



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Modell-alapú töltöttségi állapotbecslő biztonság- és küldetéskritikus akkumulátoros rendszerekhez

TDK dolgozat

Szabó Péter, Gyulai Vajk Máté

Konzulens: Debreceni Tibor

Debreceni.Tibor@aut.bme.hu

Automatizálási és Alkalmazott Informatikai Tanszék

Dr. Balázs Gergely György

gergely.balazs@siemens.com

Siemens Zrt.

Budapest, 2016.10.27.

Köszönetnyilvánítás

Ez úton is szeretnénk megköszönni konzulensünknek, Debreceni Tibornak a tervezés és megvalósítás közben nyújtott segítségét.

Szeretnénk köszönetet mondani Dr. Balázs Gergely Györgynek, hogy TDK munkánk során állandó bejárást és betekintést engedett a Siemens Zrt. teljesítményelektronika laboratóriumába.

Kivonat

Napjainkban a villamos üzemű járművek technológiája rohamosan fejlődik, széles körű elterjedésükhöz elengedhetetlen az energiatároló rendszerek körültekintő kialakítása. Az energiatároló rendszer egyik kulcselemét képezi az akkumulátorfelügyeleti rendszer (Battery Management System – BMS), melynek feladatai közé tartozik az akkumulátor töltöttségi szintnek (State-of-Charge – SoC), mint akkumulátor állapotnak becslése. Az SoC érték alapján előre jelezhető az akkumulátorok várható üzemideje a következő töltésig. A biztonságkritikus alkalmazásokban, mint például teljesen elektromos hajtású autók és repülő, ez kiemelten fontos feladat. Az autóiipari alkalmazásokkal szemben repülő esetén nem engedhetjük meg túl alacsony töltöttségi szint elérésekor az akkumulátoros rendszer lekapcsolását. Ilyen alkalmazások esetén már nem a jármű villamos rendszereinek védelme, hanem az emberélet védelme az elsődleges.

Az energiatárolók egyik fő típusát képezik a korszerű, az utóbbi években széles körben elterjedt nagyobb energia sűrűséggel rendelkező lítium-ion akkumulátorok. A dolgozat célja egy Li-ion akkumulátorok töltöttségének számítására alkalmas állapotbecslő létrehozása. Az állapotbecslő algoritmus tartalmazza az akkumulátorok modelljét, így folyamatosan monitorozva azok feszültségét és áramát, nagy pontossággal becsülhető az SoC. Ez a módszer pontosabb eredményt képes szolgáltatni a legelterjedtebb, úgynevezett Coulomb-counting módszernél. Az akkumulátor modell azonban csak a megfelelő modell paraméterek azonosítása esetén működhet, melynek mérés alapú kivitelezését hajtottuk végre és mutatjuk be dolgozatunkban. A lítium-ion cellák viselkedése nemlineáris, legtöbb paraméterük függ a töltöttségtől, hőmérséklettől, az előzőleg végrehajtott töltési-kisütési ciklusok számától, sőt eltérő paramétereket kapunk töltéskor és kisütéskor is.

A TDK munka keretében megtörténtek a kiválasztott típusú Li-ion cellák azonosítási mérései, a mérésekből meghatároztuk a választott villamos modell paramétereit. Az azonosított paraméterek segítségével megterveztük és implementáltuk az SoC-becslő algoritmust, valamint a mérési eredmények alapján paraméterezett akkumulátor modell azonosítási szimulációit elvégezve kiértékeljük a becslő algoritmusunk hatékonyságát.

Abstract

Nowadays development of fully electric vehicles is accelerated, however this technology can be widespread only if reliability and safety will be improved. One of the main parts of the energy storage is the Battery Management System (BMS), which estimates the battery state-of-charge (SoC). We can predict the remaining runtime of the batteries before full charge would be needed. In safety-critical applications, like fully electric cars and aircrafts, accurate SoC and remaining runtime estimation is of paramount importance. Unlike automotive applications it is prohibited in aircrafts to switch off the battery system if SoC decreases below significantly low values. In such applications the main task of the BMS is to protect human safety even if battery system become damaged.

Lithium-ion batteries are widely used in energy storage systems. They became famous and well-known in industrial applications just in the last few years due to their increasing energy density parameters. The aim of our work was to develop a model-based SoC estimator for lithium-ion batteries. The algorithm contains the model of the batteries. If we measure the current and voltage of such battery system, we can predict SoC more accurately than the most widely used Coulomb-counting method. The battery model can operate well only if the model parameters are accurate enough. We can identify these parameters via well-defined measurements. Lithium-ion batteries show strongly nonlinear behaviour, most of the parameters are, among others, SoC, temperature and cycle number dependent. Moreover parameters are different under charging and discharging process.

In our work we identified the model parameters of the chosen battery type via measurements, and implemented Simulink model of the estimator. After that we verified the model and the developed SoC estimator algorithm, where we provided evaluation and conclusions.

Tartalomjegyzék

1.	Bevezető	5
2.	Elméleti áttekintés	7
2.1.	Akkumulátor modell és identifikációja	7
2.1.1.	Alapfogalmak	7
2.1.2.	Akkumulátor modellek	7
2.1.3.	Villamos modellek	8
2.1.4.	A kombinált villamos modell	10
2.1.5.	A TTC modell paraméter-identifikációja	13
2.2.	SoC becselő eljárások	16
2.2.1.	Coulomb-counting	16
2.2.2.	Üresjárási feszültség (OCV) alapú becslés	17
2.2.3.	Kombinált OCV és CC becselő	18
2.2.4.	Tisztán modell alapú töltöttség becslők	18
2.2.5.	Vegyes töltöttség becselő algoritmusok	19
3.	Paraméter-identifikáció	22
3.1.	A mérések menete	22
3.2.	A mérési eredmények feldolgozása	26
3.2.1.	Az árammérés korrekciója, a cella kapacitásának meghatározása	26
3.2.2.	Az SoC számítása a verifikációs szimulációkhoz	27
3.2.3.	A töréspontok kiszámítása	28
3.2.4.	A kisütési és relaxációs szakaszok szétválasztása	28
3.2.5.	A TTC modell paramétereinek számítása	29
3.2.6.	Görbeillesztés a modellparaméterekre	30

3.3.	A paraméter-identifikáció eredményei	31
4.	A megvalósított állapotbecslő algoritmus	34
4.1.	A becslő pontos leírása	34
4.2.	Megvalósított Simulink modell	35
4.2.1.	Identifikált paraméterek implementálása	38
4.2.2.	Az üresjárési feszültség implementálása	38
4.2.3.	Hőmérséklet függés	40
5.	Verifikáció	42
5.1.	A szimulációs környezet	42
5.2.	A verifikációs eredmények	43
6.	Értékelés	48

Ábrák jegyzéke

2.1. A lítium-ion akkumulátorok IR modellje	8
2.2. A lítium-ion akkumulátorok OTC modellje	9
2.3. A lítium-ion akkumulátorok TTC modellje	9
2.4. Lítium-ion akkumulátorok kombinált modellje	10
2.5. Az akkumulátor termikus modellje	12
2.6. Az identifikációs mérések hullámformái	14
2.7. Akkumulátor cella üresjárási feszültsége	17
2.8. Tisztán modell alapú becselő eljárás	19
2.9. Vegyes töltöttség becselő algoritmus hatásvázlata	20
3.1. A Li-ion akkumulátor modell paraméter-identifikációjának folyamata	23
3.2. Az identifikációs mérések blokkvázlata	24
3.3. Relaxációs szakasz és a rá illesztett két időállandós exponenciális görbe	29
3.4. A görbeillesztés abszolút hibája	30
3.5. Az R_0 paraméter töltöttségfüggése (2,5 A kisütőáram és 100 töréspont esetén)	30
3.6. A paraméter-identifikáció eredményei	32
4.1. Li-ion akkumulátor feszültségének linearizációja	35
4.2. Modell alapú SoC becselő Simulink modellje	36
4.3. Coulomb-counting becselő Simulink modellje	36
4.4. Modell alapú SoC becselő Simulink modellje	37
4.5. A PI megfigyelő Simulink modellje	37
4.6. A PI megfigyelő beállása különböző kezdeti hibákra	38
4.7. Kapocsfeszültség kompenzálása	39
4.8. Üresjárási feszültség hőmérséklet függésének meghatározása	40
4.9. Akkumulátor kapacitásának hőmérsékletfüggése	41

5.1. A modell verifikáció szimulációs környezete	42
5.2. A verifikációs mérések bemenetei	43
5.3. A becslő verifikáció szimulációs környezete	43
5.4. Modell verifikációs eredmények	44
5.5. Hibaeloszlás a modellezett és a mért feszültség között	44
5.6. Becslő verifikációs eredmények pontos kezdeti értékkel	45
5.7. A becsült töltöttség hibaeloszlása pontos kezdeti értékkel	45
5.8. Becslő verifikációs eredmények 10 %-os kezdeti hibával	46
5.9. A becsült töltöttség hibaeloszlása 10 %-os kezdeti hibával	46

1. Bevezető

Egy pontos akkumulátor állapotbecslő tervezése igen nehéz feladat. A mai villamos járművekben használt akkumulátorok viselkedése igen összetett. Az ipari követelmények ezzel együtt nagy kihívások elé állítják a kutató-fejlesztő mérnököket.

Egy modern biztonság- és küldetéskritikus akkumulátoros villamos rendszer energiaellátásának tervezése óhatatlanul maga után vonja az akkumulátor töltöttség becslésének problémáját. A gyakorlatban elterjedt módszerek nem minden alkalmazás számára megfelelőek. Az egyszerűbb, szórakoztatóiparban (laptopok, telefonok energiaellátása) használt megoldások nem használhatóak küldetéskritikus rendszerekben.

Egy villamos hajtású repülőgép esetében például a teljes repülés hosszát, a megtehető utat és az elvégezhető manővereket mind meghatározza, hogy mennyi energia áll rendelkezésre a pilóta számára. Ez jelenti az akkumulátoros rendszer küldetéskritikus voltát. Ez egyben biztonságkritikus is, hiszen rossz becslés esetén nincs lehetőség leparkolni, mint egy autóval, tehát jelen esetben emberélet elvesztésének kockázatáról van szó.

Emiatt fontos egy pontos, robusztus becslő módszer kifejlesztése, ami használható ilyen és ehhez hasonló biztonság- és küldetéskritikus rendszerekben. Ilyen megoldás lehet egy akkumulátor modellt használó módszer. Ahhoz viszont, hogy pontos modellt alkothassunk az akkumulátorokról, azok paramétereit a lehető legkisebb hibával meg kell határoznunk.

A paraméterbecslés egyik fő nehézségét jelenti, hogy megtaláljuk a kompromisszumot a szükséges pontosság és a paraméter-identifikáció folyamatának kivitelezhetősége között. Összetettebb modellek segítségével pontosabb, általánosabb érvényű akkumulátormodellt alkothatunk, ám ekkor számítanunk kell arra, hogy a modellparaméterek meghatározása jóval komplexebb feladattá válik. A Li-ion akkumulátorok nemlineáris viselkedést mutatnak, paramétereik töltöttség-, hőmérséklet- és terhelőáram-függők, emellett a paraméterek értékét befolyásolja az akkumulátorok elhasználódásának mértéke is [1], [2]. Ha mind ezen hatásokat figyelembe kívánjuk venni az akkumulátormodell felépítése során, igen hosszadalmas mérési sorozatot kell lefolytatnunk. Gyakran a megfelelő mérési körülmények előállítására is komoly nehézségekbe ütközik. A paraméterek hőmérséklet függésének pontos megállapítása állandó hőmérséklet értékek mellett elvégzett mérésekkel lenne kivi-

telezhető. Azonban az állandó cellahőmérséklet fenntartásához klímakamra szükséges [3]. Ilyen berendezés nem feltétlenül áll rendelkezésre egy átlagos felszereltségű ipari fejlesztőközpontban.

A komplexebb modellek paraméter-identifikációjára szolgáló mérések kiértékeléséhez szintén komoly matematikai apparátust és kompromisszumokat kell előírunk. A mérések kiértékelésekor elvi problémát jelent, hogy a töltöttségi szint nem közvetlenül mérhető fizikai mennyiség, hanem a kivett töltés és a cella kapacitásának hányadosából adódik. Ehhez a számításhoz azonban meg kell állapítani a tényleges kapacitást, ami ugyancsak nem adott és magától értetődő [4], [5].

Tekintettel kell lennünk arra is, hogy a dolgozat témáját képező modellt egy villamos jármű akkumulátor felügyeleti rendszerében kívánjuk fölhasználni: az alkalmazott FPGA-kban, mikrokontrollerekben erősen korlátozott erőforrás áll rendelkezésre más, szintén nélkülözhetetlen funkciók mellett, így minden paraméterfüggés figyelembe vételére nincsen lehetőségünk. Azonban a konkrét alkalmazás körülményeinek ismeretében a paraméterfüggések számát csökkenthetjük, például ha ismerjük az akkumulátorcellák jellemző üzemi terhelését, elhagyható az áramfüggés leképezése [1]. Megjegyzendő azonban, hogy az elektromos repülés új terület, nincsenek kialakult sztenderdek, a fölmerülő speciális igényekre várhatóan az autóiipari alkalmazásoktól jelentősen eltérő megoldások születnek majd a már említett biztonság- és küldetéskritikus jelleg miatt.

Dolgozatunkban bemutatunk egy vegyes modell alapú töltöttségi állapotbecslő algoritmust, mely később implementálható és validálható egy valós repülőgép akkumulátor felügyeleti rendszerében. Elvégeztük a kiválasztott akkumulátor modell paramétereinek identifikációját, majd ezeket az eredményeket felhasználva elvégeztük a modell és a becslő viselkedésének verifikációját.

2. Elméleti áttekintés

2.1. Akkumulátor modell és identifikációja

2.1.1. Alapfogalmak

Ebben a fejezetben áttekintjük a lítium-ion akkumulátorok modellezési lehetőségeit. Részletesen is bemutatjuk a jelen dolgozatban használt két időállandós kombinált villamos modellt, valamint a modellparaméterek identifikációjának lehetőségeit. A cellamodell áttekintése előtt bemutatjuk azokat az alapfogalmakat és rövidítéseiket, amelyekre dolgozatunkban többször is hivatkozunk.

Az akkumulátorok töltöttségének jellemzésére a szakirodalom többnyire az SoC-t vagy a DoD-t használja. Az SoC (State-of-Charge) értéke 100%, ha az akkumulátor teljesen feltöltött állapotban van. A DoD (Depth-of-Discharge) a kisütés mélysége, értéke teljes töltöttség mellett 0%. A két mennyiség közötti kapcsolatot a 2.1. összefüggés írja le.

$$DoD = 100\% - SoC \quad (2.1)$$

A DoD-t és az SoC-t százalék helyett gyakran a $0 \dots 1$ közötti tartományon adják meg. Az akkumulátorokban a használat során lezajló kémiai reakciók nem teljes mértékben reverzibilisek, emiatt a cellák öregednek, paramétereik megváltoznak. Az öregedés fokának jellemzésére a szakirodalom az SoH-t (State-of-Health) használja. Ha az SoH értéke 80%-ra csökken, akkor konvencionálisan az életciklus végéről beszélünk [3].

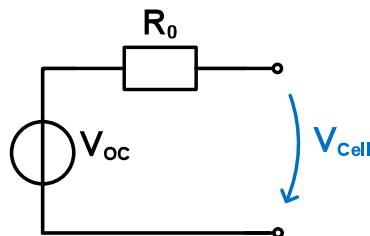
2.1.2. Akkumulátor modellek

A lítium-ion akkumulátorok viselkedésének leírására számos eltérő tulajdonsággal rendelkező modellt mutat be a nemzetközi szakirodalom. Az elektrokémiai modellek az akkumulátor kémiai viselkedését leíró parciális differenciálegyenleteken alapulnak, emiatt számításuk erőforrás- és időigényes [6]. Az elektrokémiai modellt elsősorban az SoH becslésre, az öregedés fokának számítására használják, a villamos járművek BMS-ében szükséges valósidejű alkalmazáshoz nem megfelelő [10]. Bonyolultsága mellett hátrányos tulajdon-

sága a nagy számú, nehezen identifikálható modellparaméter [3]. Egy másik lehetséges típus a matematikai modell, amely azonban rendkívül pontatlan, jellemzően 10 – 15%-os relatív hibával működik [6]. A harmadik típust a villamos modellek (az angol nyelvű szakirodalomban gyakran Thevenin-based model) képezik. Egyszerű áramköri elemekkel (feszültséggenerátorokkal, ellenállásokkal, kapacitásokkal) képezik le az akkumulátorok viselkedését. Pontosságuk kielégítő, paraméterezéstől és identifikációtól függően 1 – 10% is lehet, szimulációs szoftverekkel jól kezelhetők, feszültség-áram karakterisztikát adnak. Egyszerűségük és hatékonyságuk miatt könnyen implementálhatók a BMS-ben [3], [6]. Ezen tulajdonságok miatt dolgozatunkban villamos cellamodellt alkalmazunk.

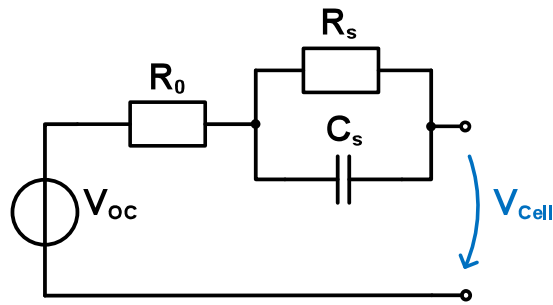
2.1.3. Villamos modellek

A következőkben bemutatjuk a villamos cellamodell típusait. Az IR (nulladrendű, másként belső ellenállás, angol terminológiával Internal Resistance) modell csupán két elemet tartalmaz. A cella üresjárási feszültségét egy ideális feszültségforrás, belső ellenállását egy soros ellenállás képezi le (2.1. ábra).



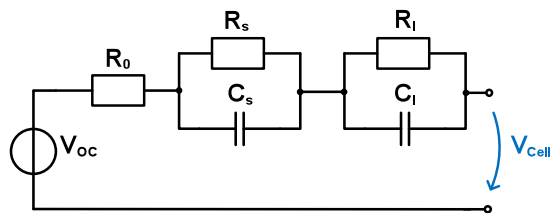
2.1. ábra. A lítium-ion akkumulátorok IR modellje

A lítium-ion cellák esetén megfigyelhető, hogy kapocsfeszültségük a kisütés vagy töltés utáni zérus áramú relaxációs időtartamok alatt exponenciálisan változik. Ezt a viselkedést nem képezi le az IR modell, változó terhelés esetén pontatlan eredményt ad. Ez a hiányosság azonban kiküszöbölhető: a kapocsfeszültség exponenciális változása modellezhető megfelelően választott időállandójú RC-tagok hatásaként. Az IR modellel sorosan kapcsolt n darab párhuzamos RC-taggal felépülő cellamodell már alkalmas a dinamikus viselkedés vizsgálatára is. Az OTC (elsőrendű, avagy egy időállandós, angolul One Time Constant) modellt $n=1$ esetre kapjuk (2.2. ábra).



2.2. ábra. A lítium-ion akkumulátorok OTC modellje

Azonban a relaxáció idején tapasztalható viselkedés pontosabb leírásához az OTC modellt még egy RC-taggal bővíthetjük ($n = 2$). Az egyik RC-tag a kis-, a másik a nagy időállandójú tranziensek leképezését teszi lehetővé. Az így kialakított modell a TTC (másodrendű vagy két időállandós, az angol szakirodalomban Two Time Constant) modell (2.3. ábra) [4], [11], [14].



2.3. ábra. A lítium-ion akkumulátorok TTC modellje

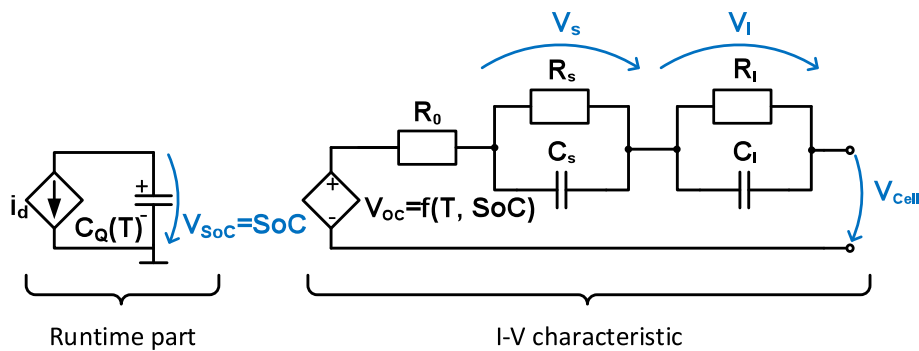
A bemutatott villamos modellek jól skálázhatók (a bemutatott topológiák a megfelelő skálátényezőkkal a cella szinttől teljes akkumulátorpakk szintig alkalmazhatók bizonyos hibatolerancia mellett), emellett könnyű további paraméterfüggőségeket kialakítani [1], [7]. Az akkumulátormodellek gyakorlati felhasználásakor szükséges a modellparaméterek ismerete, melyeket méréseken keresztül ismerhetünk meg [8], [9], [11]. Mérnöki szempontból lényeges, hogy az adott alkalmazás követelményeinek megfelelően megtaláljuk a kompromisszumot a paraméter-identifikációra fordított idő és a végeredményként kapott modell pontossága között [3], [11]. Ha például az alkalmazás szempontjából lényeges az akkumulátorok változó terhelés hatására mutatott viselkedésének leképezése, érdemes a TTC modellt választani annak árán is, hogy paraméter-identifikációja hosszú folyamat. A villamos cellamodellek komplexitásának, pontosságának és a paraméterbecslés nehézségének összehasonlítását a 2.1. táblázat tartalmazza.

Modell típusa	IR	OTC	TTC
Modell komplexitása	egyszerű	közepes	komplex
Paraméter-identifikáció	egyszerű	nehéz, hosszadalmas	nehéz, hosszadalmas
Pontosság változó terhelés esetén	dinamikus viselkedést nem képezi le	dinamikus viselkedést korlátozottan modellezi	dinamikus viselkedést is jól modellezi

2.1. táblázat. A Li-ion akkumulátorokra alkalmazható villamos modellek összehasonlítása

2.1.4. A kombinált villamos modell

A kombinált villamos modell egyesíti az úgynevezett Thevenin-, impedancia-alapú és futásidő alapú modellek előnyeit. Széles körben elterjedt, mivel viszonylag könnyen implementálható, jól skálázható, hatékony [1], [8], [9], [12], [13]. A kombinált modell topológiája 2.4. ábrán látható.



2.4. ábra. Lítium-ion akkumulátorok kombinált modellje

A modell „Runtime part” része az üzemidő alapú modellből származik, amely állandó terhelés esetén jól leírja a lítium-ion cella viselkedését, azonban változó terhelésre pontatlanul működik [6], [7]. Az üzemidő alapú részben C_Q a cella kapacitását képezi le, V_{SoC} a cella töltöttségi állapotát jelképező feszültség. A modell az akkumulátorcella önkisülésének leképezésére is alkalmas, ehhez a C_Q kapacitással párhuzamosan kötött ellenállással bővíthető. A modell „I-V characteristic” része egy Thevenin-modell, ami alkalmas a transzients viselkedés leírására. A V_{OC} forrás feszültsége a V_{SoC} -tól függ, ez adja meg az üzemidő alapú és a Thevenin-modell közti kapcsolatot. Az így kialakított modell segítségével leképezhető a lítium-ion akkumulátorok nemlineáris viselkedése is.

A villamos járművekben az akkumulátorpakk terhelése időben változó, ezért olyan

modellt kell választanunk, amely leképezi a lítium-ion cellák dinamikus viselkedését is, ez kizárja az IR modell alkalmazását. Így két időállandós modellt választottuk, ez ugyanis jó kompromisszumot jelent a modell pontossága és komplexitása között. Mindemellett modellünkben SoC-függő modellparamétereket kívánunk implementálni. Ezen indokok miatt végül a fent bemutatott kombinált modellt alkalmazzuk, két időállandós Thevenin modellel. Dolgozatunkban az akkumulátorcellák önkisülését elhanyagoljuk, mivel a korszerű lítium-ion cellák önkisülésének időállandója nagy ($< 1\%$ SoC/hó) a bevezetőben fölvázolt alkalmazás töltési-kisütési ciklusaihoz képest [1], [7].

A kombinált két időállandós villamos modell állapotterez leírása a 2.2. összefüggés szerint alakul. Az akkumulátorcella áramát (i_d) kisütéskor tekintjük pozitívnak.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{SoC}(t) \\ \dot{V}_s(t) \\ \dot{V}_l(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\tau_s} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{SoC}(t) \\ V_s(t) \\ V_l(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_Q} \\ \frac{1}{C_s} \\ \frac{1}{C_l} \end{bmatrix} i_d(t) \quad (2.2)$$

$$V_{cell}(t) = V_{OC}(t) - i_d(t)R_0 - V_s(t) - V_l(t) \quad (2.3)$$

$$\tau_s = R_s C_s \quad (2.4)$$

$$\tau_l = R_l C_l$$

A modell viselkedését leíró egyenletek integrális alakban is fölírhatók:

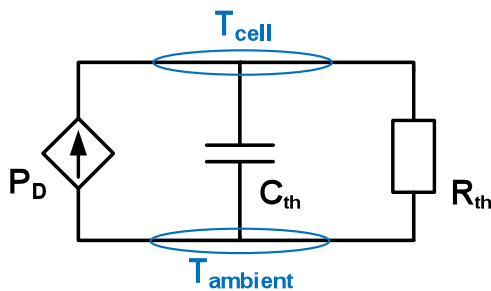
$$V_{SoC}(t) = V_{SoC,init} - \frac{1}{C_Q} \int_0^t i_d(\tau) d\tau \quad (2.5)$$

$$V_s(t) = \frac{1}{C_s} \int_0^t \left(i_d(\tau) - \frac{V_s(\tau)}{R_s} \right) d\tau \quad (2.6)$$

$$V_l(t) = \frac{1}{C_l} \int_0^t \left(i_d(\tau) - \frac{V_l(\tau)}{R_l} \right) d\tau \quad (2.7)$$

ahol $V_{SoC,init}$ a reprezentatív kapacitás kezdeti feszültsége. Az akkumulátorcella pa-

paraméterei hőmérsékletfüggők, így a pontosabb modellezéshez elengedhetetlen ezen hatás figyelembe vétele. A bevezetőben már említettük, hogy a paraméterek hőmérsékletfüggésének pontosabb megismerése klímakamrában, állandó hőmérsékleten végzett mérésekkel lehetséges, ilyen berendezés azonban munkánk során nem állt rendelkezésünkre. Ebben az esetben a modellezett akkumulátortípus gyári katalógusadatainak fölhasználásával becsülhetjük a paraméterek hőmérsékletfüggését. A hőmérsékletfüggés leképezéséhez modelleznünk kell az akkumulátorcellák termikus viselkedését. Dolgozatunkban a 2.5. ábrán látható hőmérsékleti modellt alkalmaztuk. Ez a modell az akkumulátor termikus viselkedését áramköri modellel képezi le, így a két időállandós kombinált villamos cellamodellhez hasonlóan kezelhető. A modellben P_D a töltés és kisütés során keletkező hő (áramgenerátorral reprezentálható), C_{th} a cella hőkapacitása, R_{th} az akkumulátorcella és a környezet közötti hőellenállás, $T_{ambient}$ a környezeti hőmérséklet és T_{cell} a cella hőmérséklete [1], [8].



2.5. ábra. Az akkumulátor termikus modellje

Az akkumulátorcella termikus viselkedését a 2.8. és 2.9. egyenletek írják le.

$$P_D = |V_{OC} - V_{cell}|i_d \quad (2.8)$$

$$T_{cell} = T_{ambient} + \frac{1}{C_{th}} \int \left(P_D - \frac{T_{cell} - T_{ambient}}{R_{th}} \right) dt \quad (2.9)$$

Ez az egyszerű termikus modell csupán két paraméterrel rendelkezik: R_{th} és C_{th} . A TTC modell paramétereire is hasonlóan ezeket is meghatározhatjuk mérésekkel. A hőkapacitás mérésének hagyományos módszere során vízbe kellene meríteni a mérendő objektumot, jelen esetben az akkumulátort, azonban a cella így rövidzárlatba kerülne, a túlhevülő elektrolit robbanást okozna. Emiatt a hagyományos módszer nem kivitelezhető, más me-

tódust kell választanunk a termikus paraméterek méréséhez. Ha az akkumulátorcellák állandó árammal történő kisütése közben mérjük azok hőmérsékletét, exponenciális jellegű időfüggvényt kapunk, a folyamat időállandóját meghatározhatjuk görbeillesztéssel [8]. A kapott termikus időállandót jelöljük τ_{th} -val.

$$\tau_{th} = R_{th}C_{th} \quad (2.10)$$

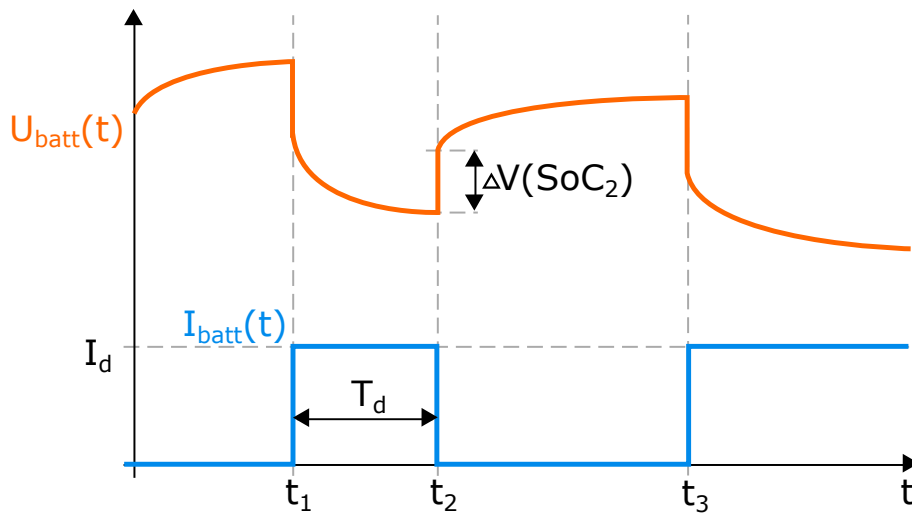
Mivel közvetlenül nem meghatározható a hőkapacitás, válasszuk konstans értéknek, a hőellenállás ezek után számítható az időállandóból és a rögzített hőkapacitásból.

$$R_{th} = \frac{\tau_{th}}{C_{th}} \quad (2.11)$$

2.1.5. A TTC modell paraméter-identifikációja

Az előbbieken leírt két időállandós villamos modell paraméterei mérésekkel meghatározhatók [8], [9], [11]. A mérések során a [11] által leírt mérési és számítási módszert követtük, melynek menetét és a számításokhoz használatos összefüggéseket az alábbiakban részletesen bemutatjuk. A TTC modell paraméter-identifikációjához olyan jelalakú árammal kell terhelni az akkumulátort, amely jól kiemeli annak dinamikus viselkedését. A mérések során az akkumulátorcellákat meghatározott hosszúságú négyszögimpulzusokkal kisütöttük (2.6. ábra - $I_{batt}(t)$), az impulzusok között elegendő relaxációs időt hagytunk a rövid és a hosszú időállandójú folyamatok kifejlődéséhez. A kisütési folyamat során mértük a cella kapocsfeszültségét ($U_{batt}(t)$). A TTC modell paraméterei a kapott feszültséggörbe egyes szakaszainak elemzésével számíthatók. A következőkben bemutatjuk a feszültséggörbe alakja és a modellparaméterek kapcsolatát.

A t_1 időpontot megelőzően a cella árama nulla, így ekkor töltöttsége nem változik, értéke SoC_1 . A $t_1 < t < t_2$ szakaszon állandó árammal sütjük ki a cellát. A kisütés során a cella töltöttsége, ennek megfelelően kapocsfeszültsége is csökken. A $T_d = t_2 - t_1$ idejű kisütés után a cella áramát megszakítjuk. Az akkumulátor töltöttsége ekkor éppen SoC_2 . Az áram megszakadásakor (azaz a t_2 időpontban) $\Delta V (SoC_2)$ nagyságú feszültségugrást tapasztalhatunk. Ezt a pillanatszerű hatást a TTC modell R_0 paramétere reprezentálja,



2.6. ábra. Az identifikációs mérések hullámformái

így a paraméter az aktuális SoC érték mellett a 2.12. összefüggés szerint számítható.

$$R_0(\text{SoC}) = \frac{\Delta V(\text{SoC}_2)}{I_d} \quad (2.12)$$

A $t_2 < t < t_3$ szakaszon az áram nulla értékű, így a cella töltöttsége folyamatosan SoC_2 (relaxációs szakasz). Eközben a kapocsfeszültség exponenciálisan növekszik. Az exponenciálisan növekedő feszültséggörbét vizsgálva meghatározható a TTC modell kis és nagy időállandója. Az exponenciális szakaszok időfüggvénye

$$u_{batt}(t) = V_{OC}(\text{SoC}_2) - v_s(t_2)e^{\frac{-t}{\tau_s}} - v_l(t_2)e^{\frac{-t}{\tau_l}} \quad (2.13)$$

A 2.13. időfüggvény általános alakja:

$$f(t) = A + Be^{-\alpha t} - Ce^{-\beta t} \quad (2.14)$$

ahol $A = V_{OC}(\text{SoC}_2)$ a cella üresjárási feszültsége az SoC_2 töltöttség mellett, a kis időállandójú összetevő paraméterei $B = v_s(t_2)$, $\frac{1}{\alpha} = \tau_s = R_s C_s$, a nagy időállandójú összetevő paraméterei $C = v_l(t_2)$, $\frac{1}{\beta} = \tau_l = R_l C_l$. Az identifikációs feladat további része

matematikai szempontból az A , B , C , α , β paraméterek meghatározásaként írható le. Ez megtehető például a legkisebb négyzetek módszerével történő görbeillesztéssel. Az illesztett görbe paramétereinek megállapítása után kiszámíthatók a tranzienseket leképező RC-tagok paraméterei a 2.15., 2.16., 2.17., 2.18. összefüggések segítségével.

$$R_s(\text{SoC}_2) = \frac{v_s(t_2)}{\left(1 - e^{\frac{-T_d}{\tau_s(\text{SoC}_2)}}\right) I_d} = \frac{B}{(1 - e^{-T_d\alpha}) I_d} \quad (2.15)$$

$$R_l(\text{SoC}_2) = \frac{v_l(t_2)}{\left(1 - e^{\frac{-T_d}{\tau_l(\text{SoC}_2)}}\right) I_d} = \frac{C}{(1 - e^{-T_d\beta}) I_d} \quad (2.16)$$

$$C_s(\text{SoC}_2) = \frac{\tau_s(\text{SoC}_2)}{R_s(\text{SoC}_2)} = \frac{1}{\alpha R_s(\text{SoC}_2)} \quad (2.17)$$

$$C_l(\text{SoC}_2) = \frac{\tau_l(\text{SoC}_2)}{R_l(\text{SoC}_2)} = \frac{1}{\beta R_l(\text{SoC}_2)} \quad (2.18)$$

Az üresjárási feszültség értéke:

$$V_{OC}(\text{SoC}_2) = A \quad (2.19)$$

Ezzel a módszerrel tehát adott SoC esetére a ΔV feszültségugrásokból az R_0 , az exponenciálisan növekedő feszültséggörbe-szakaszokra illesztett két időállandójú exponenciális görbék paramétereiből a V_{OC} , R_s , R_l , C_s és C_l paraméterek meghatározhatók. Ha a mérést az akkumulátor teljesen feltöltött állapotából indítjuk, majd meghatározott hosszúságú áramimpulzusokkal, kellően hosszú relaxációs időket alkalmazva a cella katalógusában megadott minimális feszültség (cut-off voltage) eléréséig végezzük a kisütést, több töltöttségérték mellett kiszámíthatjuk a modellparamétereket. Ezáltal az akkumulátormodell paraméterei SoC-függővé tehetők. A mérést különböző hőmérséklet értékek mellett megismételve a hőmérsékletfüggés is meghatározhatóvá válna. Megjegyzendő, hogy ugyanezzel a módszerrel a töltés közben érvényes modellparaméterek is identifikálhatók: a teljesen kisütött cellákat négyszög alakú impulzusokkal kell feltölteni, az impulzusok között megfelelő relaxációs időket kell hagyni. A paraméterek számítására megadott összefüggések töltés alatt is érvényesek.

2.2. SoC becselő eljárások

Ebben a fejezetben bemutatjuk a legelterjedtebb töltöttségi állapotbecslő eljárásokat, azok előnyeit valamint hátrányait.

2.2.1. Coulomb-counting

A legegyszerűbb töltöttség becselő eljárás a töltésszámlálás (Coulomb-counting, CC) [15]. Ennél a módszernél semmilyen akkumulátor, illetve technológia függő paramétert nem veszünk figyelembe. A töltöttségi szint meghatározásához folyamatosan mérjük a kisütőáramot. Az áram és az eltelt idő alapján számoljuk az elhasznált töltés mennyiségét a 2.20. képlet alapján számoljuk,

$$SoC_{\hat{C}} = SoC_{init} - \frac{1}{C_Q} \int_0^t i_d(t) dt \quad (2.20)$$

ahol $SoC_{\hat{C}}$ a becsült töltöttség, SoC_{init} a kiindulási töltöttségi szint, C_Q a névleges kapacitás és i_d a terhelő áram, kisütéskor pozitív.

Egyetlen előnye ennek az eljárásnak az egyszerűsége [5]. Nem kell hozzá nagy számítási kapacitás, kis teljesítményű beágyazott rendszerekben is tökéletesen használható. Az integrálás például előrelépő Euler módszert alkalmazva egy szorzássá és összegzéssé egyszerűsödik, így összetettebb műveletvégző egységek nélkül is elvégezhető.

Hátránya a képletből is látszik, pontos SoC becsüléshez tudnunk kell pontosan a kezdeti értékét, valamint minden időpillanatban a kisütőáramot. A kezdeti érték meghatározása nehéz feladat, de megfelelő módszerekkel nagy pontossággal közelíthető (lásd bővebben 2.2.3. és 4.2.2. fejezetek). A legnagyobb probléma ezzel a módszerrel az áram pontos értékének mérése. Az akkumulátoros rendszerek terhelő árama a legtöbb esetben dinamikusan és széles tartományon mozog. Ahhoz, hogy megfelelő pontossággal használhassuk a CC módszert az áramtartomány minden pontján jól kell tudnunk áramértéket mérni, ami a legtöbb esetben nem, vagy csak nagyon nehezen kivitelezhető. Az árammérés eredménye ha kicsit is zajos - ami pedig az esetek nagy részében igaz főképp egy nagy teljesítményű hajtásban - akkor láthatóan a hibát akkumuláljuk. Továbbá nyílt hurkú integrálásról

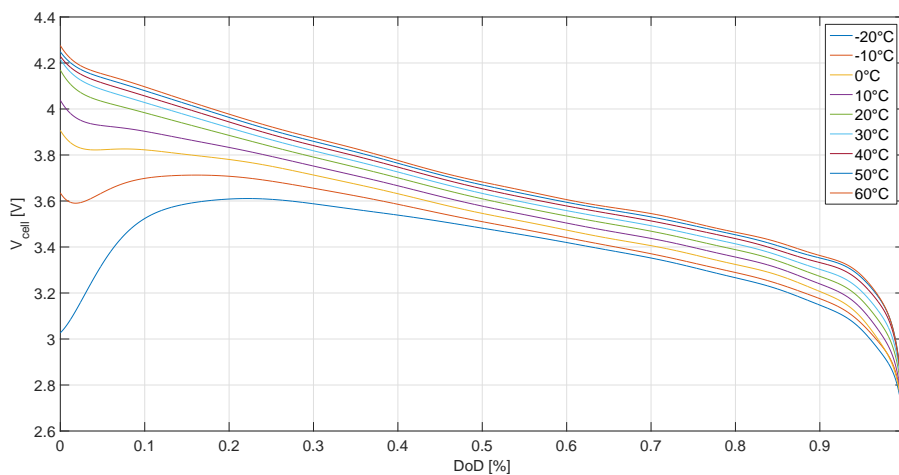
lévén szó, igen csak instabil, rossz időlépték megválasztása esetén könnyen divergálhat a valódi értéktől.

Pontatlansága ellenére előszeretettel használják egyszerűsége végett. A szórakoztató elektronikai mobil eszközben (pl.: mobiltelefon, laptop) ezt a módszert használják.

2.2.2. Üresjárású feszültség (OCV) alapú becslés

Napjainkban legelterjedtebb akkumulátor technológiák Li-ion alapúak. Ezeknél az akkumulátor típusoknál a cellák üresjárású feszültsége és töltöttségi szintje között egyértelmű megfeleltetés van [16]. Az ilyen akkumulátor cellák üresjárású feszültsége (Open Circuit Voltage, OCV) nemlineáris függésben van többek között az SoC-vel, illetve a hőmérséklettel. Ezekon kívül az OCV több függőséget is mutat, de a legtöbb alkalmazás esetén ennek a két paraméternek a hatása a legfontosabb.

Gyártók az adatlapokban megadják az akkumulátorok tipikus kisütési karakterisztikáit, melyek kis áramterhelés (tipikusan 0,1C) esetén tekinthetők üresjárású feszültségnek. A legtöbb gyártó megadja ezek hőmérséklet függését is (2.7. ábra).



2.7. ábra. Akkumulátor cella üresjárású feszültsége

Ezeket a görbéket felhasználva meghatározhatjuk egy akkumulátor cella feszültségéből annak töltöttségi szintjét. Előnye ennek az eljárásnak a CC módszerrel szemben, hogy feszültséget mérünk, mivel ez szűkebb tartományon mozog (Li-ion cellánál 4,2 – 2,5 V), ennek érzékelése pontosabb, így pontosabb SoC becslést adhatunk.

Nagy hátránya, hogy ez csak terheletlen esetekre alkalmazható. Áramterhelés mellett a belső veszteségeken eső feszültség miatt hibás eredményt kapnánk. Emiatt olyan alkalmazásokban, ahol folyamatos áramterhelés mellett kell ismernünk a töltöttségi szintet, ez nem alkalmazható. Ezzel szemben ahol nem folyamatos a terhelés, használható például töltő egységekben, ahol a töltési ciklus végén időnként megszakítják a töltést SoC mérés céljából.

2.2.3. Kombinált OCV és CC becslő

Az előzőekben tárgyalt eljárások előnyeit egyesíti a kombinált OCV-CC becslő. Ennek alapja egy ismert OCV görbe vagy görbesereg. Ez alapján a görbe alapján a terhelés akkumulátorra kapcsolása előtt meghatározzák a kezdeti SoC értéket, ezzel pontos becslést adva a kisütés elején.

Amint a terhelőáram értéke nullától különböző, átváltunk CC állapotbecslőre, ami az említett módon a terhelőáram integrálásával határozza meg ez elhasznált töltés mennyiségét.

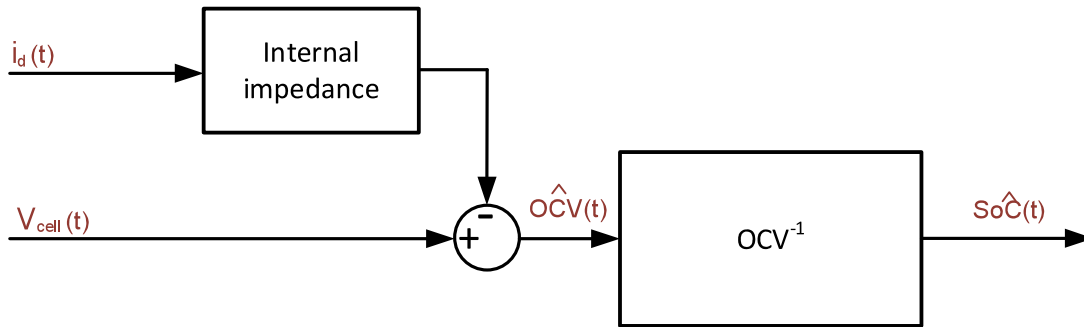
A módszer előnye az egyszerű OCV becslővel szemben, hogy terhelés mellett is használható, viszont ugyan az a hátránya megvan, mint a Coulomb-counting módszernek, az áramérzékelés hibája akkumulálódik (drift) illetve diszkrét idejű, implementált formája instabil.

2.2.4. Tisztán modell alapú töltöttség becslők

Az eddig tárgyalt SoC becslő eljárások egyike sem vette figyelembe az akkumulátor cellák technológiájából fakadó sajátos viselkedéseit. A továbbiakban olyan eljárásokról lesz szó, melyek a alkalmazott akkumulátor valamilyen modelljét tartalmazzák. A különböző akkumulátor modelleket a 2.1. fejezetben tárgyaljuk.

Akkumulátor modelleket alkalmazó becslő eljárások közül a legegyszerűbb, ha a felületes rendszerben csak az akkumulátor modelljét futtatjuk, annak viselkedése alapján határozzuk meg a töltöttség mértékét. Ennek hatásvázlata látható a 2.8. ábrán. Az SoC becsléséhez először megbecsüljük az akkumulátor belső impedanciáján eső feszült-

séget, majd ezt kivonva a mért kapocsfeszültségből megkapjuk az üresjárási feszültség becslőjét (\hat{OCV}). Ebből a becslt feszültségből inverz kisütési karakterisztikát felhasználva állítjuk elő a becslt töltöttségi szintet (\hat{SoC}).



2.8. ábra. Tisztán modell alapú becslő eljárás

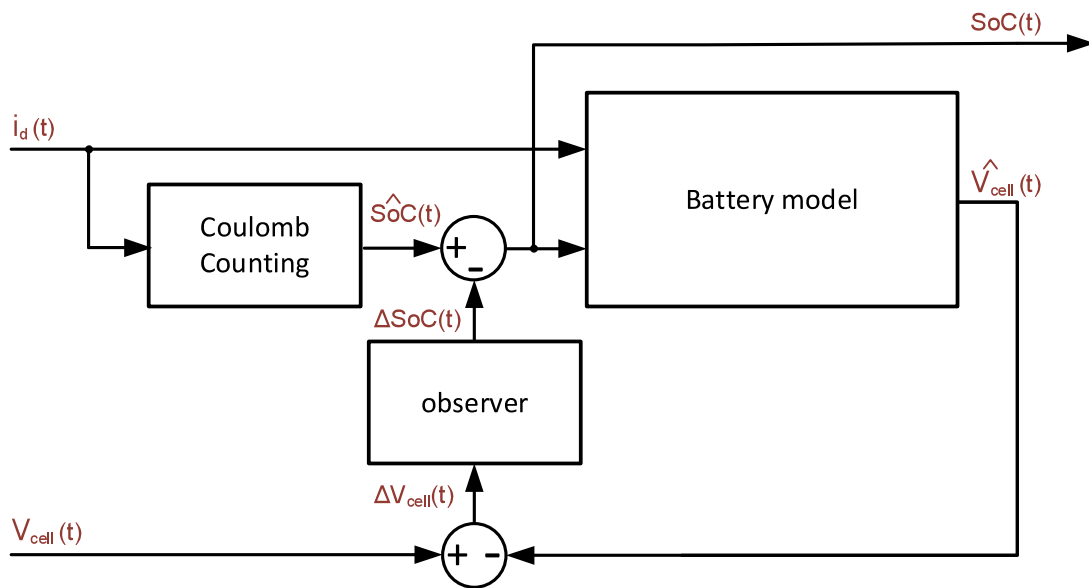
Ennek a módszernek előnye, hogy kevés mérés segítségével képes a töltöttségi szint becslésére, ezzel szemben pontos akkumulátor modellt igényel. Mivel a becslt SoC csak a modellből származik, nyílt hurokban működik, ezért igen pontos akkumulátor modell szükséges jó becslőhöz. Emiatt a tisztán modell alapú becselőket nem szokták alkalmazni.

2.2.5. Vegyes töltöttség becslő algoritmusok

Az előzőekben láthattuk, hogy egy akkumulátor modellt tartalmazó becslő létrehozása visszacsatolás nélkül nehezen kivitelezhető. Ennek feloldására vegyes becslő eljárásokat használnak, melyek az akkumulátor modelljén kívül tartalmaznak egy egyszerű SoC becslő módszert is, mely tipikusan a Coulomb-counting.

Ebben az eljárásban elvégzünk egy kezdetleges becslést a CC algoritmus segítségével (2.9. ábra), majd ennek az eredményét használjuk fel a modellünkben. Az itt használt modellek bemeneteként szerepel a terhelő áram mellett a töltöttségi szint is, melyből meghatározza az akkumulátor kapocsfeszültségét. A továbbiakban ezt a modellezett kapocsfeszültséget hasonlítjuk össze a mért cella feszültséggel. Az így kapott feszültség hibát pedig felhasználjuk a becslt SoC korrekciójára.

Ahhoz, hogy a módszer jól működjön, valamilyen megfigyelőt kell a körbe helyezni, mely a modellezett és mért kapocsfeszültségek hibájából korrigálja a becslt SoC értékét. Aszerint, hogy milyen megfigyelőt alkalmazunk, a megoldás lehet lineáris vagy nemlineáris.



2.9. ábra. Vegyes töltöttség becslő algoritmus hatásvázlata

Lineáris megfigyelőt alkalmazó megoldások tipikusan egy PI megfigyelőt (observer) tartalmaznak [4], [17]. Mint azt a 2.1.4. fejezetben írtuk, az akkumulátorok különböző paraméterei nemlineáris függést mutatnak több tényezőre is, ennek ellenére nagy pontosságú megoldást kaphatunk lineáris megfigyelő használatával is.

Ha megfigyeljük a 2.7. képen látható kisütési karakterisztikákat, láthatjuk, hogy 10-90% töltöttségi szint között az akkumulátorok feszültsége jó közelítéssel lineáris viselkedést mutat. A legtöbb alkalmazásban nem lépjük át ezt a tartományt, ennek több oka is van.

A Li-ion akkumulátorok kémiaiájából fakadóan, megfigyeléseken alapulva tipikusan 80 %-os kihasználtság mellett az élettartam több mint 25 %-kal növelhető. Amennyiben többször is 90-100 %-ig kisütjük, a cellák SoH-ja drasztikusan lecsökken, ami a kapacitás csökkenésével, a belső impedancia növekedésével jár. Másik oka, hogy küldetéskritikus rendszerekben nem használjuk ki a teljes kisütési tartományt, a biztonsági tartalék kérdése. Egy elektromos repülőben a biztonsági és védelmi határértékektől minél távolabb, de még jelentős kapacitásvesztés nélkül határozzák meg a működési tartományt, melyet a 10-90% SoC tartomány igen jól biztosítja. Ezen okok miatt a cella üresjárési feszültségének linearizálásával jó megoldást kaphatunk PI megfigyelő alkalmazásával is.

Amennyiben rendelkezésre áll elegendő erőforrás, lehetőségünk van nemlineáris megfigyelő implementálására, mely tipikusan egy kiterjesztett (extended) Kalman-szűrő alapú

megfigyelő. Ennek előnye, hogy nagy pontossággal képes prediktálni az optimális állapotváltozót, esetünkben az SoC-t [18],[19].

Hátránya a kiterjesztett Kalman-szűrőt alkalmazó megoldásnak, hogy nagy számítási kapacitást igényel, mátrixműveletek elvégzését vonja maga után, ami kisebb teljesítményű beágyazott rendszerekben nehezen, vagy nem megvalósítható.

Mindezeket figyelembe véve dolgozatunkban egy lineáris PI-megfigyelőn alapuló akkumulátor modellt tartalmazó SoC becselő algoritmust valósítottunk meg.

3. Paraméter-identifikáció

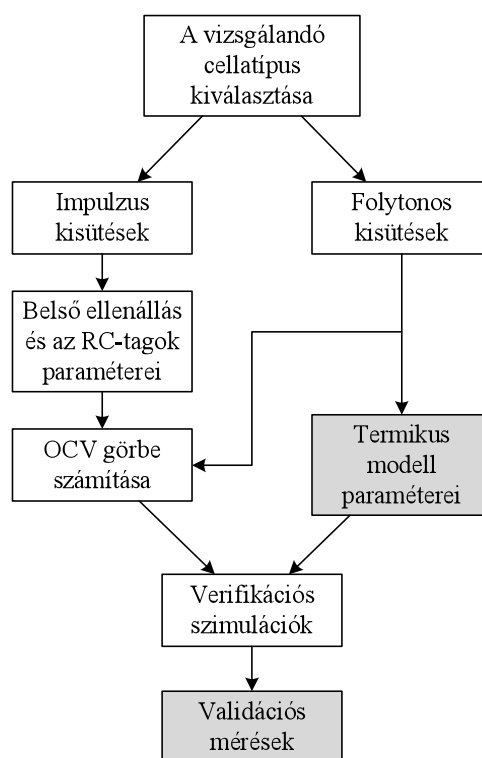
A dolgozat során a 2.1.5. fejezetben bemutatott identifikációs módszert követve határoztuk meg a két időállandós villamos akkumulátormodell paramétereit. Ebben a fejezetben részletesen is bemutatásra kerül az elvégzett mérések menete és a paraméterek kiszámításának folyamata.

3.1. A mérések menete

A mérések definiálásakor kérdésként merült föl, hogy hány különböző SoC érték mellett szükséges megmérni a modellparamétereket a bevezetőben leírt biztonság- és küldetés-kritikus alkalmazás támasztotta követelményeknek megfelelően pontos modell eléréséhez. Emellett arra a kérdésre is kerestük a választ, hogy a kiválasztott akkumulátortípus modellezésekor szükséges-e a modellparaméterek áramfüggését figyelembe venni, vagy elegendően pontos modellt kapunk az áramfüggés elhanyagolásával. Annak érdekében, hogy az akkumulátorcellákon esetlegesen korábban végrehajtott töltési- és kisütési ciklusok miatt bekövetkező változások ne befolyásolják a mérések eredményeit, minden mérést egy új akkumulátorcellán végeztünk el. A modellparaméterek eltérő értékűek töltéskor és kisütéskor, azonban munkánk során a kisütés alatt érvényes paraméterek meghatározására koncentráltunk. A bevezetőben fölvázolt alkalmazás esetén ugyanis föltehető, hogy a villamos repülő akkumulátorait a járműtől szeparáltan töltik, menet közben csak kisütés történik. Így a töltéskor érvényes modellt elegendő a töltőelektronika szabályozójában implementálni, a jármű energiamenedzsment rendszere számára a kisütéskor érvényes modell ismerete az, ami kritikus. Emiatt dolgozatunk készítése során csak a kisütésre érvényes modellt határoztuk meg, a méréseket is csak kisütésre végeztük el.

A paraméter-identifikáció folyamata a 3.1. ábrán követhető. Az ábrán a szürke háttérrel jelölt lépések elvégzését jövőbeli feladatként tűztük ki, mint a hőmodell identifikációja és egy valós BMS-ben való implementálást követő validáció.

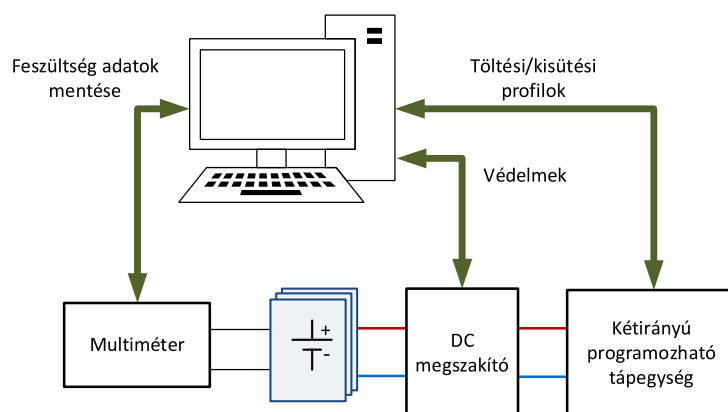
Az egyes méréseket megelőzően az akkumulátorcellákat teljesen feltöltöttük CC-CV töltési módszerrel. Az akkumulátorcellák töltése és kisütése scriptek segítségével programozható, kétirányú teljesítményáramlást lehetővé tevő tápegységgel történt. Ez a beren-



3.1. ábra. A Li-ion akkumulátor modell paraméter-identifikációjának folyamata

dezés tárolja a cella kapocsfeszültségének és kisütőáramának időbeli alakulását, emellett számítja az akkumulátorból kivett töltés és energia mennyiségét. Egy-egy akkumulátorcella feszültsége 2,5 és 4,2 V között változhat, a kisütő berendezés azonban 0-65 V-os feszültségtartományon használható. Emiatt – bár a tápegység is képes a feszültség értékeit rögzíteni, pontossága nem elegendő a kiválasztott identifikációs módszer alkalmazásához – a cellák kapocsfeszültségét precíziós, gyárilag kalibrált asztali multiméterrel is mértük, a paraméterek meghatározásának folyamata során a multiméteres mérések eredményeit használtuk fel (3.2. ábra).

A mérésorozat mérései két fő típusba sorolhatók. Az identifikált paraméterek és az állapotbecslő verifikációjához több különböző konstans áram értékkel történő kisütést (a továbbiakban: folytonos mérés), valamint impulzus üzemi kisütést is végeztünk. Az impulzus üzemi mérések során a cellákat adott hosszúságú áramimpulzusokkal (négyzetimpulzusokkal) sütöttük ki, a kisütőimpulzusok között 120 s relaxációs időt hagytunk. Az előzetesen elvégzett tesztek tapasztalatai alapján ugyanis 120 s elteltével már állandósul a kiválasztott típusú akkumulátorcella kapocsfeszültsége, ez az időtartam tehát elegen-



3.2. ábra. Az identifikációs mérések blokkvázlata

dően hosszú a nagy időállandójú folyamatok vizsgálatához is. A munkánk során részben arra kerestük a választ, hogy milyen felbontással kell ismernünk a modellparamétereket a megfelelően pontos modell felállításához. A továbbiakban azokat az időpontokat, illetve SoC értékeket, amelyeknél a kisütési folyamatot megállítottuk, töréspontoknak nevezük. Ezekben az időpontokban kezdődnek a relaxációs szakaszok, melyek elemzésével az aktuális töréspontban megismerhetők az RC-tagok paraméterei. Pontosabb modell létrehozásához a lehető legtöbb töréspont fölvétele szükséges, azonban a nagy számú töréspont alkalmazása a mérések időtartamát jelentősen növeli. A mérések időtartamának növekedése végső soron az adott berendezés fejlesztésének idejét növeli, a termék fejlesztésére fordított időt, így költségét nem növelhetjük tetszőlegesen. A töréspontok számának meghatározásakor tekintettel kell lenni a kisütést végző berendezés fizikai korlátaira is. A töréspontok számának növekedése ugyanis a kisütőimpulzusok időbeli rövidülését vonja maga után. Tetszőlegesen rövid impulzusok azonban nem állíthatók elő, mivel a szabályozó csak véges idő alatt képes föl- illetve leszabályozni a cellák kisütőáramát, így a túlságosan rövid impulzusok már nem tekinthetők négyszögimpulzusnak, a kiválasztott identifikációs módszer számára nem lennének megfelelőek az így nyert feszültséggörbék.

Ezen megfontolások alapján az impulzusüzemű méréseket 10, majd 100 darab töréspont fölvételével végeztük. Így 10 illetve 100 relaxációs szakasz elemzésével 10 illetve 100 eltérő SoC érték mellett határoztuk meg a modellparamétereket. Tíz töréspontnál kevesebb esetén ugyanis nem határozható meg kellő felbontásban a modellparaméterek értéke, az ismert pontokra illesztett görbe a valós értékektől jelentősen eltérő alakú lehet. Száz-

nál jelentősen több töréspont alkalmazása azonban már a fent leírt korlátokba ütközik, az impulzusok hossza túlságosan lerövidül. A kisütéshez szükséges impulzusok darabszámát az impulzusok hosszának megfelelő megválasztásával állítottuk be. A szükséges impulzus-hosszakat a 3.2., a teljes mérés időtartamát a 3.3. összefüggés szerint számítottuk.

$$t_{meas,continuous} = \frac{C_Q}{I_d} \quad (3.1)$$

$$t_{step} = \frac{t_{meas,continuous}}{n} \quad (3.2)$$

$$t_{meas,pulse} = n \cdot (t_{step} + t_{relax}) (t_{meas,continuous} - n \cdot t_{step}) \quad (3.3)$$

ahol C_Q az akkumulátorcella kapacitása (a katalógusban adott Ah dimenziójú érték), I_d az alkalmazott kisütőáram nagysága, n a töréspontok darabszáma, t_{step} az egyes kisütőimpulzusok hossza, t_{relax} a relaxációs szakasz időtartama, $t_{meas,continuous}$ a folytonos mérés időtartama, $t_{meas,pulse}$ az impulzus üzemű mérés időtartama.

Az állapotbecslő kialakítása során cél a minél egyszerűbb, a lehető legkevesebb modellparamétert és függőséget tartalmazó modell létrehozása, amely kielégíti a biztonság- és küldeteskritikus alkalmazás támasztotta pontossági követelményeket. A TTC modell paraméterei a valóságban természetesen áramfüggők, de érdemes megvizsgálni az áramfüggés mértékét. Ha ugyanis az áramfüggés kis mértékű, akkor a modellezés során elhanyagolhatjuk ezt a hatást. Az impulzus üzemű mérések az áramfüggés mértékének megállapítása érdekében 10 illetve 2,5 A áramerősség mellett is megtörténtek. A 10 A-es impulzus üzemű méréseket több akkumulátorcellával több alkalommal is elvégeztük, a mérési eredményeket átlagolásával igyekeztünk kiküszöbölni a modellparaméterek gyártási szórásának hatását. Az elvégzett mérések fontosabb adatait a 3.1. táblázatban foglaltam össze.

A paraméterek hőmérsékletfüggésére irányuló mérések elvégzésére tehát a már említett okból nem volt lehetőségünk. A modellparaméterek hőmérsékletfüggését azonban mégsem hanyagoljuk el teljesen: a kiválasztott akkumulátorcella gyári katalógusa megadja a kisütési görbéket különböző hőmérsékleteken, ezen görbék adatai alapján korrigáljuk a modellparamétereket (lásd bővebben 4.2.3. fejezet). Az akkumulátorcellák gyártója föltehetőleg nagy számú cellán, megfelelően biztosított hőmérséklet mellett végezte a mé-

Mérés jellege	Kisütőáram (A)	Kisütés ideje az egyes lépésekben (sec)	Az egyes mérések ideje	Az elvégzett mérések száma
10 impulzus	10	90	36 perc	3 cellával 2-2 mérés
100 impulzus	10	9	3 óra 44 perc	3 cellával 1-1 mérés
10 impulzus	2,5	370	1 óra 23 perc	1 cellával 1 mérés
100 impulzus	2,5	37	4 óra 25 perc	1 cellával 1 mérés
Folytonos	1	-	2 óra 36 perc	1 cellával 1 mérés
Folytonos	2,5	-	1 óra 3 perc	1 cellával 1 mérés
Folytonos	10	-	16 perc	1 cellával 1 mérés
Folytonos	20	-	< 8 perc	1 cellával 1 mérés

3.1. táblázat. Az elvégzett paraméter-identifikációs mérések lefolyása

réseket, így a katalógusadatokat a dolgozatban kitűzött céloknak megfelelően pontosnak tekinthetjük.

3.2. A mérési eredmények feldolgozása

A mérések eredményeként kapott adatok feldolgozását MATLAB segítségével végeztük. Az átláthatóbb programkód elérése érdekében az egyes részfeladatokat külön-külön függvényekben valósítottuk meg. Ebben az alfejezetben a paraméter-identifikáció során elvégzett részfeladatokat mutatjuk be.

3.2.1. Az árammérés korrekciója, a cella kapacitásának meghatározása

A kisütést végző berendezés maximális árama egy akkumulátorcella megengedett maximális áramához képest nagy, akár 385 A kisütőáramot is képes előállítani. Ennek megfelelően a berendezés áram érzékelése kis áramok esetén pontatlan, néhány tized A értéket jelez ki akkor is, amikor a valóságban 0 áram folyik. Bár a programozható tápegység számítja az akkumulátorból kivett töltés mennyiségét ez a számítás pontatlanná válik, hiszen alapja az árammérés. A probléma megoldására az áramerősség mérési eredményeit az adatok feldolgozása során korrigáltuk, az 1 A-nál kisebb értékeket 0-val helyettesítettük. Ezek után elvégeztük az Ah számítás korrekcióját is. A kivett töltés mennyisége a

kisütőáram idő szerinti integráljaként kapható.

$$Q(t) = \int_0^t I_d(\tau) d\tau \quad (3.4)$$

Az integrálást a MATLAB scriptben bal oldali téglalapszabállyal közelítettük:

$$Q[k] \cong \sum_{i=0}^k I_d[i] \Delta\tau \quad (3.5)$$

ahol $\Delta\tau$ mintavételi idő, $Q[k]$ a k -edik mintavételkor érvényes Ah érték, $I_d[i]$ a kisütőáram értéke az i -edik mintavétel időpontjában.

A túl kis áram értékek helyettesítése és a téglalapszabállyal történő közelítés elegendően kis hibát okoz, ugyanis a kisütőimpulzusok közelítőleg négyszög alakúak. A kivett töltés mennyisége a mérés elején 0 kezdőértékű, az integrálást a mérés végéig folytatjuk.

3.2.2. Az SoC számítása a verifikációs szimulációkhoz

A verifikációs szimulációkhoz praktikus a 3.2.1. fejezet szerint korrigált Ah értékek alapján az SoC időbeli változásának meghatározása is. Ennek eredményeképp összehasonlíthatóvá válnak az így megmért SoC értékek az állapotbecslő által számított eredményekkel, a tapasztalt eltérés a számított modellparaméterek és az állapotbecslő hatékonyságának mérőszáma lehet. Az SoC számítása során a kisütés alatt kivett töltés mennyiségét viszonyítjuk az akkumulátor teljes kapacitásához. A számítás során használt összefüggés a 3.6. szerint alakul.

$$SoC[k] = \left(1 - \frac{Q_{Ah}[k]}{Q}\right) \cdot 100[\%] \quad (3.6)$$

$SoC[k]$ az SoC értéke a k -edik mintavétel pillanatában (%-ban kifejezve), $Q_{Ah}[k]$ az akkumulátorból kivett töltés mennyisége a k -edik mintavétel pillanatában, Q az akkumulátor kapacitása – munkánk során a katalógus névleges paramétere helyett a mérések alapján meghatározott kapacitás értékkel számoltunk (4.2. fejezet).

3.2.3. A töréspontok kiszámítása

Az értékeket az egyes töréspontokban ismerhetjük meg a mérésekből, így alapvető fontosságú az egyes töréspontokban érvényes SoC értékek meghatározása. A töréspontok keresését egy MATLAB-ban megvalósított állapotgép végzi, amely a mért kisütőáram-jelalak alapján dolgozik. Ha az áram az I_d értékről nullára csökken, relaxációs szakasz kezdődik, az ehhez a mintavételi időponthoz tartozó SoC értéket el kell tárolnunk egy töréspontként.

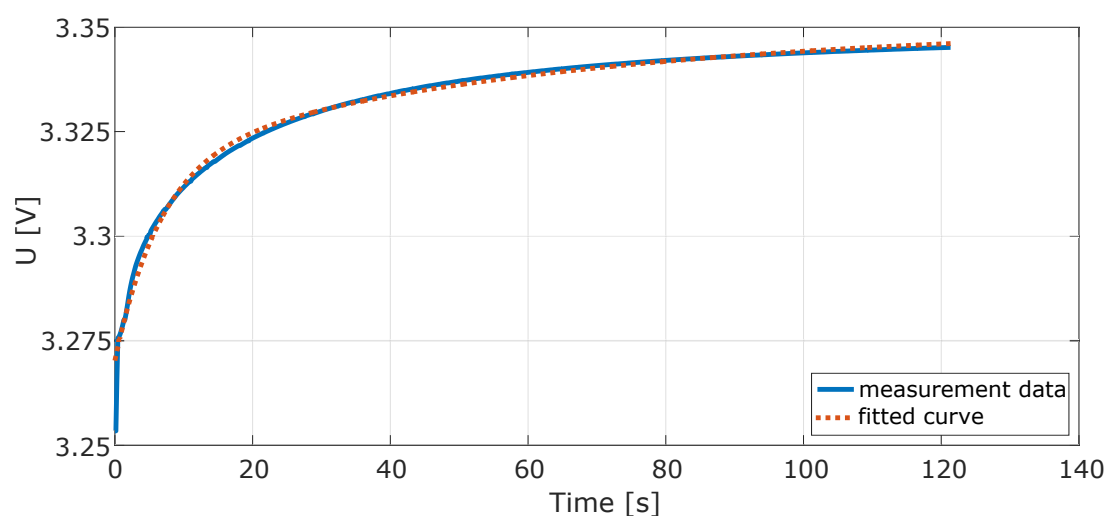
3.2.4. A kisütési és relaxációs szakaszok szétválasztása

A TTC modell paramétereinek meghatározásakor meg kell különböztetnünk a kisütési és a relaxációs szakaszokat, a már ismertett identifikációs módszer ugyanis az egyes szakaszok közti feszültségugrások, illetve a relaxációs szakaszokra illesztett görbék paramétereinek ismeretét igényli. A szakaszok elkülönítése során az elkészített MATLAB függvény végighalad a feszültségmérés összes mintáján, eközben a feszültségugrásokat keresi. Ha két minta között 1 mV-nál nagyobb ugrást talál, az az áram ki- vagy bekapcsolására utal, ez a pont lesz a kisütési és relaxációs szakasz határa. A valóságban az akkumulátorcella kapocsfeszültsége folytonosan változik, azonban az adatok számítógépes rögzítését csak mintavétellel tudjuk megoldani. Így előfordulnak olyan minták, amelyek éppen a két feszültségérték közötti véges idejű átmenet alatt kerültek regisztrálásra. Ezen mintákat figyelmen kívül kell hagyni az adatok feldolgozása során, ezzel elkerülve a modellparaméterek hibás számítását. Emiatt pusztán a megadott nagyságú ugrások keresése nem elegendő, az algoritmus az alábbiak szerint módosul. Ha 1 mV-nál nagyobb ugrást találunk, az bizonyosan az előző kisütési vagy relaxációs szakasz vége, de nem tekinthető a következő szakasz kezdőpontjának. A program ekkor előretekint néhány adatponttal: ha 5 adatponton belül nincs 25 mV-nál nagyobb ugrás, akkor valóban megtaláltuk a soron következő szakasz kezdetét, ha nem, a program egy mintával tovább lép, és újból előretekint. A módszer helyesen működik, mert az ilyen módon elhagyandó pontok száma az egyes feszültségugrások során maximum 2, tipikusan 1 vagy 0. A függvény végül a szétválasztott feszültséggörbe-szakaszokat a további feldolgozásig megfelelő adatszerkezetbe menti.

3.2.5. A TTC modell paramétereinek számítása

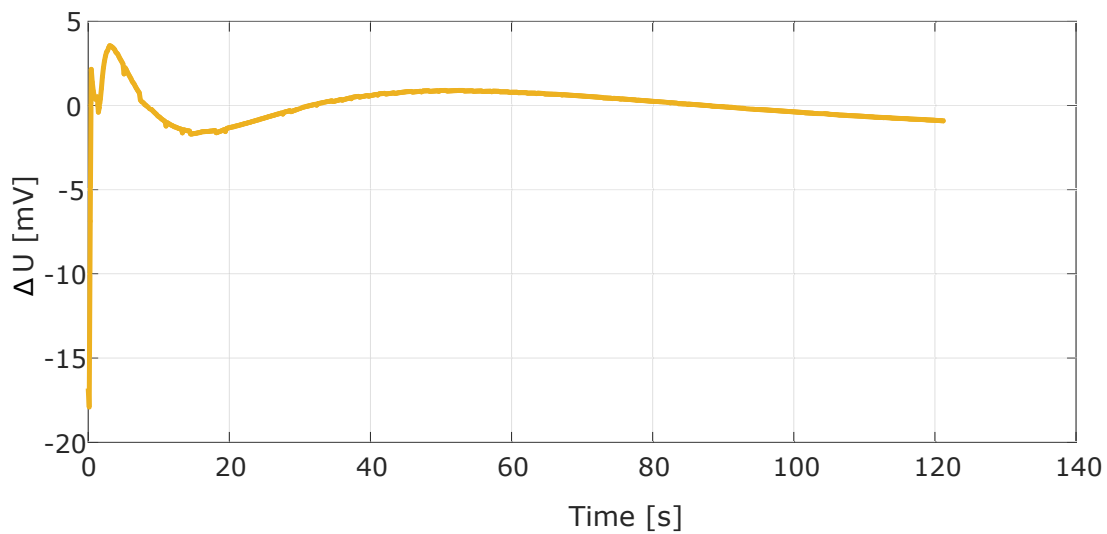
Az előző pontok szerint megtörtént a mérési adatok előkészítése, így már megkezdhető a modellparaméterek számítása. A paramétereket számító MATLAB függvény az alábbiakat minden töréspont esetére ciklikusan végzi el.

Az R_0 paramétert az aktuális töréspontban tapasztalható feszültségugrás és a megszakított áram nagyságának hányadosaként számítjuk. Az RC-tagok paramétereinek meghatározásához a relaxációs szakaszokra történő görbeillesztést a MATLAB *lsqcurvefit* függvényével végeztük, amely a nemlineáris legkisebb négyzetek módszerét alkalmazza. A görbeillesztés eredményeként megkaptuk az A , B , α , C , β paraméterek értékét, ebből a 2.1. fejezetben megadott képletek alapján meghatározhatók az $R_l(\text{SoC}_1)$, $R_s(\text{SoC}_1)$, $C_l(\text{SoC}_1)$, $C_s(\text{SoC}_1)$, $OCV(\text{SoC}_1)$ értékek az aktuális töréspontra (SoC_1) vonatkozóan. Az ellenőrizhetőség érdekében a feldolgozó MATLAB függvény ábrázolja az eredeti feszültséggörbét és a rá illesztett görbét (3.3. ábra), valamint e kettő különbségét (3.4. ábra).

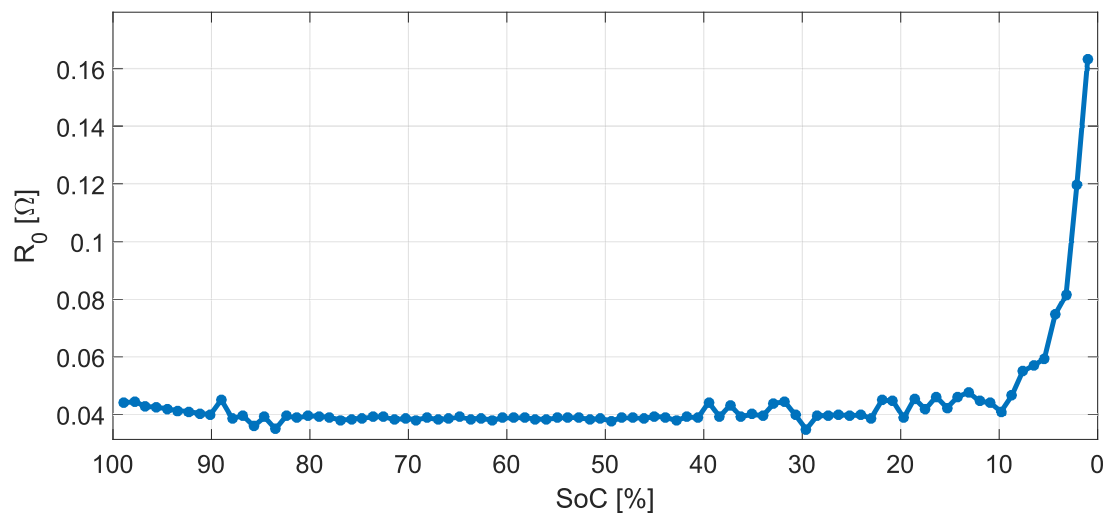


3.3. ábra. Relaxációs szakasz és a rá illesztett két időállandós exponenciális görbe

A MATLAB függvény az így kiszámított modellparamétereket a további felhasználhatóság érdekében elmenti, majd táblázatos formában és a töltöttség függvényében grafikus formában is megjeleníti (3.5. ábra).



3.4. ábra. A görbeillesztés abszolút hibája


 3.5. ábra. Az R_0 paraméter töltöttségfüggése (2,5 A kisütőáram és 100 töréspont esetén)

3.2.6. Görbeillesztés a modellparaméterekre

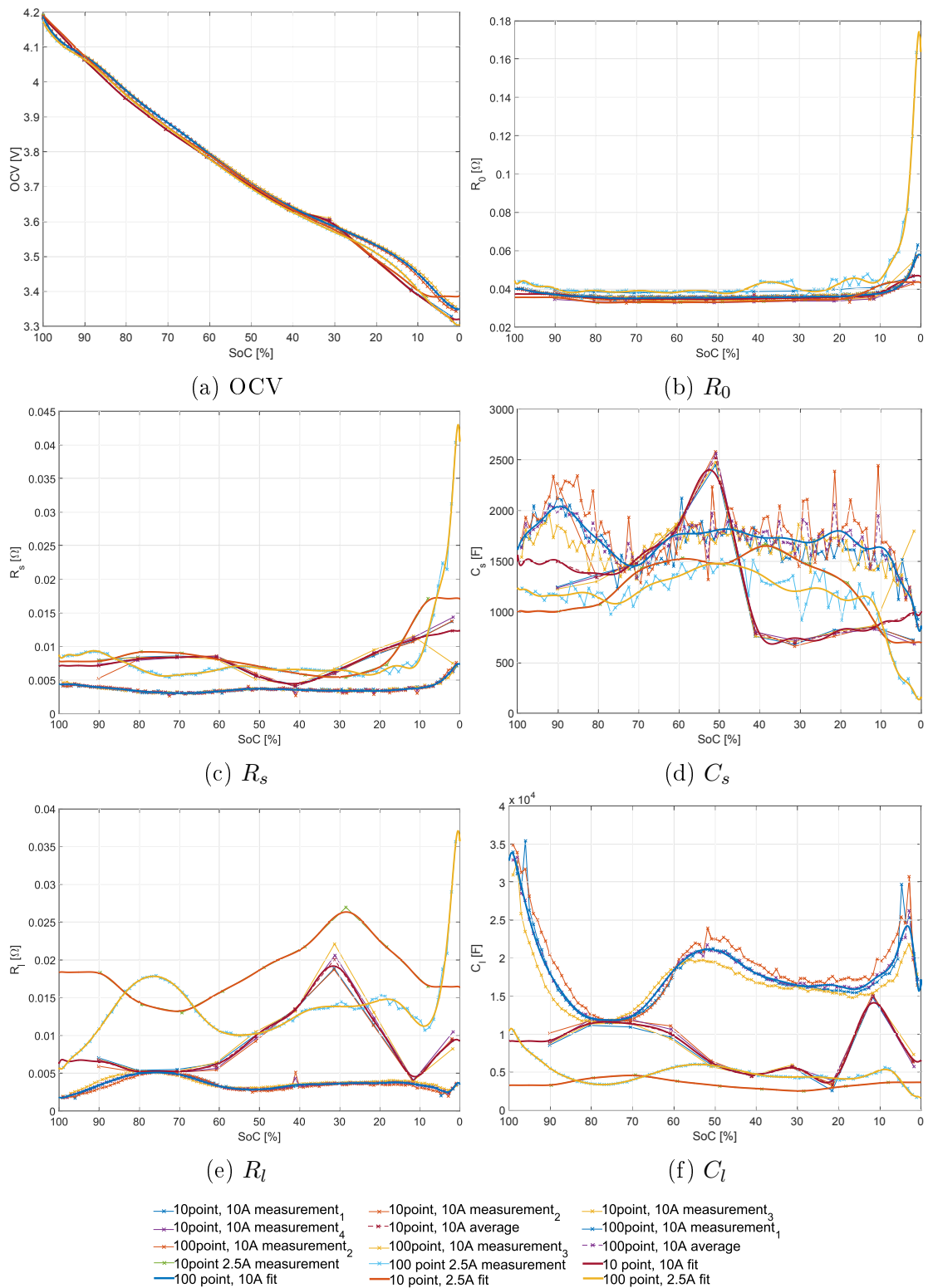
Az eddigiekben megkaptuk a modellparaméterek értékeit az egyes töréspontokban különböző kisütőáramok és eltérő darabszámú töréspont alkalmazása mellett. A Simulinkben felépített akkumulátormodell azonban nem képes ilyen formában fogadni a paramétereket. A kiszámított paraméterekre ezért a töltöttség függvényében polinomiális görbét illesztünk a MATLAB polyfit függvénye segítségével. A polinomok fokszámát 21-nek választottuk, tapasztalataink szerint ugyanis ekkor jól illeszkedett a kapott görbe a mérési eredményekre, ennél magasabb vagy alacsonyabb fokszám alkalmazása a pontatlanságokat

növelte. A 10 töréspontos mérések esetén az ismert adatpontok túlságosan távol helyezkednek el egymástól, emiatt minden két ismert adatpont között lineáris interpolációval 100 új pontot vettünk föl. Az $SoC = 100\%$ esetén az RC-tagok paramétereit nem ismerjük, azonban a görbeillesztés miatt OCV ismerete rendkívül fontos ebben a pontban is. Emiatt az OCV paraméter esetén fölvevük az $SoC = 100\%$ töréspontot is, az OCV értéke ekkor a mérés kezdetekor fennálló feszültségérték. A görbeillesztéseket kézzel történő korrekciók előzték meg. A paraméterek számítása után kapott ábrákat áttekintve egy-egy töréspontban nagyságrendileg kiugró értékeket tapasztaltunk. Ezeket a jelentősen kiugró értékeket hibásnak ítéltük és a szomszédos töréspontbeli helyes értékek között lineáris interpolációval helyettesítettük azokat. Néhány méréstípust több cellán, több alkalommal is elvégeztünk a gyártási szórás hatásának kiküszöbölésére, ezen mérési eredmények átlagolásával kapott paramétereket használtuk fel az állapotbecslő paramétereiként.

3.3. A paraméter-identifikáció eredményei

A mérések eredményei a 3.6. ábrán láthatók. Az OCV és az R_0 görbe a különböző méréstípusok esetén is nagy mértékű egyezést mutat, az RC tagok paramétereit esetén azonban jelentős eltéréseket tapasztalhatunk. Az azonos áramerősség mellett 10 és 100 törésponttal elvégzett mérések eltérése az alábbiak szerint magyarázható. A 100 töréspontos mérések esetében a terhelőáram csak rövid ideig folyt, emiatt nem alakulhattak ki a hosszú időállandójú fizikai és kémiai folyamatok az akkumulátorcellák belsejében.

Munkánk kezdetén az áramfüggés mértékének megállapítását is célul tűztük ki. Az RC-tagok paramétereiben jelentős áramfüggés tapasztalható. Látható azonban, hogy az azonos számú törésponttal, de eltérő áramerősséggel elvégzett mérésekből kapott görbék hasonló trendet követnek, jellegükben alapvetően nem térnek el. Dolgozatunkban a továbbiakban az áramfüggés elhanyagolása mellett döntöttünk, mivel annak megvalósítása a BMS erőforrásigényét jelentősen megnövelné, emellett egy villamos jármű számára készített akkumulátorpakk tervezésekor már ismert az üzemi kisütőáram jellemző nagyságrendje. Ezen indokok miatt a 10A-en mért paramétereket használjuk föl a továbbiakban, a kitűzött alkalmazás jellemzően ekkora nagyságrendű terhelőáramokat igényel az egyes



3.6. ábra. A paraméter-identifikáció eredményei

akkumulátorcellákból.

Az OCV görbe ebben a formában még nem használható fel az állapotbecslő akkumulátormodelljéhez, a választott mérési módszerrel ugyanis nem ismerhetjük meg a valódi OCV görbét az akkumulátorcellák minimális feszültsége közelében. Ezen szakasz megismerése azonban kiemelten fontos, mivel a karakterisztika ezen szakasza igen meredek, erősen nemlineáris jelleget mutat. Emiatt a valódi OCV görbét a 10 A-es folytonos kisütési görbéből származtatjuk, a kiszámított modellparaméterekkel korrekciókat végzünk (bővebben 4.2.2. fejezet).

Néhány méréstípus esetén több cellával is végeztünk méréseket. Az ezekből kapott modellparaméterek görbéi jól láthatóan együtt futnak, így föltehetjük, hogy a mért modellparaméterek a kiválasztott akkumulátortípusra általánosan érvényesek.

4. A megvalósított állapotbecslő algoritmus

Mint azt a 2.2.5. fejezetben leírtuk, egy lineáris megfigyelőt tartalmazó modell alapú állapotbecslőt valósítottunk meg. Ebben a fejezetben annak működését, valamint implementációjának menetét írjuk le.

4.1. A becslő pontos leírása

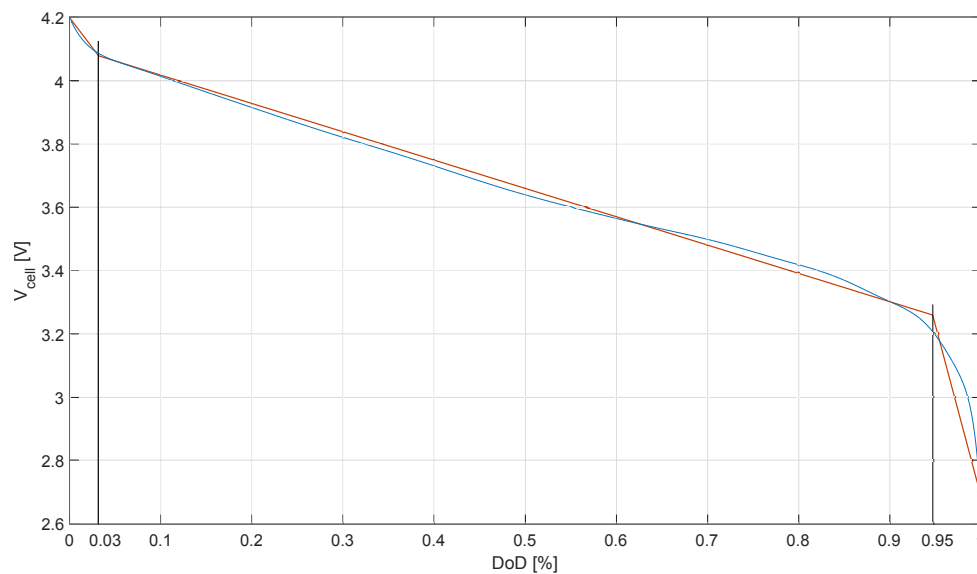
Ahogy azt a dolgozatban már korábban írtuk, az általunk megvalósított becslő egy vegyes algoritmus, vagyis nem csak az akkumulátor modelljét tartalmazza, hanem egy egyszerű áram integrátort is. Az algoritmus mint az a 2.8. ábrán is látható egy zárt szabályzási kört alkot.

Első lépésben az áramintegrátor (CC becslő) segítségével egy kezdeti becslést adunk az SoC értékére. Ezen a ponton még nem várjuk el annak pontosságát. Ezt a kezdetleges becslőt vezetjük be a pontos, identifikált paramétereket tartalmazó akkumulátor modellünkbe. Ebben az SoC becslő eljárásban feltesszük, hogy a modellünk pontos, megegyező áram és kezdeti töltöttség mellett pontosan ugyan úgy viselkedik mint a valódi cella.

A modellünk a kezdetleges töltöttség alapján ad egy becslést az akkumulátor feszültségére, ami már kapocsfeszültség becslés. Ez a becslő egy az egyben összehasonlítható a valódi cellán mért feszültséggel és az ebből kapott feszültség hibajel bemenete a megfigyelőnknek. Ez a hibajel alapján korrigálja a kezdeti SoC becslő értékét, majd az algoritmus következő lefutásakor ezt a korrigált SoC becslőt vezetjük be a modellünkbe. Az algoritmus kimenete a megfigyelő által korrigált, pontos töltöttségi szint becselője.

Mint azt már többször kifejtettük, az akkumulátor modellje több nemlineáris viselkedést mutat, mi mégis egy lineáris PI megfigyelőt alkalmazunk ebben az eljárásban. Ebből következne, hogy a szabályzási körünk nem lenne stabil, viszont ez a probléma kiküszöbölhető. Megvizsgálva egy Li-ion akkumulátor tipikus kisütési karakterisztikáját láthatjuk, hogy az három jól elkülöníthető szakaszra bontható.

Ahogy az a 4.1. ábrán látható a három szakasz jó közelítéssel linearizálható. A teljes kisütési görbére három egyenes illeszthető, így használható lineáris szabályzó három paraméterbeállításal. További egyszerűsítést érhetünk el, ha feltesszük, hogy az akkumulátort



4.1. ábra. Li-ion akkumulátor feszültségének linearizációja

nem a teljes kisütési tartományon használjuk. Mint a 4.1. ábrán látjuk, körülbelül 3 – 95% kisütés mellett, vagyis 5 – 97% töltöttségi tartományon az akkumulátor cella karakterisztikája egyetlen egyenessel közelíthető. Ezen a tartományon használva elég egy szabályzó paraméter párt meghatározni. Ez az egyszerűsítés a mai akkumulátor technológiák miatt megtehető (lásd bővebben 2.2.5. fejezet).

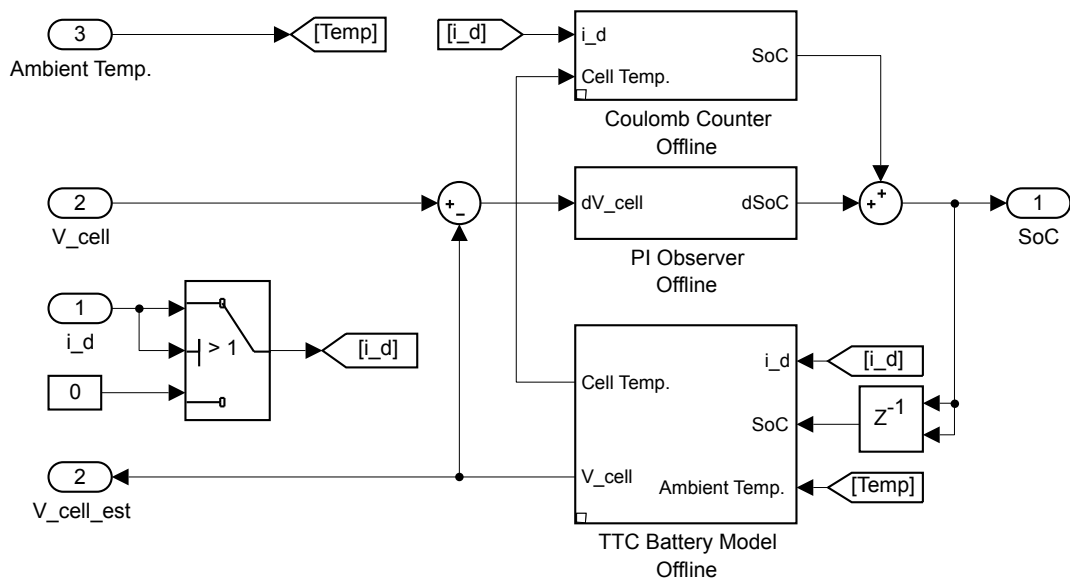
4.2. Megvalósított Simulink modell

Az SoC becslő algoritmus implementációja MATLAB Simulink-ben történt. A Simulink modell segítségével történtek meg a becslő verifikációs szimulációi is. A becslő algoritmus Simulink modellje látható a 4.2. ábrán.

Jól látható az algoritmus három elkülönülő funkciója, a CC áramintegrátor, a PI megfigyelő és az akkumulátor modell.

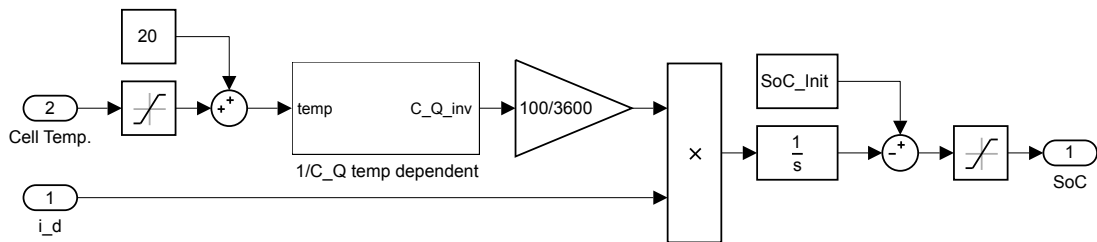
Az egyszerű áramintegrátort kibővítettük, felkészítettük a kapacitás hőmérsékletfüggésének figyelembe vételére, ezt bővebben a 4.2.3. fejezetben tárgyaljuk. A modell 4.3. ábrán a következő egyenletet valósítja meg,

$$\hat{SoC} = SoC_{init} - \frac{100}{3600 \cdot C_Q(Temp)} \int_0^t i_d(t) dt \quad (4.1)$$



4.2. ábra. Modell alapú SoC becslő Simulink modellje

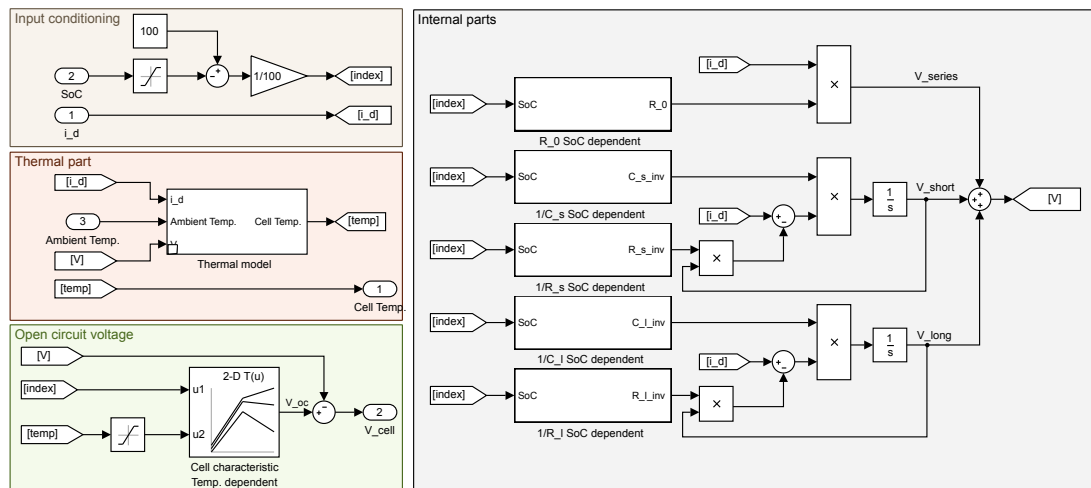
ahol C_Q függ a hőmérséklettől. Ennek eredménye az a kezdetleges SoC becslő értékei, melyet az algoritmus további pontjain felhasználunk.



4.3. ábra. Coulomb-counting becslő Simulink modellje

Az így előállított SoC-t, i_d áramot és a környezeti hőmérsékletet bevezetve az akkumulátor modellbe, kiszámítjuk az aktuális akkumulátor feszültség becslőjét. Az akkumulátor modell a két időállandós TTC villamos helyettesítő képet használja (lásd bővebben 2.1.2. fejezet), melynek Simulink implementációja a 4.4. ábrán látható.

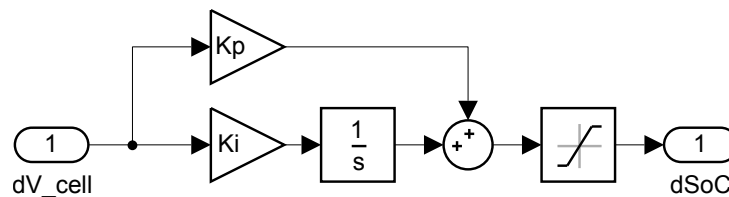
A bemeneti paraméterek egy kisebb előfeldolgozáson esnek túl. Erre leginkább a becsült töltöttség esetében van szükség. Az algoritmussal kapcsolatban végig töltöttségről, SoC-ról beszélünk, viszont a konkrét megvalósítás DoD alkalmazásával történt. Ennek oka abból fakad, hogy a töltöttség becslő tipikusan kisütéskor fut, emiatt a paraméter identifikáció is kisütési ciklusokra lett meghatározva. Ehhez jön hozzá, hogy a gyártói karakterisztikák is mind kisütési ciklusokra vannak megadva, így DoD-nak a használata



4.4. ábra. Modell alapú SoC becslő Simulink modellje

a kézenfekvő.

A Simulink reprezentáció utolsó tagja a PI megfigyelő (4.5. ábra).



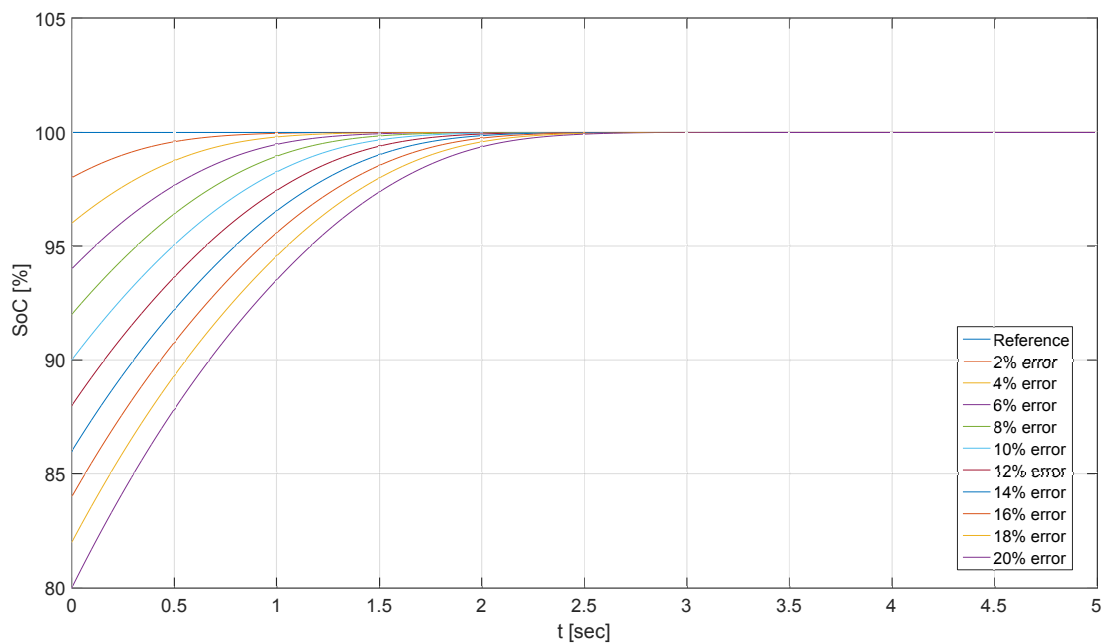
4.5. ábra. A PI megfigyelő Simulink modellje

Ez egy folytonos megfigyelő mely a következő viselkedést valósítja meg:

$$dSoC(t) = K_p dV_{cell}(t) + K_i \int_0^t V_{cell}(\tau) d\tau \rightarrow dSoC = K_p dV_{cell} + \frac{K_p}{s} dV_{cell} \quad (4.2)$$

ahol $K_p = A_p$ az arányos tag erősítése, $K_i = \frac{A_p}{T_i}$ az integrálós tag paramétere, dV_{cell} a kapcsolófeszültség hibája és $dSoC$ az SoC korrekciós értéke.

A K_i és K_p tagok hangolásakor a legfőbb szempont a megfigyelő gyors, túllövésmentes aszimptotikus beállása volt. A 4.6. ábrán látható, hogy a lehetséges kezdeti hibák esetén a szabályzó túllövés nélkül, gyorsan beáll.



4.6. ábra. A PI megfigyelő beállása különböző kezdeti hibákra

4.2.1. Identifikált paraméterek implementálása

Az identifikációs eljárás során kapott paraméterek implementálása a 4.4. ábra szerinti szürke háttérű részei szerint valósultak meg. A kapott paraméter értékek pontsorozatként valamint az azokra illesztett görbéként állnak elő. A becslő megvalósítása során mindkét formát felhasználjuk.

A verifikációs szimulációkhoz folytonos idejű modellt használunk, melyben a paraméterekre illesztett görbéket használjuk fel, míg validációs mérésekkor, valamint a BMS-ben való megvalósításkor, már periodikusan, fix időpontokban lefutó algoritmus pontsorozatban tárolja a paramétereket. Ennek oka a BMS-ekben használt MCU-k számítási és tárolási kapacitásából fakad, nagy teljesítmény igényt jelentene egy összetett függvény kiszámítása msec-enként. Ezzel szemben ezek a vezérlők rendelkeznek megfelelő méretű memóriával, hogy paramétereinket nagyságrendileg akár száz pontban is tárolhatjuk.

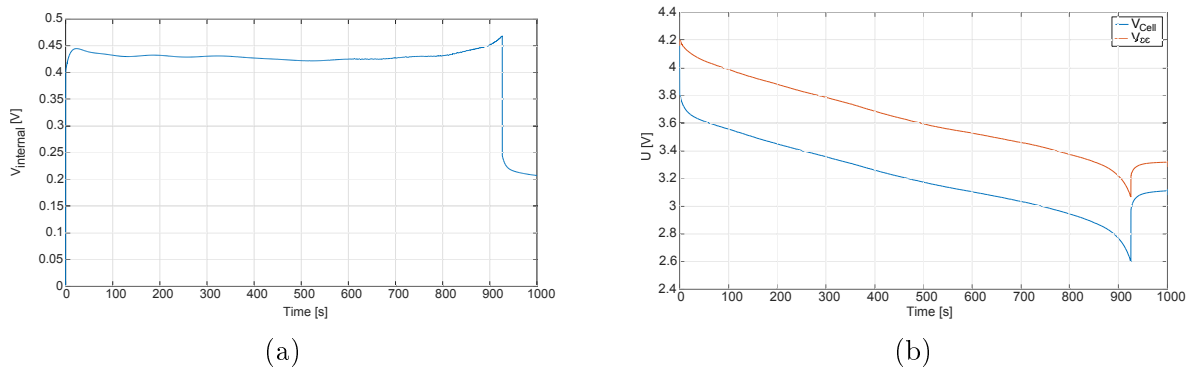
4.2.2. Az üresjárási feszültség implementálása

Nagy nehézsége a pontos akkumulátor modell elkészítésének az üresjárási feszültség pontos meghatározása. Míg a belső paraméterek az áramterhelés változtatásával, impulzus

szerű terhelésekkel megfigyelhetőek, identifikálhatóak, addig erre az OCV esetén nincs lehetőség.

Legegyszerűbb közelítése az akkumulátorok kis kisütőáram melletti feszültség profiljának felvétele. Ez azonban több problémával is jár. Egyrésztől nem tudjuk a teljes feszültségtartományt feltérképezni, ugyanis a belső impedancián eső feszültség miatt hamarabb elérjük a megengedhető minimális feszültség szintet, mint hogy teljesen lemerítenénk az akkumulátort. Másik probléma, hogy ekkor nem az üresjárás, hanem a terhelt kapcsolás feszültséget mérjük, melyben a belső impedancia hatása is szerepel. Ez megfelelően kis terhelő áramnál akár el is hanyagolható, viszont az olyan kis terhelő áramot eredményezne, mely nagy mértékben elnyújtaná a mérés menetét, emiatt nem praktikus.

Meghatározható impulzus terhelések sorozatával, ahol a feszültséget nem a terhelt állapotban, hanem az azt követő relaxáció végén mérjük. Ehhez nagy számú impulzusra van szükség, mely megint csak sok időt vesz igénybe, figyelembe véve, hogy ekkor a mérés idejéhez hozzá adódik még a relaxációs idő is, mely ciklusonként több perces várakozást jelent.



4.7. ábra. Kapocsfeszültség kompenzálása

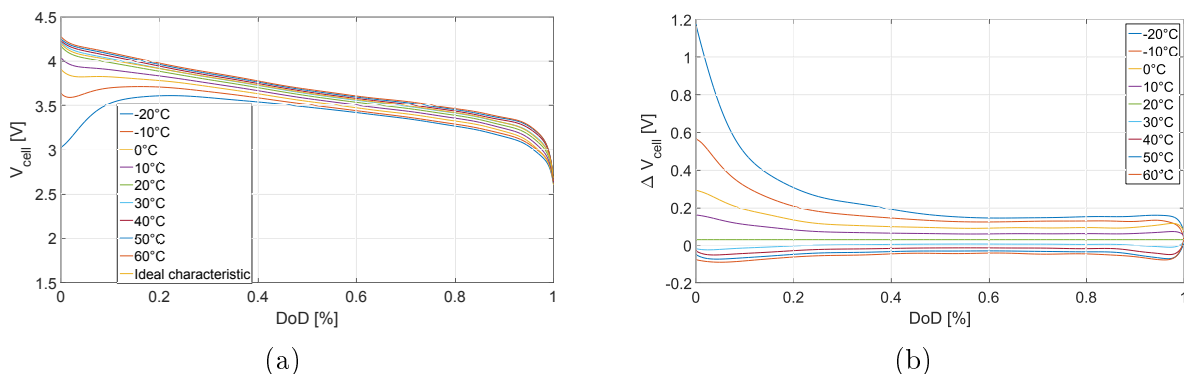
A legjobb közelítést a belső paraméterek felhasználásával kapjuk. Kiindulásként szükségünk van identifikált paraméterekre, valamint feltesszük, hogy az identifikációs mérések pontosak, az eljárás pontos eredményt ad, ekkor szimuláció segítségével meghatározhatjuk a belső impedancián eső feszültséget (4.7a. ábra). Ehhez nem kell más, mint egy egyszerű tetszőleges, konstans terhelő árammal egy kisütési ciklusban rögzíteni az áram és cella kapocsfeszültség értékeit, majd ezt bevezetni egy szimulációs környezetbe, esetünkben Si-

mulinkbe. Itt felhasználva a 4.4. ábra szürke részében található belső impedancia modellt az identifikált paraméterekkel, a mért feszültségből, és a modellezett veszteségi feszültségből előállítható az OCV-nek egy igen jó becslése.

4.2.3. Hőmérséklet függés

Mint azt korábban is írtuk, az akkumulátor modell tartalmaz hőmodellt is, ez látható a 2.5. ábrán. Mivel pontos méréseket a hőmodellre nem tudtunk végezni (a már említett okok miatt) a hőmérsékletfüggés hatását becsültük.

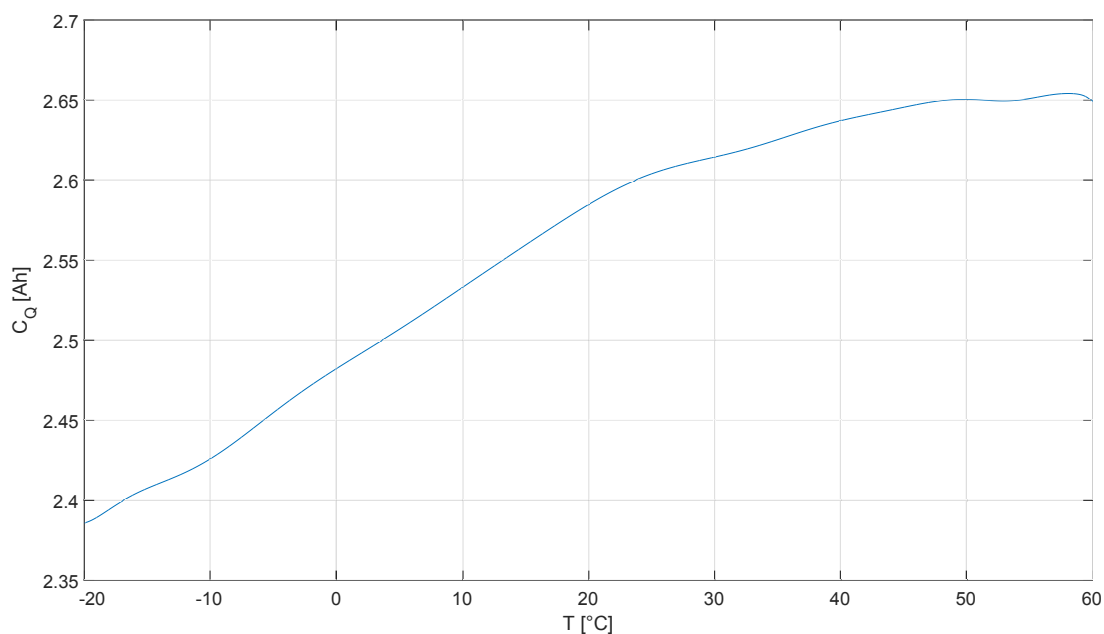
Becslésünk alapjául a gyártói adatok szolgáltak. Az akkumulátor gyártók mind a kapacitás, mind a cellafeszültség hőmérséklet függőségére méréseket végeznek, ezek eredményei a gyártói katalógusokban megtalálhatóak. Feltételeztük, hogy ezek a mérések pontosak, valamint nincsenek nagy szórások a különböző cellák azonos hőmérsékleten való viselkedésének. Ekkor a gyártói görbeseregek, mint referenciák felhasználhatóak.



4.8. ábra. Üresjárási feszültség hőmérséklet függésének meghatározása

Az adatlapokban közölt ábrákon felvettünk egy ideálisnak feltételezett karakterisztikát, majd minden töltöttségi szint mellett meghatároztuk az adott hőmérsékleten mért feszültség közötti különbséget (4.8. ábra). Ezt a töltöttség függő feszültség különbséget hozzáadva az általunk meghatározott OCV-hez, megkaptuk annak becsült hőmérséklet függését.

A kapacitás esetében hasonlóképpen jártunk el, azzal a különbséggel, hogy ekkor nem görbesereg állt rendelkezésünkre, hanem egyetlen kapacitás-hőmérséklet karakterisztika (4.9. ábra).



4.9. ábra. Akkumulátor kapacitásának hőmérsékletfüggése

Méréseink során meghatároztuk a mért akkumulátor cella valódi kapacitását szoba-hőmérsékleten. A karakterisztikában megkerestük ezt a hőmérsékleti pontot és a hozzá tartozó kapacitás értéket, majd a két kapacitás különbségével eltoltuk a görbét, így megkapva a mért akkumulátorra a kapacitás hőmérsékletfüggő karakterisztikáját.

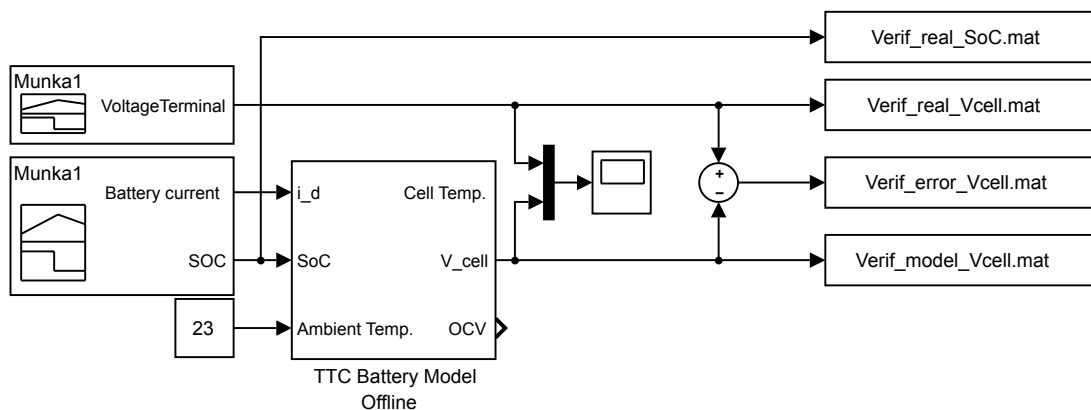
5. Verifikáció

Mind az identifikált paraméterekről, mind pedig a megvalósított becslő eljárásról verifikációs méréseket készítettünk. Mindenek előtt meg kellett győződnünk, hogy az identifikációs eljárásban kapott paraméterek helyesen modellezik a valóságos akkumulátor cellákat. Ehhez mérési adatokat felhasználva szimulációkat végeztünk az identifikált paramétereket tartalmazó modellről.

Miután meggyőződünk a modellünk helyességéről, az algoritmus viselkedését ellenőriztük hasonlóképpen. A verifikáció mellett összehasonlító szimulációkat is végeztünk, hogy megvizsgáljuk a modell alapú és egyszerű áramintegrátoros CC becslők viselkedését. Ezen verifikációs eljárások és eredményeik bemutatása következik ebben a fejezetben.

5.1. A szimulációs környezet

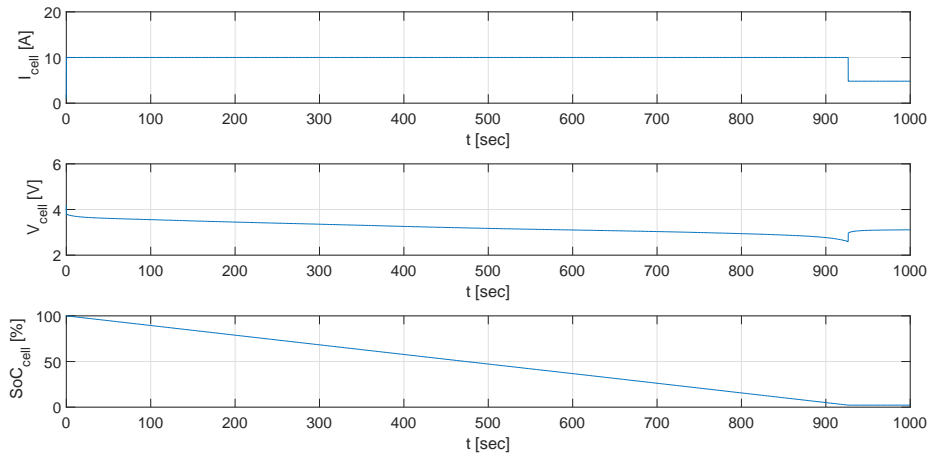
A verifikáció szintén MATLAB Simulink környezetben történt. A szimulációs környezet az 5.1. ábrán látható.



5.1. ábra. A modell verifikáció szimulációs környezete

A mérési eredményekből meghatároztuk az akkumulátor cella nominális kapacitását, mely $Q_n = 2,634Ah$ -ra adódott. Ezt, az identifikált paramétereket és a 4.2.2. fejezetben leírtak alapján meghatározott OCV görbét betöltve a modellbe végeztük el a tesztek.

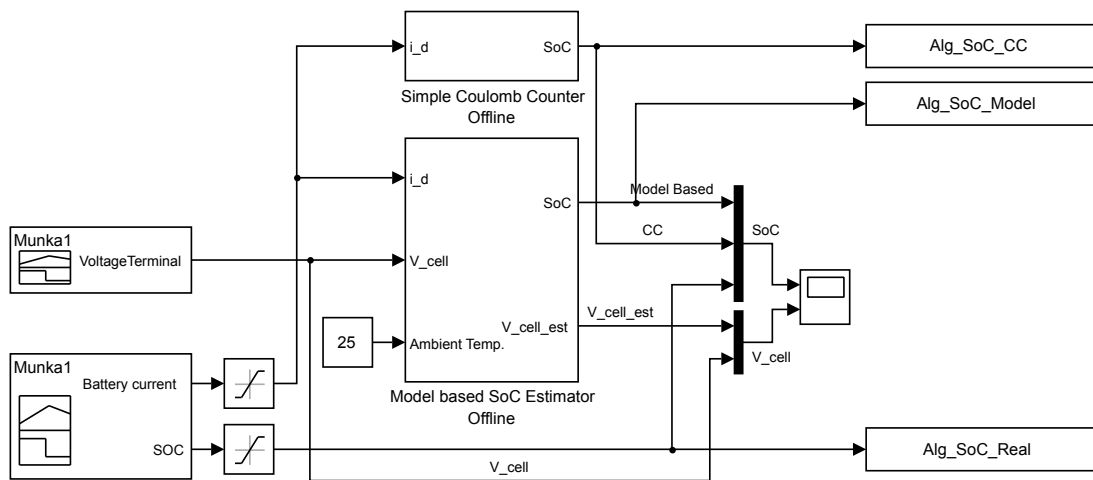
A szimuláció során felhasznált mérési eredmények láthatók az 5.2. ábrán. Az itt látható SoC értéket a mért áram és a meghatározott kapacitás adatokból számoltuk, a továbbiakban ezt tekintjük a mért cella valódi töltöttségi szintjének. Az áramterhelés és a kívülről



5.2. ábra. A verifikációs mérések bemenetei

érkező töltöttségi szint adatok alapján meghatároztuk a modell és a mért cellafeszültség különbségét.

Hasonlóképpen történt a becslő algoritmus Simulink modelljének verifikációja, illetve CC becslővel való összehasonlítása is, ez látható az 5.3. ábrán.

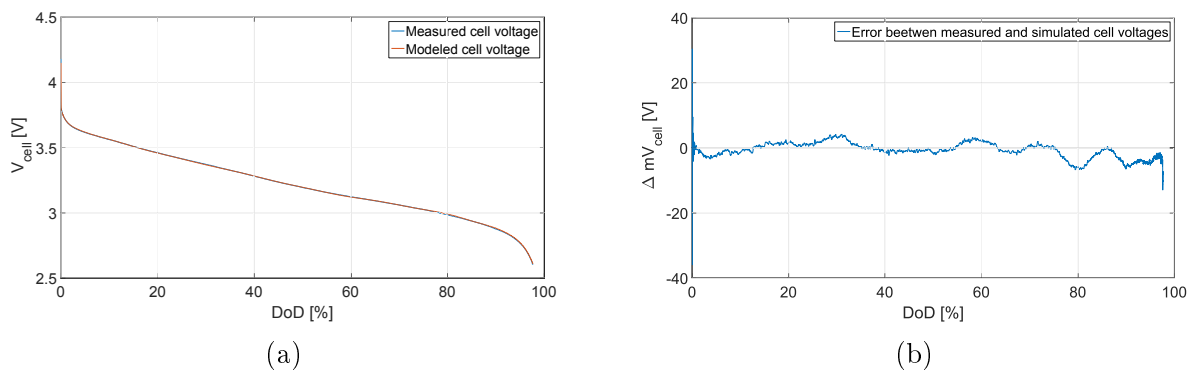


5.3. ábra. A becslő verifikáció szimulációs környezete

5.2. A verifikációs eredmények

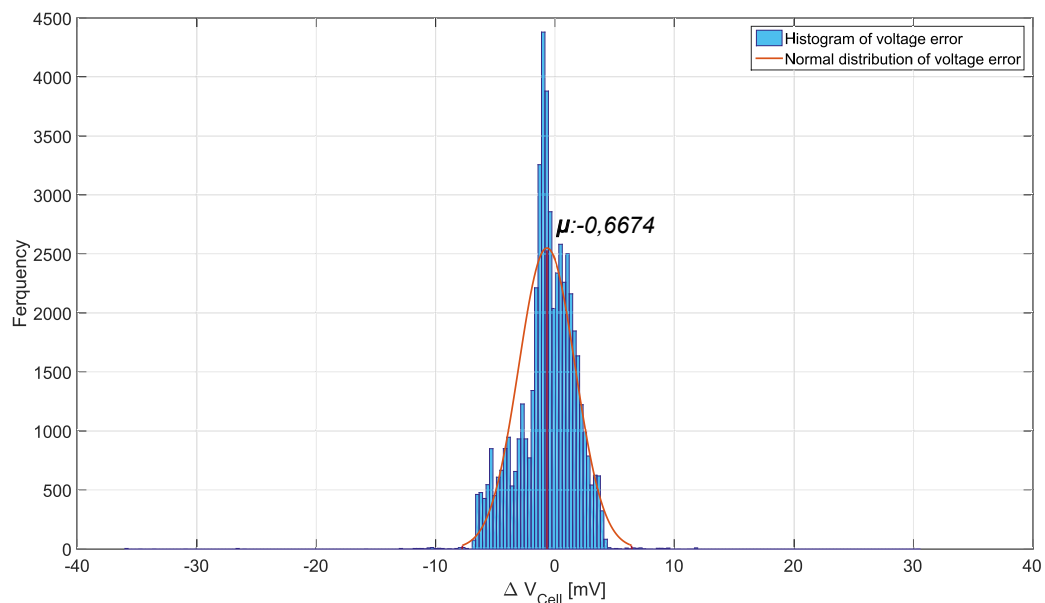
Az 5.4. ábrán láthatók a modell verifikációs szimulációinak eredményei.

A mérésekből, illetve a hiba karakterisztikából (5.4b. ábra) látszik, hogy a validációs



5.4. ábra. Modell verifikációs eredmények

mérések eredményeül kapott paraméterek pontosak, illetve a meghatározott OCV jól követi a valóságot. Az 5.5. ábráról leolvasható, hogy a modell hibájának várható értéke $-0,66mV$, illetve a modell $+/- 10mV$ -os hibán belül képes szimulálni a valódi akkumulátor viselkedést.

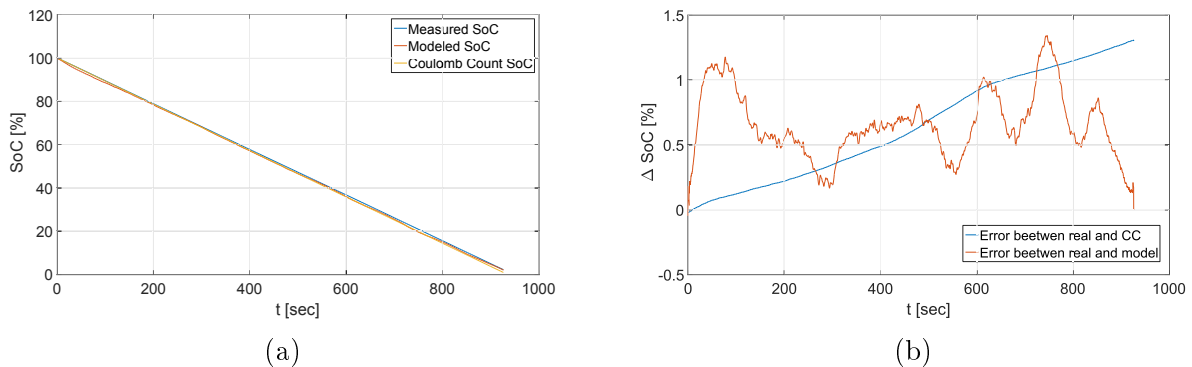


5.5. ábra. Hibaeloszlás a modellezett és a mért feszültség között

A mérési eredmények mutatják, hogy a megfelelően identifikált paraméterekkel igen pontosan modellezhető az akkumulátorviselkedés, ez a modell felhasználható a továbbiakban.

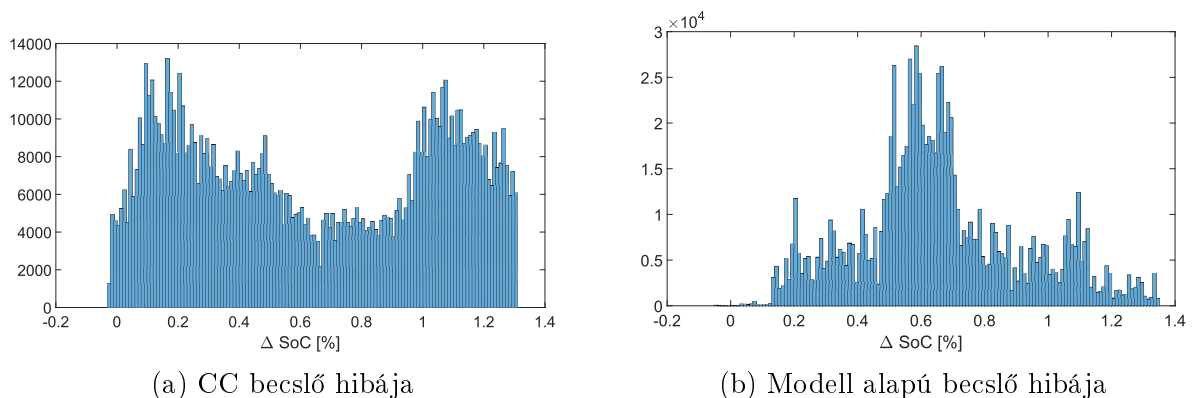
Miután meggyőződünk a modellünk pontosságáról, elvégeztük a becslő algoritmus verifikációját összehasonlítva az egyszerű CC módszerrel, valamint a valódi SoC értékkel.

Ezt több kiindulási feltétel mellett is elvégeztük.



5.6. ábra. Becslő verifikációs eredmények pontos kezdeti értékkel

Az 5.6. ábrán látható esetben pontos becslést adtunk a kezdeti töltöttségi szintről, így az 5.6a. ábrán látható, hogy mindkét becslő algoritmus együtt mozog a valódi töltöttséggel. Azonban ha megnézzük az 5.6b. ábrát, láthatjuk, hogy a CC metódus hibája (kék görbe) folyamatosan nő az idővel, jelentkezik a drift jelensége. Kisebb áram mellett a mérés tovább tart, így ennek mértéke egyre inkább számottevő. Ezzel szemben a modell alapú becslő hibája (sárga görbe) nem mutatja ezt a tendenciát.

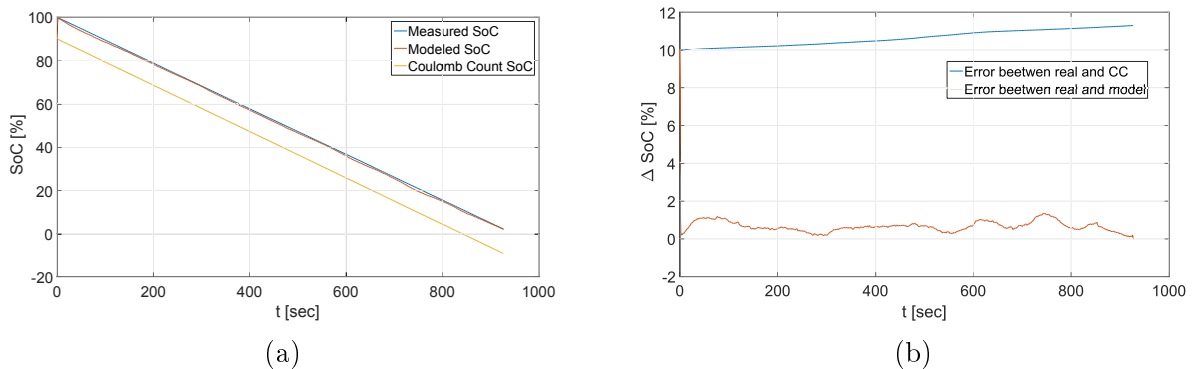


5.7. ábra. A becsült töltöttség hibaeloszlása pontos kezdeti értékkel

Az 5.7. ábrán láthatjuk a hibaeloszlásokat, jól látszódnak az előbb leírtak, a modell 0,6%-os várható hibával, de 1,5%-os pontossággal meg tudja mondani a töltöttségi szintet minden időpillanatban.

Egy másik eset, ha nem áll rendelkezésünkre pontos adat az akkumulátorokról a ki-sütési ciklus esetén, vagy rossz kezdeti becslést adunk, ekkor a két becslő viselkedése

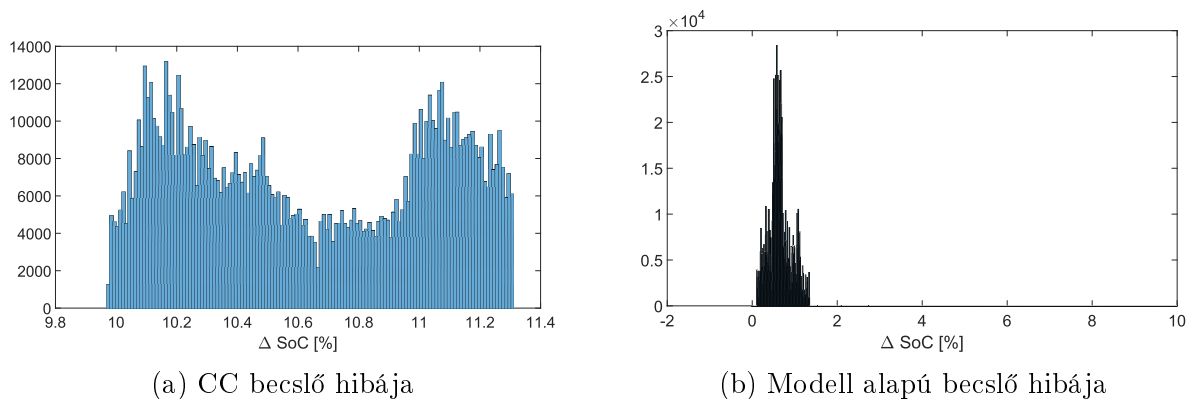
az 5.8. ábrán látható.



5.8. ábra. Becslő verifikációs eredmények 10 %-os kezdeti hibával

Ebben az esetben mind a CC, mind a modell alapú becslő kezdeti értékét 10%-os hibával adtuk meg, mint látható az 5.8a. ábrán, a CC metódus ezt a maradó hibát megtartja, és ahogy az látszik az 5.8b. ábrán, ehhez hozzáadódik a drift jelenségből keletkező hiba.

Ezzel szemben a modell alapú becslőnk állandósult állapotban megegyező viselkedést mutat a pontos kezdeti becsléskor mutatott esettel. Az algoritmus, a futás elején a kezdeti hiba hatására kikompenzálja magát, és a megfelelő paraméterekkel gyorsan beáll egy pontos becslő értékre.



5.9. ábra. A becsült töltöttség hibaeloszlása 10 %-os kezdeti hibával

Ebben az esetben a hibaeloszlás az 5.9. ábrán látszik, a CC becslő hibájában minden időpillanatban megtalálható a kezdeti offszet (5.9a. ábra), míg a modell alapú becslő hibájának eloszlása nem változott nagyban (5.9b. ábra), bár a kezdeti 10%-os hiba itt is megjelenik, de ez a gyors beállásnak köszönhetően csak kis számban fordul elő.

A verifikációs eredményekből egyértelműen látszanak a modell alapú becselő előnyei, jobb, robusztusabb becslést képes adni, hibás kezdeti feltételek esetén is, szemben a széles körben használt CC becselővel szemben. Itt hozzá kell tennünk, hogy ez csak megfelelő paraméterbecslés, identifikáció után mondható ki.

6. Értékelés

Dolgozatunkban a lítium-ion akkumulátorok modellezésére kiválasztottuk a két idő-állandós kombinált villamos modellt. Elvégeztük a modell paraméter-identifikációját, a kapott paraméterek felhasználásával Simulink-ben felépítettük az állapotbecslőt. A felparaméterezett becslő verifikációját szimulációk segítségével elvégeztük.

A verifikáció során láttuk, hogy megfelelő paraméterekkel jobb viselkedést produkál a modell alapú becslő, mint az egyszerű és széles körben elterjedt Coulomb-counting módszer.

Az elvégzett verifikáció után a következő feladat a modell validációja valódi körülmények között. Ehhez a jövőben elkészül a modell alapján egy MCU-ra implementálható algoritmus, mely segítségével egy valódi akkumulátor pakk töltöttsége becsülhető. Ezen a pakkon és implementált algoritmuson elvégezzük a validációs mérési ciklusokat.

A felépített modell továbbfejleszhető a hőmodell aktiválásával, a termikus paraméterek pontos meghatározásával. Ehhez el kell végeznünk a termikus modell identifikációját.

Összességében elmondhatjuk, hogy sikeresen teljesítettük a kitűzött célt, így nem csak jó alapját sikerült lefektetni az elektromos repülőgépekben használható töltöttségi becslő algoritmusnak, hanem annak verifikációjával sikerült elnyernünk a Siemens Zrt. bizalmát egy valódi repülőgépbe való beépítéshez, validációhoz és használatba vételhez is.

Irodalomjegyzék

- [1] Tibor Debreceni, Péter Szabó, Gergely György Balázs, István Varjasi, "FPGA-synthesizable Electrical Battery Cell Model for High Performance Real-time Algorithms", *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, Vol. 60, No. 3, pp. 171-177, 2016. DOI: 10.3311/PPee.9398
- [2] Zhongyue Zou, Jun Xu, Chris Mi, Binggang Cao, and Zheng Chen: "Evaluation of Model Based State of Charge Estimation Methods for Lithium-Ion Batteries" *Energies* 2014, 7(8), 5065-5082; doi:10.3390/en7085065 ISSN 1996-1073 – Published: 8 August 2014
- [3] Ahmed, R., Gazzarri, J., Onori, S., Habibi, S. et al., "Model-Based Parameter Identification of Healthy and Aged Li-ion Batteries for Electric Vehicle Applications," *SAE Int. J. Alt. Power.* 4(2):2015, doi:10.4271/2015-01-0252.
- [4] Jun Xu and Binggang Cao (2015). *Battery Management System for Electric Drive Vehicles – Modeling, State Estimation and Balancing, New Applications of Electric Drives*, Dr. Miroslav Chomat (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/61609.
- [5] Fabio Codecà, Sergio M. Savaresi and Vincenzo Manzoni: "The mix estimation algorithm for battery State-of-Charge estimator – Analysis of the sensitivity to measurement errors." *Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference Shanghai, P.R. China, December 16-18, 2009*, ISBN: 978-1-4244-3871-6, DOI: 10.1109/CDC.2009.5399759
- [6] Hajdu Flóra, Dr. Lakatos István PhD, Kőrös Péter: "Lítium akkumulátor modellezése Simulink környezetben" *Innováció és fenntartható felszíni közlekedés konferencia 2013 – Óbudai Egyetem*
- [7] T. Debreceni, G. Gy. Balázs and I. Varjasi: "Mission Profile-Oriented Design of Battery Systems for Electric Vehicles in MATLAB/Simulink®", *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'16)*, Madrid (Spain), 4th to 6th May, 2016, *Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ)*, ISSN 2172-038 X, No.14 May 2016
- [8] F. Baronti, G. Fantechi, E. Leo Leonardi, R. Roncella, R. Saletti: "Effective Modeling of Temperature Effects on Lithium Polymer Cells" *University of Pisa, Italy*

- Dept. of Information Engineering: Electronics, Computer Science and Telecommunications Electronics, Circuits, and Systems (ICECS), 2010 17th IEEE International Conference on 12-15 Dec. 2010, Electronic ISBN: 978-1-4244-8157-6, Print ISBN: 978-1-4244-8155-2, DOI: 10.1109/ICECS.2010.5724680
- [9] Michael Knauff, Jeffrey McLaughlin, Dr. Chris Dafis, Dr. Dagmar Niebur, Dr. Pritpal Singh, Dr. Harry Kwatny and Dr. Chika Nwankpa: "Simulink model of a Lithium-ion battery for the hybrid power system testbed" (<https://www.researchgate.net/publication/253731796>)
- [10] Jiang, S., "A Parameter Identification Method for a Battery Equivalent Circuit Model," SAE Technical Paper 2011-01-1367, 2011, doi:10.4271/2011-01-1367.
- [11] Ahmad Rahmoun, Helmuth Biechl: "Modelling of Li-ion batteries using equivalent circuit diagrams" PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 88 NR 7b/2012
- [12] Chen, M., Rincón-Mora, G. A.: "Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V performance." IEEE Transactions on Energy Conversion. 21(2), pp. 504-511. 2006. - DOI: 10.1109/TEC.2006.874229
- [13] Habiballah Rahimi-Eichi, Federico Baronti, and Mo-Yuen Chow: "Online Adaptive Parameter Identification and State-of-Charge Coestimation for Lithium-Polymer Battery Cells" IEEE Transactions on Industrial Electronics (Volume: 61, Issue: 4, April 2014), Pages: 2053 – 2061, Date of Publication: 17 May 2013, Print ISSN: 0278-0046, Online ISSN: 1557-9948, DOI: 10.1109/TIE.2013.2263774
- [14] Long Lam: "A Partical Circuitbased Model for State of Health Estimation of Li-ion Battery Cells in Electric Vehicles", Master of Science Thesis, University of Technology Delft, 2011.
- [15] K. S. Ng, C.-S. Moo, Y.-P. Chen, and Y.-C. Hsieh, "Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries," Appl. Energy, vol. 86, no. 9, pp. 1506–1511, Sep. 2009.
- [16] M. Coleman, L. Chi Kwan, Z. Chunbo, and W. G. Hurley, "State-of-charge determination from EMF voltage estimation: Using impedance, terminal voltage, and current for lead-acid and lithium-ion batteries," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 54, no. 5, pp. 2550–2557, Oct. 2007.
- [17] Fabio Codecà, Sergio M. Savaresi and Vincenzo Manzoni "The mix estimation algorithm for battery State-of-Charge estimator – Analysis of the sensitivity to measurement errors.", Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference Shanghai, P.R. China, December 16-18, 2009
- [18] Yuan, S., Wu, H., Yin, C. "State of Charge Estimation Using the Extended Kalman Filter for Battery Management Systems Based on the ARX Battery Model." Energies. 6(1), pp. 444-470. 2013. DOI: 10.3390/en6010444

- [19] Rui Xiong, Xianzhi Gong, Chunting Chris Mi, Fengchun Sun: “A robust state-of-charge estimator for multiple types of lithium-ion batteries using adaptive extended Kalman filter”, *Journal of Power Sources*, vol. 243, 2013, 805-816.