrazené na obr. 8. Průběh derivace jednoznačně určuje začátky nabíjecích impulzů, z kterých bylo možno odvodit napětí U_{OCV} a U_{in} , což bylo provedeno pro celé měření zobrazené na obr. 9.

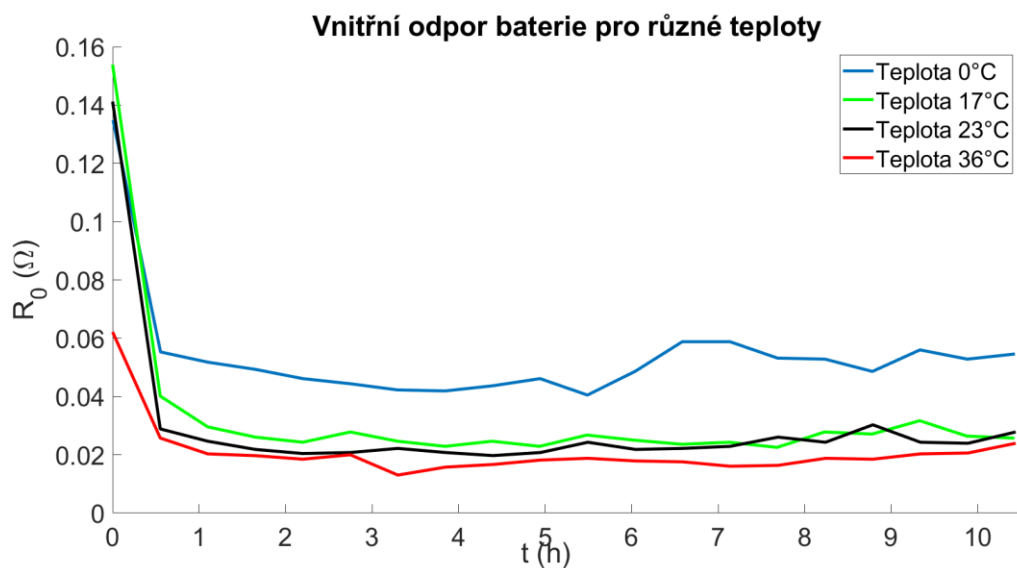


Obr. 8: Derivace napětí



Obr. 9: Napětí a proud pro pulzní nabíjení

Následně byl vnitřní odpor vypočítán i pro další teploty okolí. Závislost vnitřního odporu v závislosti na čase nabíjení pro různé teploty okolí ukazuje obr. 10.

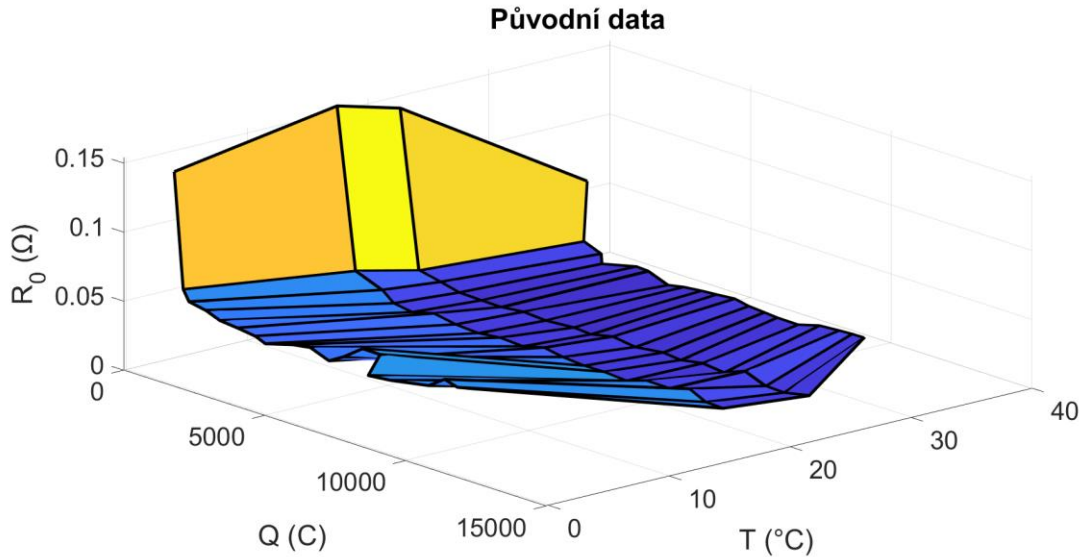


Obr. 10: Závislost vnitřního odporu na čase nabíjení pro různé teploty okolí

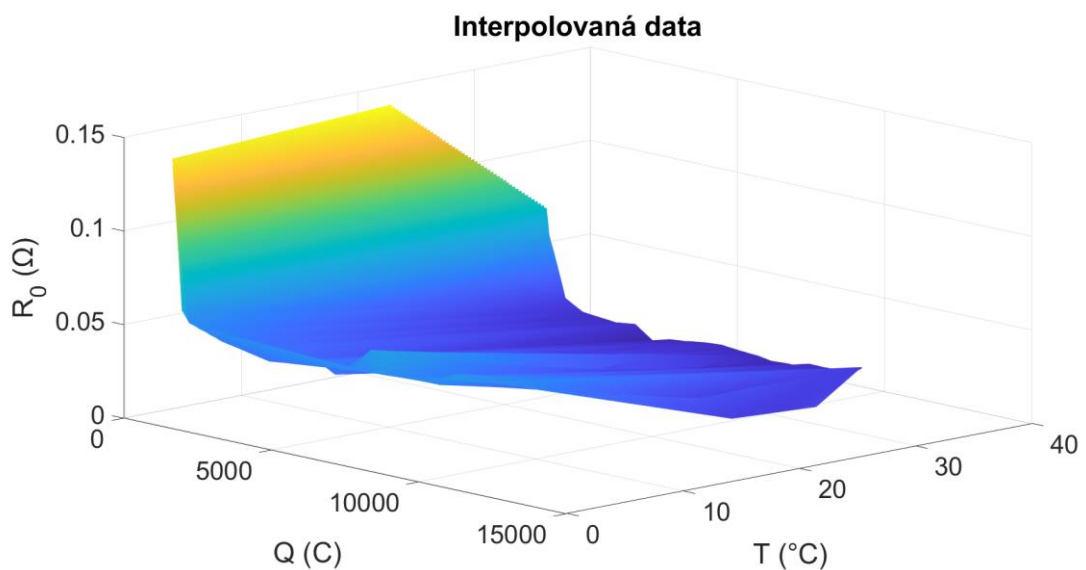
V obr. 10 lze vypočítat narůstající velikost vnitřního odporu s klesající teplotou. Při teplotě 0 °C narůstá vnitřní odpor dvojnásobně oproti pokojové teplotě a trojnásobně oproti měření při 36 °C.

Z uvedených závislostí byl vytvořen 3D graf, zobrazený na obr. 11 a 12, který je složen z osy pro vnitřní odpor R_0 , teploty T a dodaného náboje Q .

Závislost vnitřního odporu na obr. 11 je klíčová pro další stanovení ztrát a účinnosti nabíjení konstantním proudem a konstantním napětím. V každé fázi nabíjecího cyklu tak lze pro danou teplotu a dodaný náboj určit velikost vnitřního odporu a následně aktuální ztráty.



Obr. 11: Znáornění 3D pro vnitřní odpor v závislosti na teplotě a stavu nabití



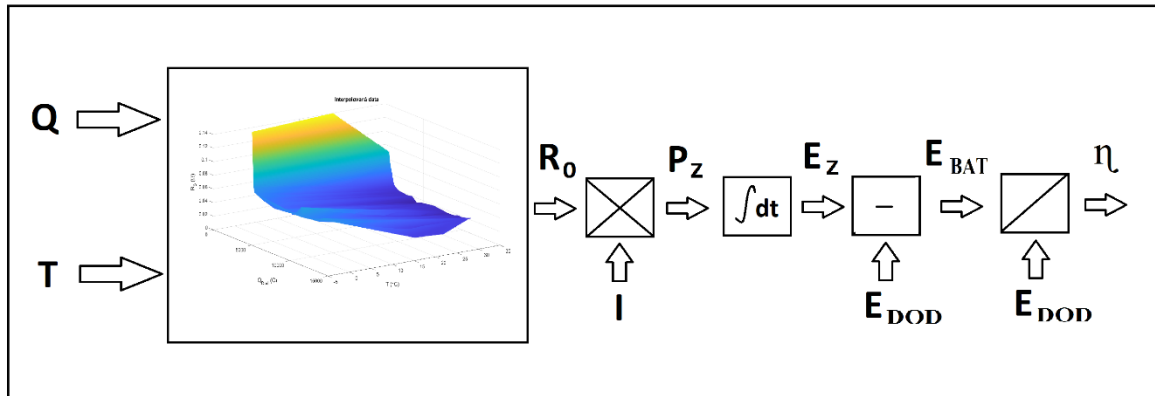
Obr. 12: Znáornění 3D s interpolovanými hodnotami

2.4 Nabíjení při změně teploty okolí a velikosti nabíjecího proudu

Pro toto měření bylo použito nabíjení pomocí konstantního proudu pro různé teploty. Měření konstantním proudem přímo navazuje na pulzní nabíjení a 3D graf zobrazený na obr. 12.

Na obr. 13 je naznačen postup pro výpočet účinnosti nabíjení konstantním proudem a napětím, jsou zde použity hodnoty teploty, napětí a proudu. Hodnoty proudu byly integrovány podle (1.1) a vypočtený dodaný náboj spolu s teplotou byly dosazeny do 3D grafu zobrazeného na obr. 12. Výstupem byla aktuální velikost odporu v závislosti na T a Q.

Po zjištění konkrétních hodnot vnitřního odporu pro měření s konstantním proudem či napětím následoval výpočet ztrátového výkonu $P_z = R_0 i^2$ a integrací dle (1.6) byla určena ztrátová energie, která byla použita pro výpočet účinnosti.



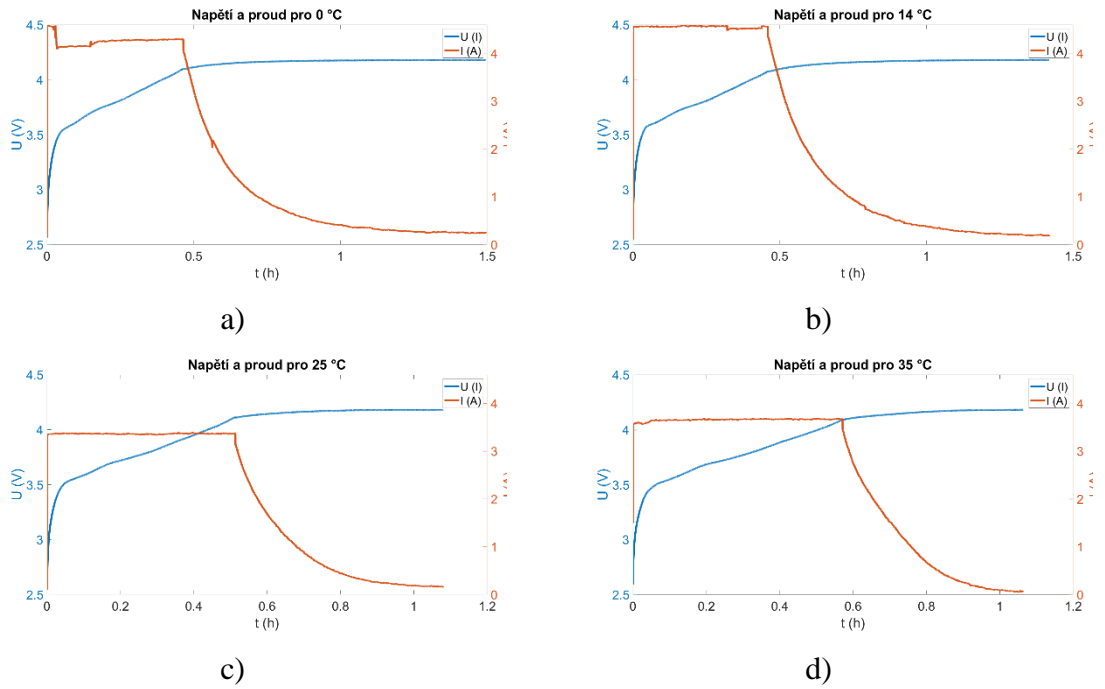
Obr. 13: návod výpočtu účinnosti

Obr. 14 až 25 ukazují naměřené a vypočítané průběhy, jsou zde uvedeny nabíjecí charakteristiky, energie, výkony.

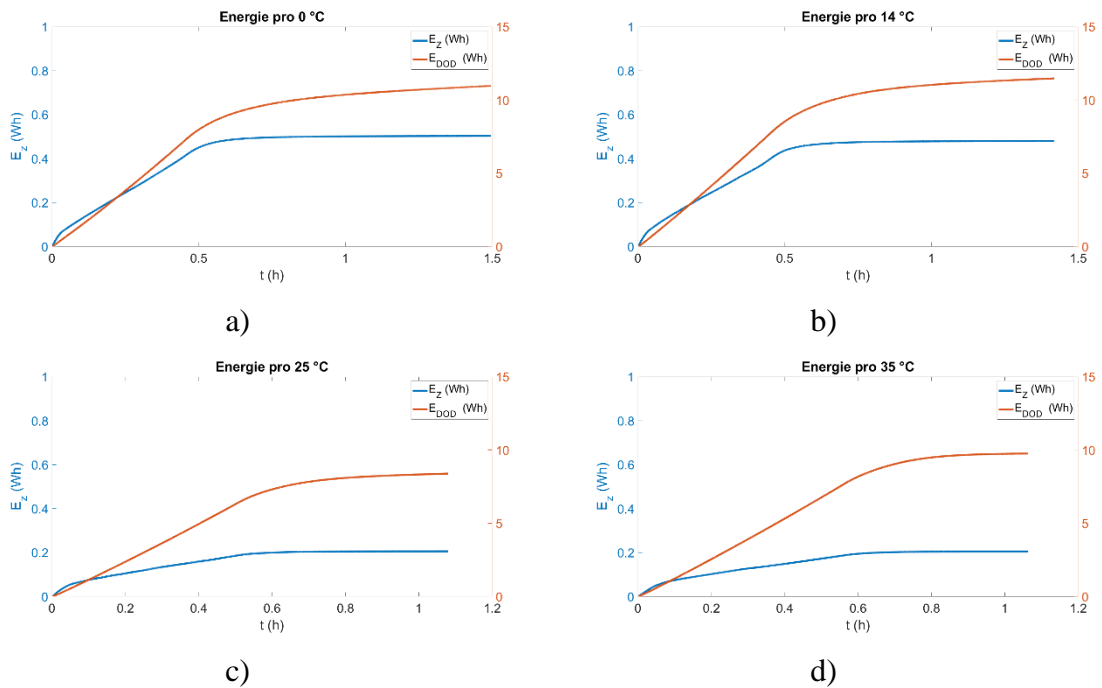
Na obr. 14 jsou uvedeny nabíjecí charakteristiky pro nabíjecí proud 4,4 A a čtyři různé teploty. Z obrázku lze vypočítat prodloužení doby potřebné pro nabití článku pro nižší teploty, což odpovídá zvýšení vnitřního odporu a vyšším ztrátám.

Na obr. 15 jsou uvedeny energie ztrátové a energie dodané. Je vidět, že energie dodaná má pro všechny průběhy přibližně stejnou velikost, zatímco energie ztrátová se zvětšuje s klesající teplotou.

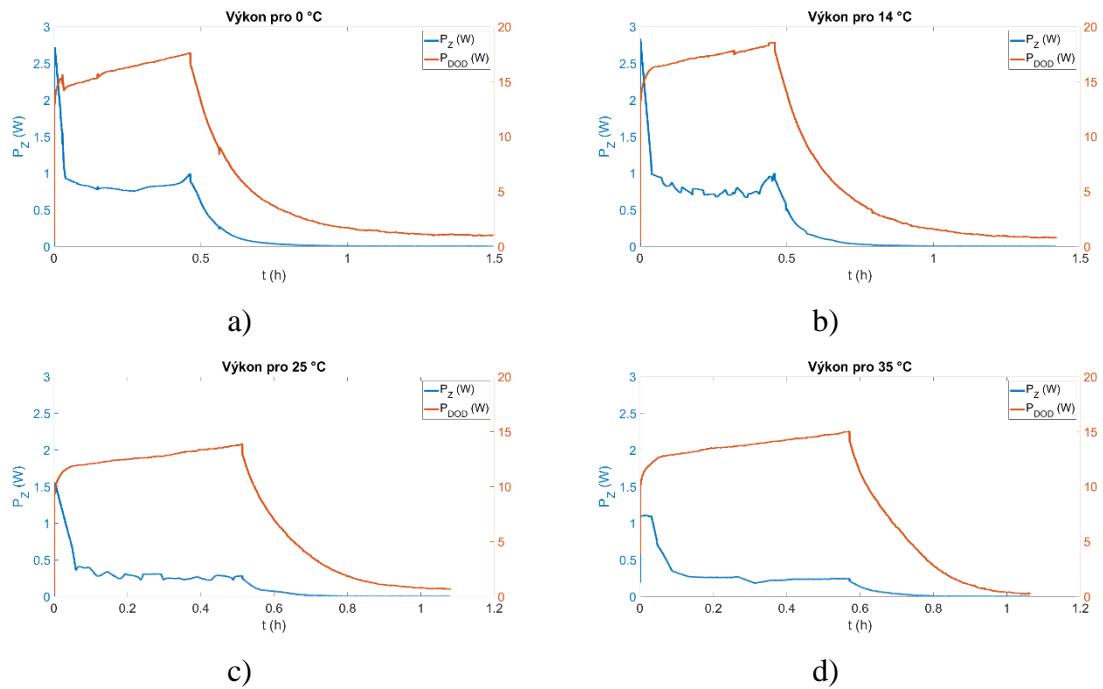
Na obr. 16 je zobrazen výkon ztrátový a výkon dodaný, kde je dobře vidět, v jakém okamžiku byly největší ztráty na článku, tj. na začátku nabíjení a na konci první části nabíjecího cyklu. Dále je zde možné vidět, jak se snižují ztráty s rostoucí teplotou.



Obr. 14: Experimentální výsledky – nabíjení lithiového článku proudem 4,4 A při teplotě: a) 0 °C; b) 14 °C; c) 25 °C; d) 35 °C



Obr. 15: Experimentální výsledky – Dodaná energie a ztrátová energie baterie pro 4,4 A, při teplotě: a) 0 °C; b) 14 °C; c) 25 °C; d) 35 °C

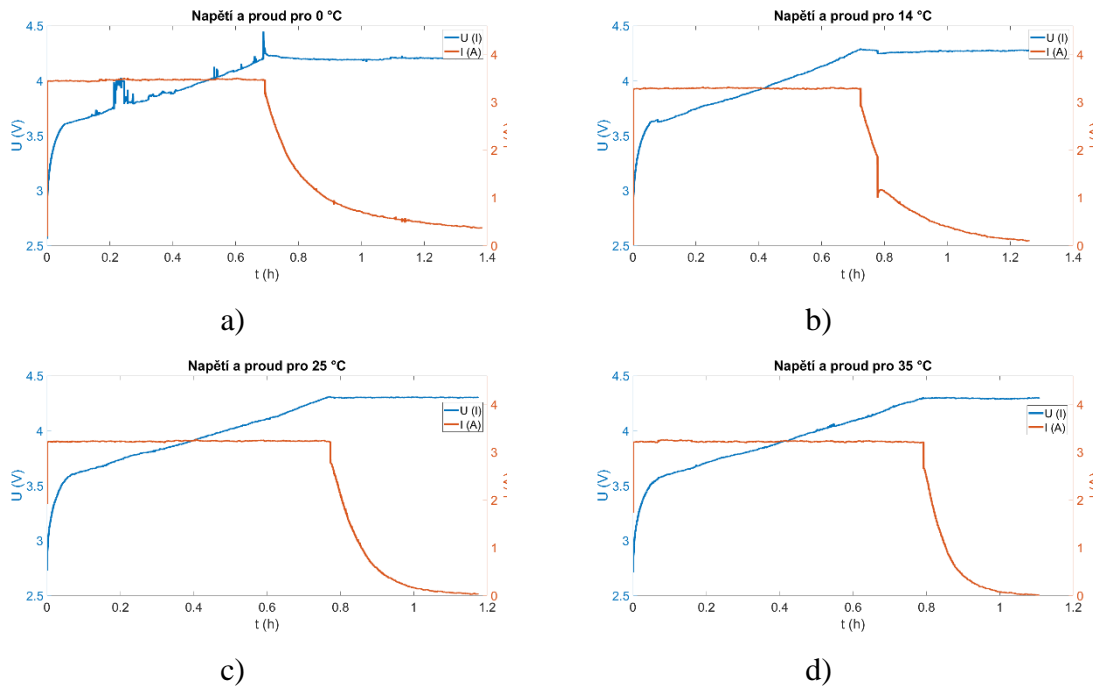


Obr. 16: Experimentální výsledky – Dodaný výkon a ztrátový výkon pro 4,4 A, při teplotě a) 0 °C; b) 14 °C; c) 25 °C; d) 35 °C

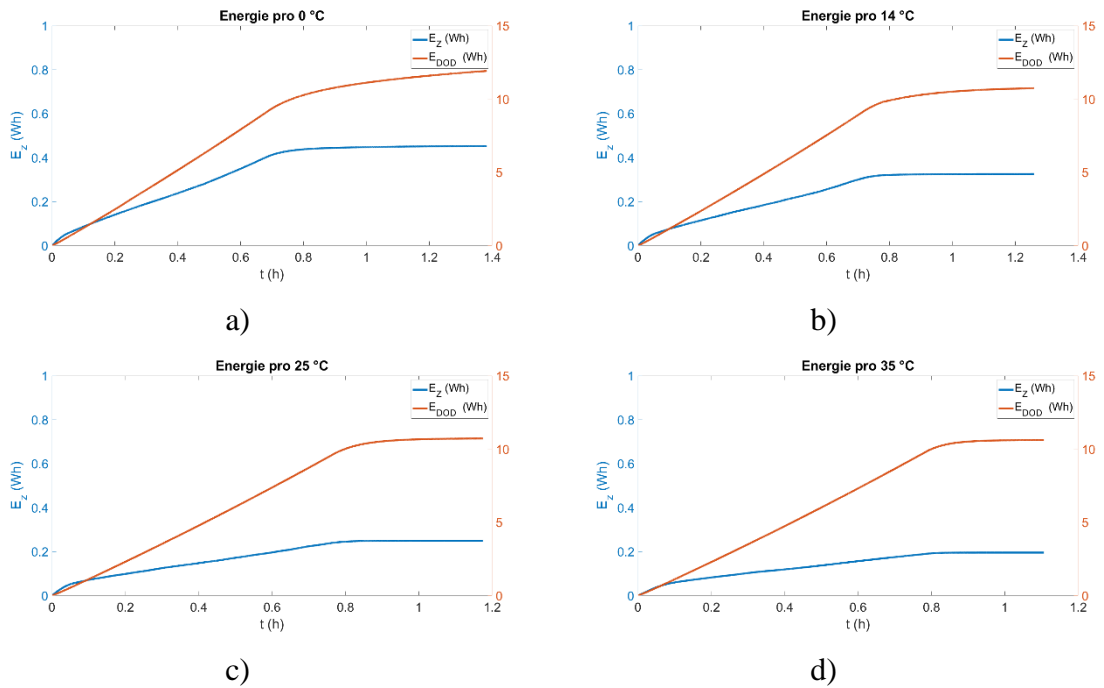
Na obr. 17 je nabíjecí charakteristika pro proud 3,3 A. Nabíjení menším proudem vyžaduje delší dobu nabíjení než v případě proudu 4,4 A.

Stejně jako v předchozím případě, i na obr. 18 lze pozorovat zvýšení ztrát pro snižující se teplotu. Současně je při porovnání s obr. 15 možné vypočítat pokles ztrátové energie pro nabíjení proudem 3,3 A.

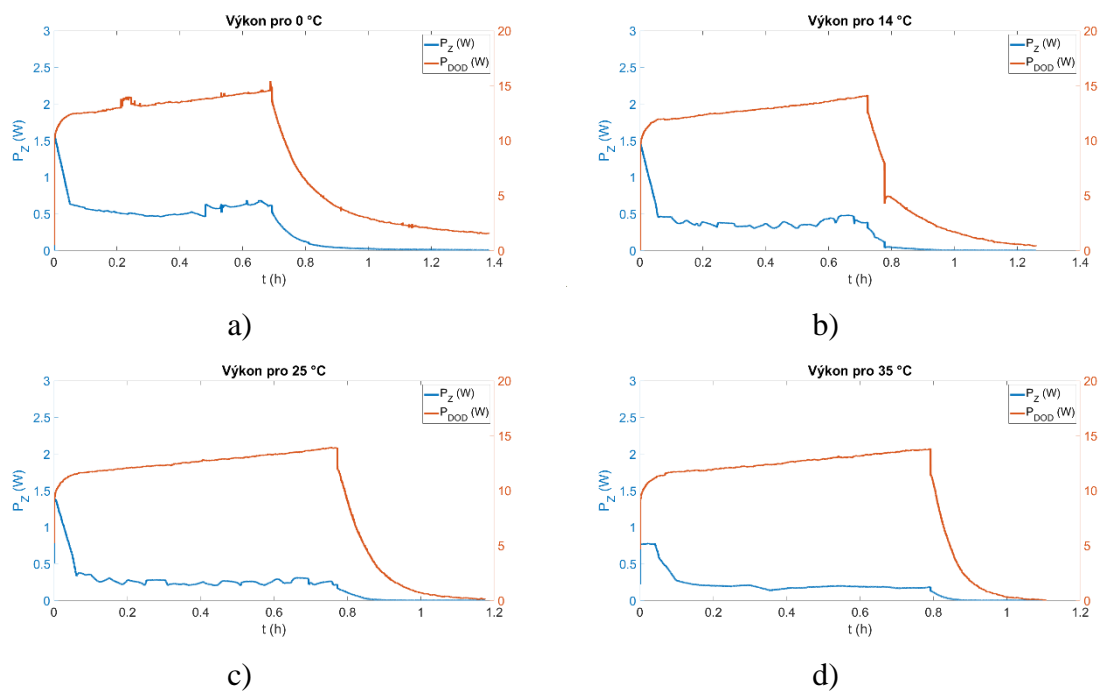
Na obr. 19 je vidět pokles ztrát, a to hlavně na začátku nabíjecího cyklu, zapříčiněný menším proudem 3,3 A.



Obr. 17: Experimentální výsledky – nabíjení lithiového článku proudem 3,3 A při teplotě: a) 0 °C; b) 14 °C; c) 25 °C; d) 35 °C

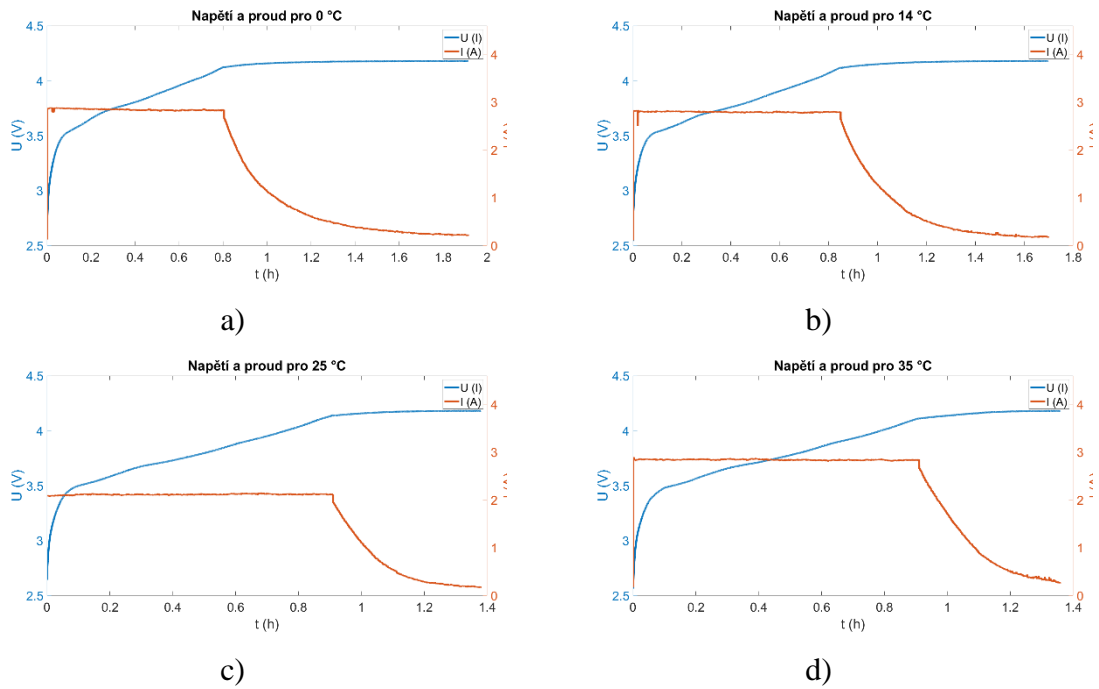


Obr. 18: Experimentální výsledky – Dodaná energie a ztrátová energie baterie pro 3,3 A, při teplotě: a) 0 °C; b) 14 °C; c) 25 °C; d) 35 °C

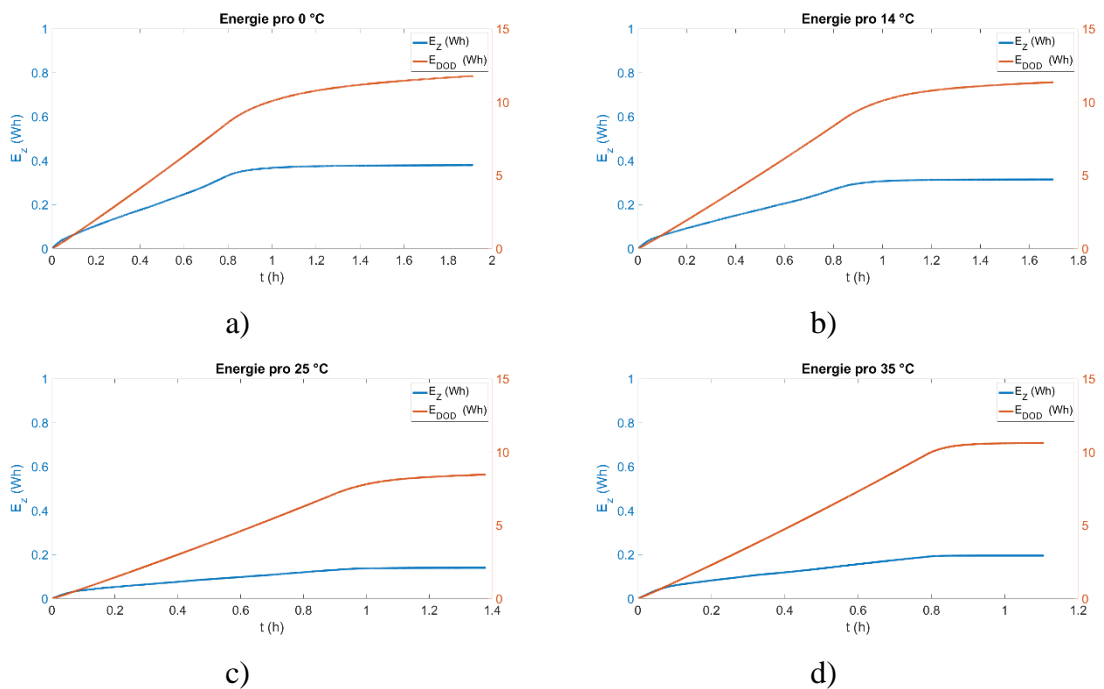


Obr. 19: Experimentální výsledky – Dodaný výkon a ztrátový výkon pro 3,3 A, při teplotě a) 0 °C; b) 14 °C; c) 25 °C; d) 35 °C

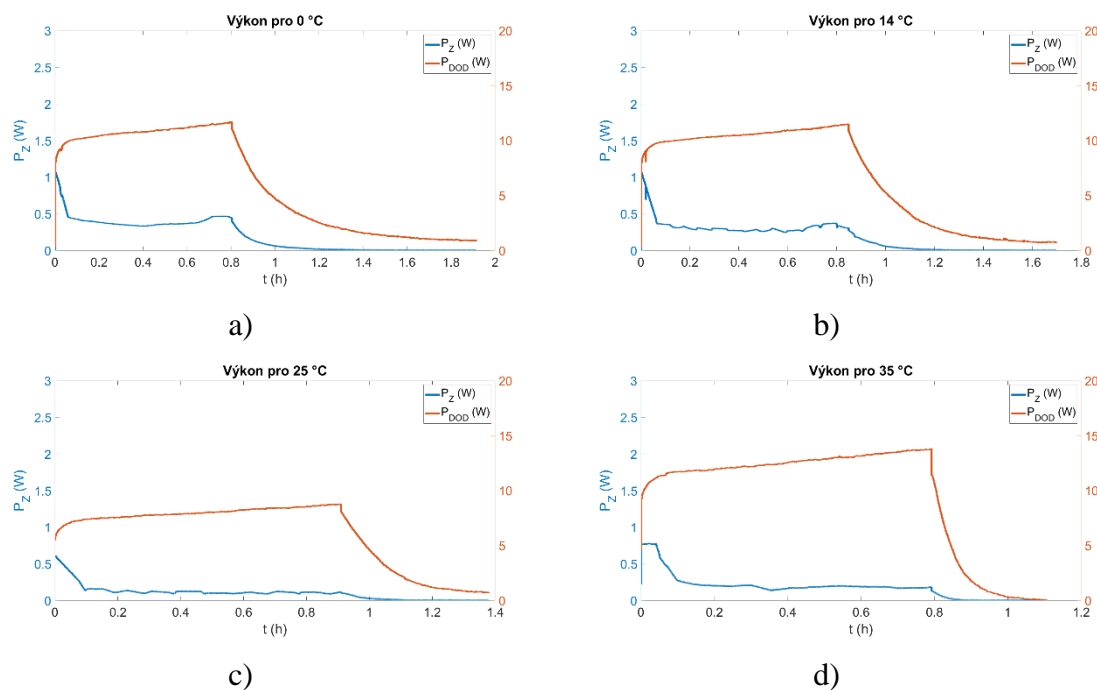
Na obr. 20 je vidět nabíjení pro 25 °C, které probíhalo při nabíjecím proudu 2,7 A.



Obr. 20: Experimentální výsledky – nabíjení lithiového článku proudem 2,7 A při teplotě: a) 0 °C; b) 14 °C; c) 25 °C; d) 35 °C



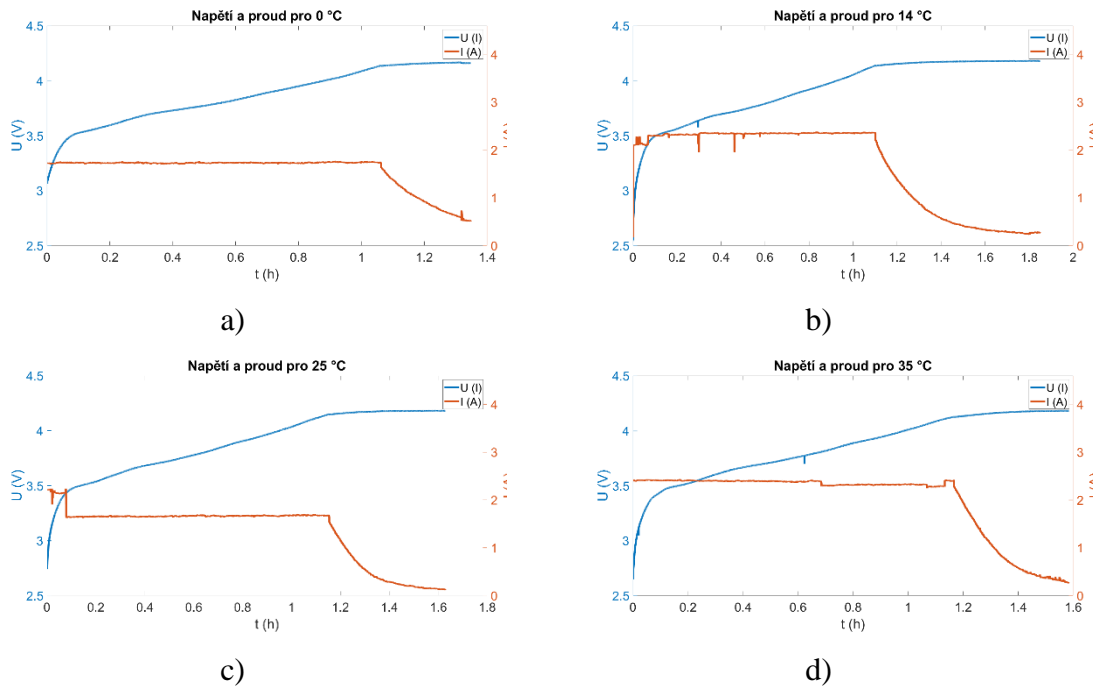
Obr. 21: Experimentální výsledky – Dodaná energie a ztrátová energie baterie pro 2,7 A, při teplotě: a) 0 °C; b) 14 °C; c) 25 °C; d) 35 °C



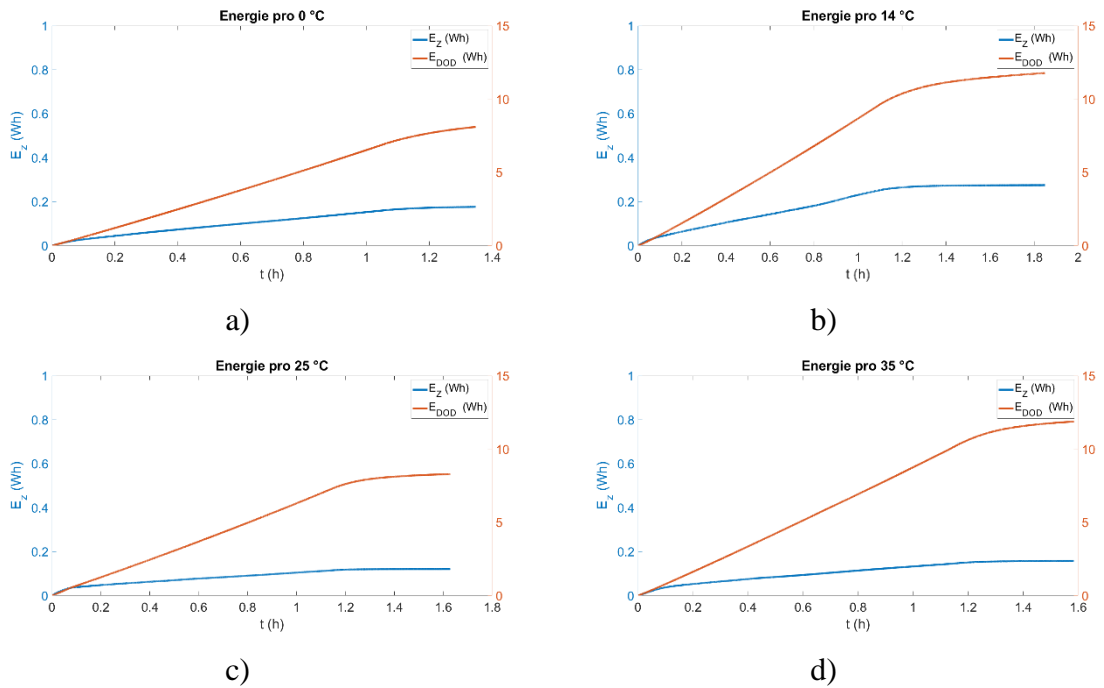
Obr. 22: Experimentální výsledky – Dodaný výkon a ztrátový výkon pro 2,7 A, při teplotě a) 0 °C; b) 14 °C; c) 25 °C; d) 35 °C

Jako poslední jsou uvedeny průběhy nabíjení proudem 2,2 A (obr. 22) Nabíjení je přirozeně výrazně delší než v předchozích případech, viz obr. 14, 17 a 20.

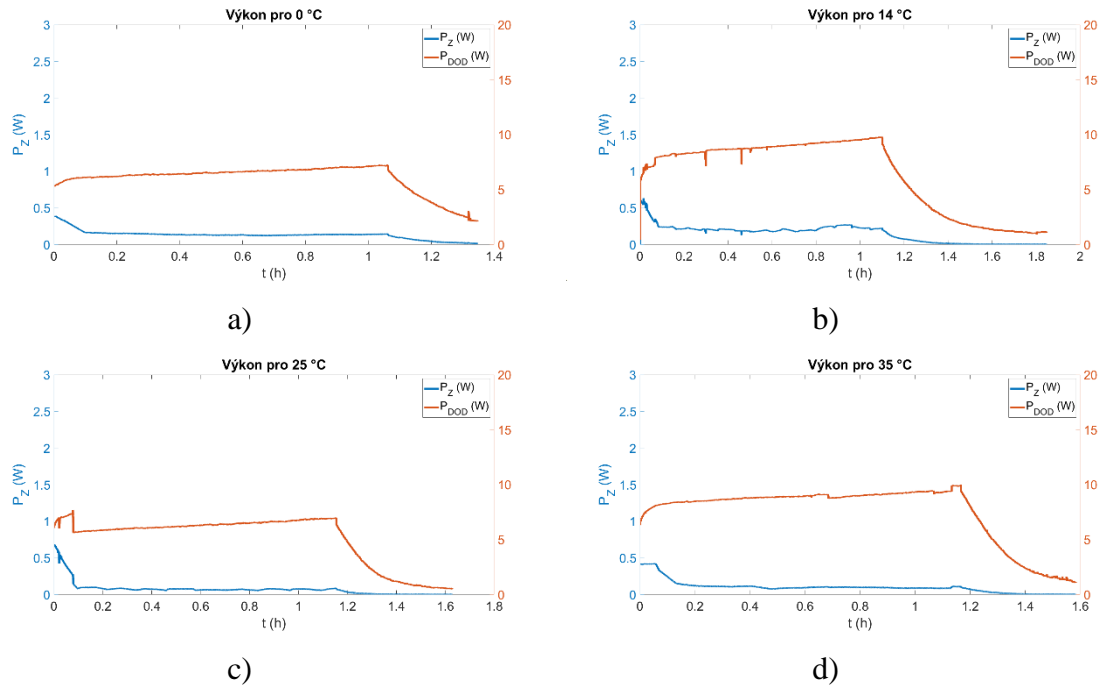
Na obr. 24 d) je vidět, že nejnižší ztráty byly dosaženy při teplotě 35 °C.



Obr. 23: Experimentální výsledky – nabíjení lithiového článku proudem 2,2 A při teplotě: a) 0 °C; b) 14 °C; c) 25 °C; d) 35 °C



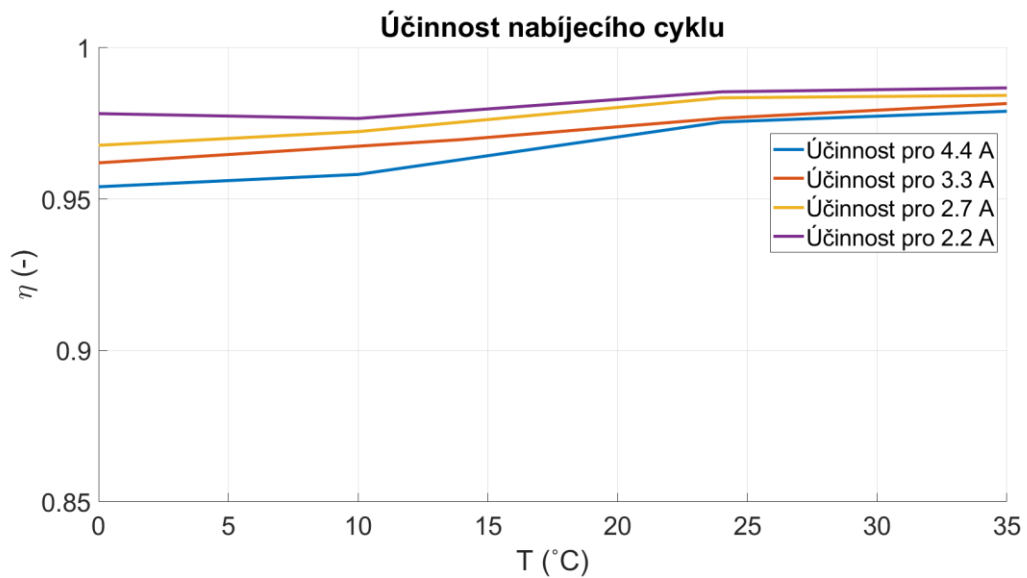
Obr. 24: Experimentální výsledky – Dodaná energie a ztrátová energie baterie pro 2,2 A, při teplotě: a) 0 °C; b) 14 °C; c) 25 °C; d) 35 °C



Obr. 25: Experimentální výsledky – Dodaný výkon a ztrátový výkon pro 2,2 A, při teplotě a) 0 °C; b) 14 °C; c) 25 °C; d) 35 °C

2.5 Účinnost

Účinnost je důležitý parametr, který udává představu, kolik procent energie bylo ztraceno při nabíjecím cyklu. Pro stanovení účinnosti byly použity hodnoty dodané a ztrátové energie zobrazené na obr. 15, 18, 21 a 24. Změny účinnosti v závislosti na teplotě a velikosti nabíjecího proudu ukazuje obr. 26.



Obr. 26: Změny účinnosti v závislosti na teplotě a velikosti nabíjecího proudu

Z obr. 26 je možné vyzorovat zvyšující se účinnost s nárůstem teploty. To odpovídá poklesu vnitřního odporu baterie a ztrát. Dále je vidět snížení účinnosti s rostoucím nabíjecím proudem, což odpovídá závislosti Jouleových ztrát na kvadrátu proudu.

Stanovení účinnosti pro různé teploty okolí a pro různé nabíjecí proudy je důležité v zejména elektromobilitě, kde přenášené výkony a velikost ukládané energie do trakční baterie jsou řádově větší, než je tomu v jiných aplikacích, např. u spotřební elektroniky. Ztráty při nabíjení mohou znamenat výrazný nárůst nákladů na provoz elektrovozu. Ačkoli pro měřený lithiový článek vyšla účinnost nabíjení ve všech případech vyšší než 95%, v případě kompletní trakční baterie obsahující i stovky článků je nutné počítat s účinností mnohem nižší.

Závěr

Cílem této práce bylo stanovení vnitřního odporu lithiového článku při nabíjení zejména s ohledem na vliv teploty okolí a velikosti nabíjecího proudu. Bylo provedeno série měření vybraného lithiového článku v laboratorních podmínkách při změně teploty okolí a změně velikosti nabíjecího proudu, a to pomocí konstantního a pulzního nabíjení.

Byla provedena identifikace vnitřního odporu baterie a byla stanovena jeho závislost na teplotě okolí a stavu nabití baterie. Tato závislost potvrdila předpokládaný nárůst vnitřního odporu baterie při nízkých teplotách okolí, což má zásadní dopad na účinnost nabíjení. Vyšší hodnoty vykazuje vnitřní odpor také při zahájení a konci nabíjení.

Na základě identifikace vnitřního odporu byly stanoveny nabíjecí ztráty a vyhodnocena účinnost nabíjení lithiového článku, a to v závislosti na teplotě okolí a velikosti nabíjecího proudu. Maximální účinnost nabíjení 98,7 % byla dosažena při nabíjecím proudu 2,2 A a teplotě okolí 35 °C, naopak nejnižší účinnost 95,4 % odpovídá maximálnímu nabíjecímu proudu 4,4 A a teplotě okolí 0 °C.

Výsledky této práce se shodují s teoretickými předpoklady. Všechny cíle práce byly splněny.

Zdroje

- [1] <https://www.e15.cz/tematicke-specialy/elektromobilita/vystavba-verejnych-dobijecek-zrychluje-zapojuji-se-i-benzinky-ci-obchodni-retezce-1381254>
- [2] <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/54377/62106/640972/priloha001.pdf>
- [3] <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/zpracovatelsky-prumysl/automobilovy-prumysl/aktualizace-narodniho-akcniho-planu-ciste-mobility--254445/>
- [4] <https://elektrickevozy.cz/clanky/co-je-to-elektromobil-jak-funguje-a-jake-jsou-typy-nabijeni/2>
- [5] <https://investingnews.com/daily/resource-investing/battery-metals-investing/lithium-investing/6-types-of-lithium-ion-batteries/>
- [6] https://www.researchgate.net/figure/Comparison-of-different-types-of-batteries_tbl1_235761511
- [7] <https://circuitdigest.com/article/different-types-of-batteries>
- [8] <https://batteryuniversity.com/article/bu-107-comparison-table-of-secondary-batteries>
- [9] <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektřiny/13612-lithiove-akumulatory>
- [10] <https://www.youtube.com/watch?v=G5McJw4KkG8>
- [11] <https://ieeexplore.ieee.org/document/9563403>
- [12] <https://ieeexplore.ieee.org/document/8501033>
- [13] <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1719/1/012045/pdf>
- [14] <https://ieeexplore.ieee.org/document/8869224>
- [15] https://www.imrbatteries.com/content/sanyo_ncr20700a.pdf
- [16] <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/60518/final-thesis.pdf?sequence=13&isAllowed=y>

Seznam grafů, obrázků a tabulek

Obr. 1: Atomická struktura Lithium iontové baterie	5
Obr. 2: Nabíjecí charakteristika	6
Obr. 3: Theveninův model prvního řádu	7
Obr. 4: Theveninův model druhého řádu	7
Obr. 5: Uspořádání a schéma zapojení laboratorního prototypu pro měření lithiových článků	10
Obr. 6: Sestavený laboratorní prototyp pro měření lithiových článků	10
Obr. 7: Pulz pro určení vnitřního odporu	13
Obr. 8: Derivace napětí	13
Obr. 9: Napětí a proud pro pulzní nabíjení	14
Obr. 10: Závislost vnitřního odporu na čase nabíjení pro různé teploty okolí	14
Obr. 11: Znázornění 3D pro vnitřní odpor v závislosti na teplotě a stavu nabití	15
Obr. 12: Znázornění 3D s interpolovanými hodnotami	15
Obr. 13: návod výpočtu účinnosti	16
Obr. 14: Experimentální výsledky – nabíjení lithiového článku proudem 4,4 A při teplotě: a) 0 °C; b) 14 °C; c) 25 °C; d) 35 °C	17
Obr. 15: Experimentální výsledky – Dodaná energie a ztrátová energie baterie pro 4,4 A, při teplotě: a) 0 °C; b) 14 °C; c) 25 °C; d) 35 °C	17
Obr. 16: Experimentální výsledky – Dodaný výkon a ztrátový výkon pro 4,4 A, při teplotě a) 0 °C; b) 14 °C; c) 25 °C; d) 35 °C	18
Obr. 17: Experimentální výsledky – nabíjení lithiového článku proudem 3,3 A při teplotě: a) 0 °C; b) 14 °C; c) 25 °C; d) 35 °C	19
Obr. 18: Experimentální výsledky – Dodaná energie a ztrátová energie baterie pro 3,3 A, při teplotě: a) 0 °C; b) 14 °C; c) 25 °C; d) 35 °C	19
Obr. 19: Experimentální výsledky – Dodaný výkon a ztrátový výkon pro 3,3 A, při teplotě a) 0 °C; b) 14 °C; c) 25 °C; d) 35 °C	21
Obr. 20: Experimentální výsledky – nabíjení lithiového článku proudem 2,7 A při teplotě: a) 0 °C; b) 14 °C; c) 25 °C; d) 35 °C	21
Obr. 21: Experimentální výsledky – Dodaná energie a ztrátová energie baterie pro 2,7 A, při teplotě: a) 0 °C; b) 14 °C; c) 25 °C; d) 35 °C	21
Obr. 22: Experimentální výsledky – Dodaný výkon a ztrátový výkon pro 2,7 A, při teplotě a) 0 °C; b) 14 °C; c) 25 °C; d) 35 °C	22

Obr. 23: Experimentální výsledky – nabíjení lithiového článku proudem 2,2 A při teplotě: a) 0 °C; b) 14 °C; c) 25 °C; d) 35 °C	23
Obr. 24: Experimentální výsledky – Dodaná energie a ztrátová energie baterie pro 2,2 A, při teplotě: a) 0 °C; b) 14 °C; c) 25 °C; d) 35 °C	23
Obr. 25: Experimentální výsledky – Dodaný výkon a ztrátový výkon pro 2,2 A, při teplotě a) 0 °C; b) 14 °C; c) 25 °C; d) 35 °C	24
Obr. 26: Znázornění změny účinnosti v závislosti na teplotě a nabíjecího proudu	24
Tabulka 1: Nabíjecí doby pro různé druhy nabíjecích stanic	3
Tabulka 2: Měřicí přístroje	11
Tabulka 3: Parametry měřeného článku	12

Seznam příloh

Tabulka P1: Hodnoty energií ztrátové, dodané a baterie pro 4,4 A	I
Tabulka P2: Hodnoty energií ztrátové, dodané a baterie pro 3,3 A	I
Tabulka P3: Hodnoty energií ztrátové, dodané a baterie pro 2,7 A	I
Tabulka P4: Hodnoty energií ztrátové, dodané a baterie pro 2,2 A	I

Příloha

Tabulka P1: Nabíjení proudem 4,4 A: Dodaná energie, ztráty a energie uložená v článku v závislosti na teplotě

I=4.4 A			
T (°C)	E _{DOD} (Wh)	E _Z (Wh)	E _{BAT} (Wh)
0	10.9659101	0.50355418	10.462356
14	11.4740339	0.48012765	10.9939062
24	8.38967741	0.20578341	8.183894
35	9.75752323	0.20465923	9.55286401

Tabulka P2: Hodnoty energií ztrátové, dodané a baterie pro 3,3 A

I=3.3 A			
T (°C)	E _{DOD} (Wh)	E _Z (Wh)	E _{BAT} (Wh)
0	11.9162144	0.4529996	11.4632148
14	10.736162	0.32553952	10.4106225
24	10.719891	0.24960605	10.4702849
35	10.6118355	0.19554078	10.4162947

Tabulka P3: Hodnoty energií ztrátové, dodané a baterie pro 2,7 A

I=2.7 A			
T (°C)	E _{DOD} (Wh)	E _Z (Wh)	E _{BAT} (Wh)
0	11.774426	0.37940074	11.3950253
14	11.3497673	0.31442723	11.03534
24	8.45985884	0.13989312	8.31996572
35	11.5144755	0.18105564	11.3334199

Tabulka P3: Hodnoty energií ztrátové, dodané a baterie pro 2,2 A

I=2.2 A			
T (°C)	E _{DOD} (Wh)	E _Z (Wh)	E _{BAT} (Wh)
0	8.09583018	0.17609368	7.91973651
14	11.7772968	0.27509002	11.5022068
24	8.29172229	0.12064448	8.17107781
35	11.873757	0.15741511	11.7163419