



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**

**Villamosmérnöki és Informatikai Kar**

**Villamos Energetika Tanszék**

**Akkumulátorok State of Health  
állapotbecslése biztonságkritikus rendszerek  
esetében**

Tudományos Diákköri Konferencia

Készítette: Czibere Szilárd  
Villamosmérnök hallgató

Konzulens: Dr. Hartmann Bálint  
Egyetemi docens, Villamos Energetika Tanszék

**Budapest, 2019**

## Tartalom

<b>JELÖLÉSJEGYZÉK .....</b>	<b>2</b>
<b>ABSZTRAKT .....</b>	<b>3</b>
<b>DEFINÍCIÓK .....</b>	<b>4</b>
<b>BEVEZETÉS .....</b>	<b>5</b>
<b>1. ÁLLAPOTBECSLÉSI LEHETŐSÉGEK.....</b>	<b>7</b>
1.1. FESZÜLTSGMÉRÉS.....	7
1.2. SÚRÚSÉG MÉRÉS .....	8
1.3. COULOMB-COUNTING.....	8
1.4. ELEKTROKÉMIKUS IMPEDANCIA-SPEKTROSKÓPIA (EIS).....	9
<b>2. KÉMIAI HÁTTÉR BEMUTATÁSA .....</b>	<b>10</b>
2.1. MIÉRT ÓLOMSAVAS AKKUMULÁTOR?.....	10
2.2. AZ AGM AKKUMULÁTOR FŐ ALKOTÓELEMEI .....	10
2.3. SZULFÁTOSODÁS ÉS KORROZÍÓ .....	11
<b>3. A VIZSGÁLÓ JELEK MÓDSZERE .....</b>	<b>14</b>
<b>4. A MÉRÉSI ELJÁRÁS BEMUTATÁSA .....</b>	<b>16</b>
4.1. PRE-KONDITIONÁLÁS .....	16
4.2. PARAMÉTEREK BEMUTATÁSA .....	16
4.3. A HASZNÁLT PARAMÉTEREK ÉS A DEGRADÁCIÓ FELGYORSÍTÁSA.....	19
4.4. A MÓDSZERTAN ÖSSZEGZÉSE .....	19
<b>5. MÉRÉSI EREDMÉNYEK ÉS KÖVETKEZTETÉSEK.....</b>	<b>20</b>
5.1. A KAPACITÁS.....	20
5.2. KEZDETI KAPOCSFESZÜLTSG .....	21
5.3. A $\Delta V$ VÁLTOZÁSA ÉS AZ ELLENÁLLÁS MEGHATÁROZÁSA .....	21
<b>6. SZIMULÁCIÓ.....</b>	<b>24</b>
6.1. AZ AKKUMULÁTOR MODELLEZÉS TÍPUSAI .....	24
6.1.1. <i>Elektrokémiai modellek</i> .....	24
6.1.2. <i>Sztokasztikus modellek</i> .....	24
6.1.3. <i>Elektromos modellek</i> .....	24
6.2. TOVÁBBFEJLESZTÉSI LEHETŐSÉG .....	27
<b>ÖSSZEGZÉS.....</b>	<b>29</b>
<b>IRODALOMJEGYZÉK .....</b>	<b>30</b>

## Jelölésjegyzék

1. SoC	Töltöttségi állapot
2. SoH	Egészségi állapot
3. SoF	Funkcionalitási állapot
4. C	C ráta
5. AGM	Absorbent Glass Mat
6. EIS	Elektrokémiai impedancia-spektroszkópia
7. SOCi	Kezdeti SOC érték
8. Ibat	Az akkumulátor által leadott áram
9. Qnom	A névleges kapacitás
10. T	Hőmérséklet
11. t(I)	Vizsgáló-impulzus időtartama
12. t(R)	Relaxációs idő
13. Rs	Az akkumulátor keresett ellenállása
14. CC	Konstans áramú töltés
15. CV	Konstans feszültségű töltés

## Absztrakt

A villamos energiatárolás univerzális megvalósítása egy a jövőbe mutató innovatív kihívás, amely a jelenben számos kérdést hordoz magában. A mai technológiai lehetőségeket figyelembe véve az ipar az akkumulátorokra támaszkodik elsődlegesen energiatárolás szempontjából, aminek következtében felhasználásuk egyre elterjedtebbé válik.

A növekvő felhasználásnak köszönhetően egyre elterjedtebbek az olyan biztonságkritikus rendszerek, amelyek energiaellátása akkumulátorról biztosított. Vegyük példaként egy repülőgép alrendszerét ellátó akkumulátort, amelynek a rendszert akkor is táplálnia kell, amikor adott körülmények között a repülőgép nem képes elektromos áram előállítására az alrendszer számára. Az effajta akkumulátorok töltöttségi szintjét célszerű közel maximális szinten tartani, ezért a State of Health (*SoH*), vagyis az egészségi állapot megállapítása nehézséget jelent. Az egészségi állapot a funkcionalitás, vagyis a State of Function (*SoF*) egy meghatározó paramétere, aminek pontos ismerete elengedhetetlen egy biztonságkritikus rendszer akkumulátorról való biztonságos üzemeltetése során. A *SoF* paraméter minden esetben a felhasználáshoz egyedileg definiált paraméter, amely megmutatja, hogy az akkumulátor, mint energiaforrás milyen mértékben képes elegendő energiát biztosítani az adott funkció fenntartásához.

A *SoH* paraméter elárulja azt, hogy az akkumulátor mikor jár az élettartama végén és igényel helyettesítést. A *SoH*-t több, az akkumulátor egyéni jellemzője befolyásolja, mint a belső impedancia növekedése az idővel, vagy a töltést felvevő-, illetve tároló képesség. Az egyik legelterjedtebb és legegyszerűbb módszer a *SoH* meghatározására a kapacitáscsökkenés mérése, amelyhez az akkumulátor teljes kisütése szükséges. Ez a módszer a biztonságkritikus rendszerek esetében nem kivitelezhető, mivel az akkumulátor nem süthető ki tetszőleges mélységig.

Jelen tanulmány célja egy olyan módszer bemutatása, amely egyszerűen, alacsony számításigénnyel képes egy biztonságkritikus rendszert ellátó akkumulátor *SoH* paraméterét megbecsülni magas pontosság mellett. Az eljárás empirikus méréseken alapszik, amely későbbi továbbfejlesztés céljából sztochasztikus algoritmusokkal optimalizálható. Az eljárással szembeni elvárás, hogy a kapott eredmény felhasználható legyen a *SoF* számításához és tudományos helytállósága mellett ipari, valós környezetben is implementálható legyen. Az eljárás alapvető célja feltérképezni az öregedésből eredő ellenállás változást, és azt felhasználva becslést adni az egészségi állapotra.

## Definíciók

**State of Charge:** A  $SoC$  általános definíciója:  $SoC = \frac{C_f}{C_{nom}}$ , ahol  $C_f$  az aktuálisan felhasználható kapacitás a merítés pillanatnyi fázisában, illetve  $C_{nom}$  az akkumulátor névleges kapacitása [1].

**State of Health:** A  $SoH$  általános definíciója:  $SoH = \frac{C_{max}}{C_{nom}}$ , ahol  $C_{max}$  az aktuálisan kinyerhető maximális kapacitás a merítési ciklus elején, illetve  $C_{nom}$  az akkumulátor névleges kapacitása [1].

**State of Function:** A  $SoF$  általános definíciója:  $SoF = \frac{P_{max}}{P_{nom}}$ , ahol  $P_{nom}$  a névlegesen kivehető energia,  $P_{max}$  pedig az akkumulátorból aktuálisan kivehető maximális energia a merítési ciklus adott fázisában [2].

**C ráta:** Az akkumulátorok töltésénél és merítésénél használt áram nagysága a tanulmányban  $C$  rátában kerül megadásra. A  $C$  ráta egy olyan mérték, amely a merítési áram nagyságát rendeli hozzá az akkumulátor kapacitás nagyságához.  $1 C$  az az áram amperben mérve, amely az akkumulátort  $1$  óra alatt meríti le. Ez egy  $4 Ah$ -s akkumulátor esetében  $4 A$ -t jelent (ebben az példában  $1 C = 4 A$ ,  $0.5 C = 2 A$ ) [3].

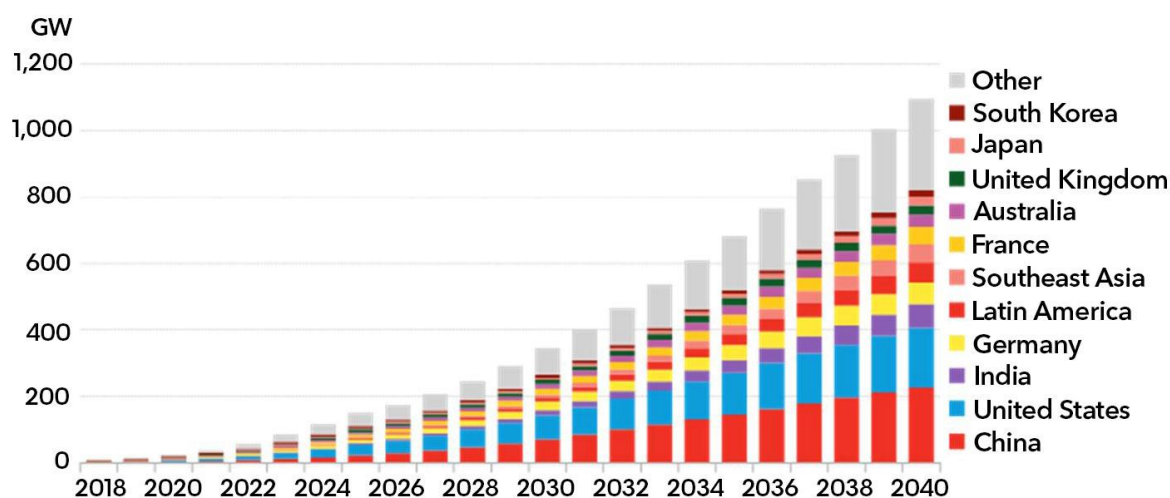
**Biztonságkritikus rendszer:** Biztonságkritikusnak nevezzük azon rendszereket, melyek hibás működése jelentős anyagi kárt okoz, vagy emberek testi épségét, életét veszélyezteti. Autóipari rendszerek esetében tipikusan ilyen például az elektronikus szervókormány, az ABS, ESP, és az adaptív tempomat rendszerek. Más alkalmazási területen is találhatunk ilyen rendszereket, például nukleáris és vegyi üzemek vezérlőrendszerei, orvosi rendszerek, repülésirányító (földi), és vezérlő (fedélzeti) rendszerek, vagy a vasúti biztosító berendezések [4].

**Failure mode:** A rendszer egy olyan állapota, amibe kerülve nem képes a rá bízott feladatot ellátni.

## Bevezetés

Napjainkban az energiatárolás területe dinamikus fejlődésen megy keresztül. Az igény egyre növekszik az elektromos-energiatárolás különböző irányzatai felé. Jelen tanulmány az akkumulátoros energiatárolással foglalkozik, illetve azon belül az akkumulátorok állapotbecslésével. Mit értünk egy akkumulátor állapotbecslésén? Miért van erre szükség? Hogyan függ ez össze a biztonságkritikus rendszerekkel?

### Global cumulative energy storage installations



Source: BloombergNEF

### 1. *Ábra: A globális beépített akkumulátor kapacitás alakulása a következő évtizedekben*

Forrás: BloombergNEF

Ahogy azt az **1. ábra** is szemlélteti, a következő évtizedekben a beépített globális akkumulátor kapacitás exponenciális növekedése lesz várható. A technológia fejlődése lehetővé tette az akkumulátorok sokrétű felhasználásának az elterjedését, így különböző iparágak (pl. *autóipar, repülőgépipar, egészségügy, vasútipar*) már biztonságkritikus rendszerek esetében akkumulátorokat is alkalmaznak tápforrásként.

Az akkumulátorok esetében különböző állapotok definiálhatók, mint a *SoC*, *SoH*, vagy a *SoF* (*Definíciók*). Annak érdekében, hogy megállapíthassuk, hogy az akkumulátor képes-e ellátni a rá bízott feladatot (*SoF*), ahhoz a *SoC*, illetve *SoH* mindenkor ismerete elengedhetetlen.

Például egy akkumulátorról működtetett biztonságkritikus rendszer aktuátorának legalább tíz aktuálást kell elvégezni ahhoz, hogy a rendszer biztonságos állapotba hozható legyen, miután bekövetkezik a failure mode. Ebben az esetben fontos azt tudnunk, hogy a rendszer pontosan hány hátralévő aktuálást tesz lehetővé. Ennek az információnak a meghatározása nem lehetséges az akkumulátor pontos állapotbecslése nélkül. Az akkumulátorok állapotbecslése az energiatárolás egy aktuális kihívása.

Továbbá, az akkumulátorok egyre növekvő számban táplálnak redundás rendszereket, amelyeknek a működése szintén túlnyomó részben biztonságkritikus [5]. Ebben az esetben még komplexebb monitorozó rendszerre van szükség, ugyanis a *SoH* meghatározása mellett a különböző akkumulátorok egyéges *SoH* szinten tartása is szükséges. Erre biztonsági szempontból, illetve költséghatékonysági szempontból is szükség van, mivel a rendszerben gyengébb akkumulátor a magasabb *SoH* szinttel rendelkező akkumulátorokra károsan hat, így jelentősen rontva a rendszer „eredő” *SoH* szintjét.

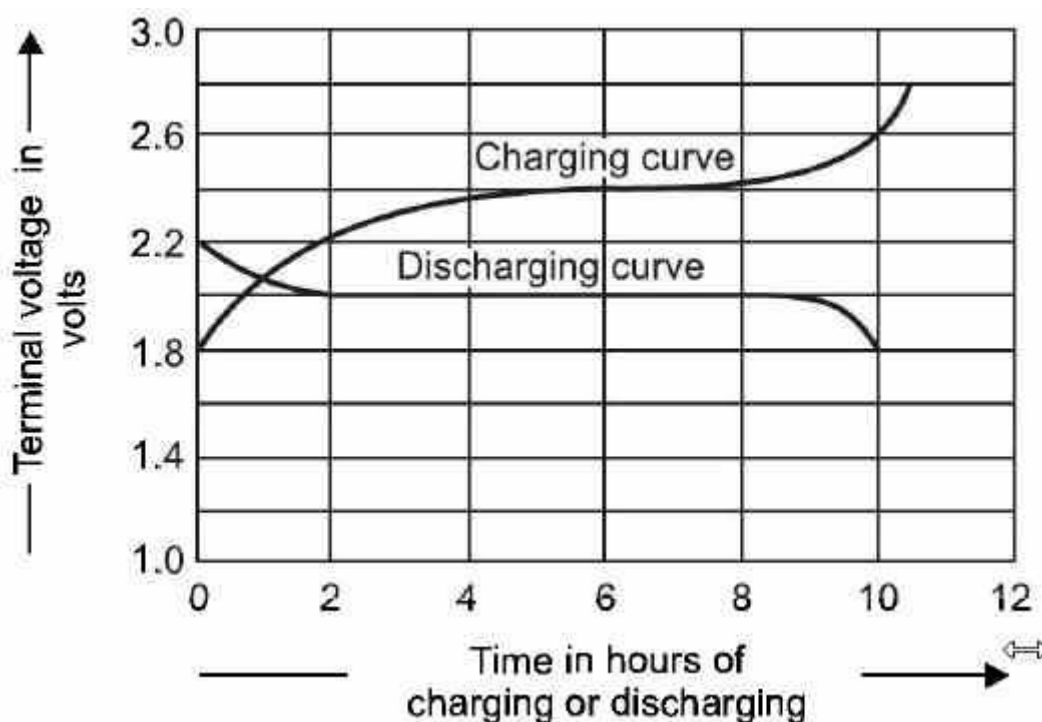
Az akkumulátorok komplex, nemlineáris rendszerek, paramétereik erősen függenek a környezettől, illetve saját egyéni belső tulajdonságaiktól, amelyek a korrallal szintén változnak. Jelen tanulmány célja kifejezetten a *SoH* magas szintű becslésére irányuló módszer bemutatása, amely alacsony kapacitás kinyerése mellett, alacsony számításigénnyel végzi a *SoH* meghatározását, így kedvezővé téve az algoritmus implementálását beágyazott rendszerekre.

## 1. Állapotbecslési lehetőségek

Jelen fejezet célja az elterjedt állapotbecslő módszereknek a bemutatása, azok előnyeinek, illetve hátrányainak ismertetése. A módszerek a *SoH* állapotbecslés nehézségeire világítanak rá, illetve a később bemutatott módszer megértéséhez szolgálnak alapul.

### 1.1. Feszültségmérés

Az akkumulátor kapocsfeszültségének a mérése a legegyszerűbb mérési eljárás, ami tájékoztatást adhat számunkra az akkumulátor állapotáról. Egy komoly hátránya a módszernek, hogy a kapocsfeszültség más-más karakterisztikát vesz fel töltés, valamint merítés esetén. A feszültségmérés módszerének egy lehetséges bővítése a töltési és merítési ciklusok különválasztása és ezeknek a feszültségtartományon belüli vizsgálata. Emellett a kapocsfeszültség erősen függ az akkumulátor kémiai állapotától („lapos” karakterisztikák esetén nagy pontatlanság), illetve szerkezeti felépítésétől. Ez a módszer a mai elvárásoknak egyre kevésbé tesz eleget, így többnyire olyan alkalmazások esetében használják, ahol a működés feszültséghatárokhoz kötött és csak tájékoztató jellegű információra van szükség. A módszer a *SoC* közelítő értékén kívül másról nem ad tájékoztatást.

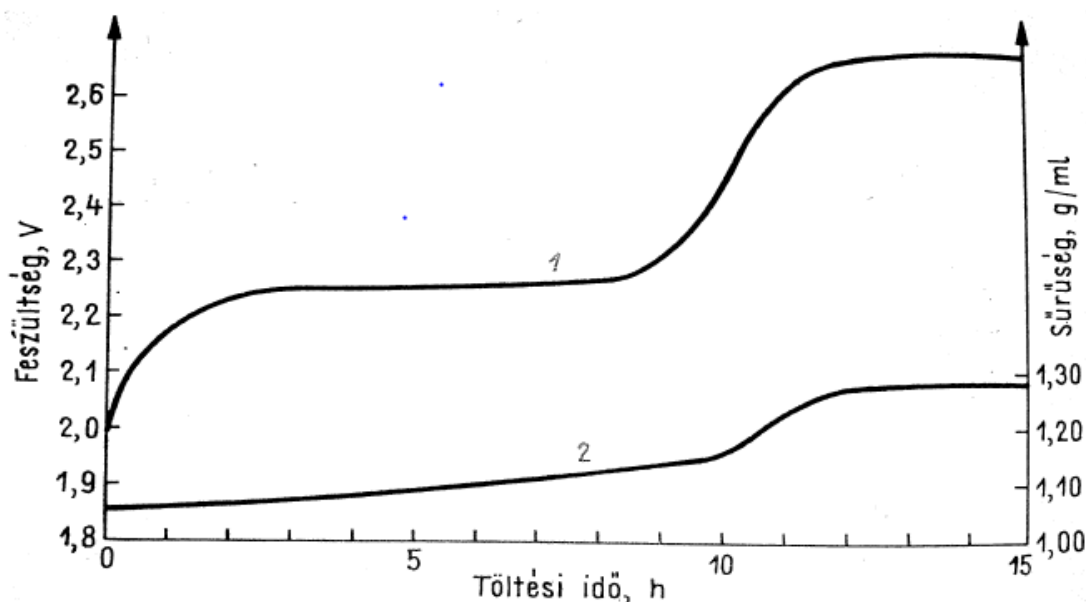


2. Ábra: Ólomsavas akkumulátor cella feszültsége töltés / merítés hatására [6]



## 1.2. Sűrűség mérés

A töltöttségi állapotról szintén tájékoztatást ad a folyékony elektrolittal rendelkező akkumulátorok esetében az elektrolit sűrűségének vizsgálata. A módszer elvárása, hogy a vizsgált akkumulátor elektrolitja intenzíven vegyen részt a kémiai reakciókban, ami például az ólomsavas akkumulátorok esetében teljesül. Az ólomsavas akkumulátorok esetében a módszer akkor alkalmazható, amikor egyéb zavaró tényező hatása elhanyagolható. Zavaró tényező például az elektródák passziválódása, amikor az amorf ólom-szulfát kristályos ólom-szulfáttá alakul. További zavaró tényező a pólusok eltömődése a használatból eredően, aminek eredményeként az ionok nem tudnak behatolni az elektróda belsejébe. Ezek a jelenségek az akkumulátor kapacitását lényegesen lecsökkenthetik az elektrolit elváltozása nélkül. Léteznek megfontolások, amelyek bonyolult úton ezt a módszert használva próbálnak *SoH*-t számítani, azonban ez nem célra vezető alkalmazás szempontjából, mivel a mérések kivitelezése bonyolult, illetve az adatok feldolgozása is számítógépes feladat. Az akkumulátor új állapotában a módszer a *SoC*-ről jó közelítést ad [7].



3. Ábra: A feszültség és az elektrolit sűrűség kapcsolata [7]

## 1.3. Coulomb-counting

A Coulomb-counting, vagyis a töltésszámlálás alap elgondolása, hogy az akkumulátorból kinyert áramot időben integrálva számítunk kapacitást [1].

$$SOC = SOC_i - \int_t^{t+\tau} \frac{I_{bat}}{Q_{nom}} dt \quad (1)$$

Az egyik leggyakrabban használt módszer *SoC*, illetve *SoH* becslésére egyaránt. A módszer elterjedtsége egyszerűségében rejlik, ugyanis nem igényel komoly hardvert, illetve drága szenzorokat. Egyszerűsége mellett, körülbelül *10%* hibahatárú becslést ad az állapotokra, amennyiben ismerjük az akkumulátor Coulomb-hatásfokát (többnyire *~ 90 %*), ami különféle veszteségeket vesz figyelembe, például a disszipációt. A módszer segítségével a *SoC* meghatározható, mivel ismert az akkumulátor névleges kapacitása, illetve mérjük a kivett kapacitást, így a maradó kapacitás ismerté válik. Amennyiben az akkumulátort *100%*-ban merítjük, akkor meghatározható az, hogy mennyi az összesen kivehető kapacitás. Ezt a kapacitást minden teljes merítési ciklus után viszonyítani tudjuk az akkumulátor névleges kapacitásához, és az eltérésből a *SoH* számolható. Biztonságkritikus rendszerek esetében azonban a töltöttségi szintet törekszünk közel maximum szinten tartani, így teljes kisütési ciklusokkal nem határozható meg a *SoH*.

#### **1.4. Elektrokémikus impedancia-spektroszkópia (EIS)**

Az EIS egy olyan módszer, amely az akkumulátor impedanciáját különböző frekvenciákon vizsgálja, és a kapott impedancia-karakterisztikák összehasonlításából megállapíthatóvá válik a *SoC*, illetve a *SoH* [8].

Az EIS fő előnyei:

- *SoC*, illetve *SoH* meghatározása
- A reakciók mechanizmusának megfigyelése
- Az aktív felület megváltozásának nyomon követése
- A szeparátor vizsgálata
- Az elektródák egymástól független vizsgálata és összehasonlítása
- Korróziós folyamatok detektálása és azonosítása
- Az elektródák kinetikájának a vizsgálata

A módszer előnyei mellett azonban hátrányai is jelentkeznek. Az EIS mérés a teljes spektrumon körülbelül *3* percet vesz igénybe, amely igencsak megnehezíti a módszer alkalmazását biztonságkritikus rendszerek esetében. Emellett, a mérésnek jelentős hardver és műszer igénye van. A módszer megértése mély elektrokémiai tudást igényel, így csak a tanulmány szempontjából releváns adatok kerülnek ismertetésre.

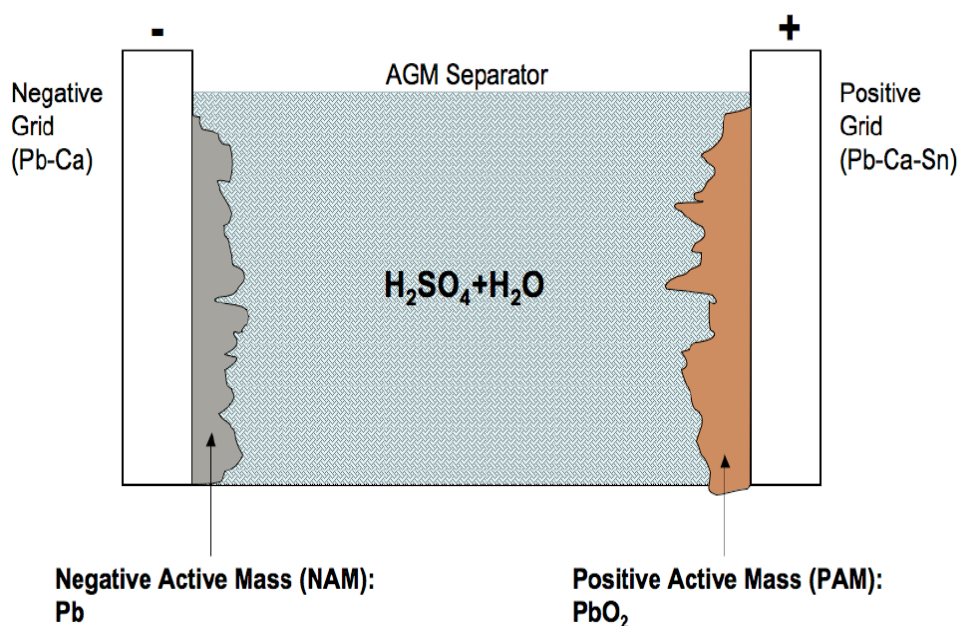
## 2. Kémiai háttér bemutatása

Annak érdekében, hogy a bemutatott módszer értelmezhető legyen, a szükséges kémiai alapok ismerete elengedhetetlen. Jelen fejezet célja betekintést nyújtani az ólomsavas akkumulátorok kémiai világába, feltárni azokat a jelenségeket, amelyek elsősorban felelősek az akkumulátorok degradációjáért.

### 2.1. Miért ólomsavas akkumulátor?

Felmerülhet a kérdés, hogy a XXI. századi technológiákat figyelembe véve, miért az ólomsavas akkumulátorra esett a választás a tanulmányban a mérések elvégzéséhez? Annak ellenére, hogy az ólomsavas akkumulátor egyfajta „korszerűtlen” választásnak tűnik, számos jellemzőjének köszönhetően a jelenben, továbbá a jövőben is meghatározó energiatároló szerepet fog betölteni. Az ólomsavas akkumulátorok ellenállóbbak a mechanikai igénybevétellel eszemben, mint lítium-ion-os társaik, ami kiemelkedővé teszi ezt a technológiát a jelenlegi lehetőségek fényében. Emellett, nem szükséges hőszabályozás alkalmazása és széles hőmérséklet tartományban ( $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  -  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) alkalmazható az ólomsavas akkumulátor, ami biztonságkritikus rendszerek tápellátásának a megvalósítására igencsak kedvező. A technológia kedvező ára is hozzájárul a meghatározó energiatároló szerep betöltéséhez.

### 2.2. Az AGM akkumulátor fő alkotóelemei



4. Ábra: Ólomsavas AGM akkumulátor felépítése [9]

Ahogy azt a **4. ábra** mutatja, hat fő komponens különböztethető meg AGM típusú akkumulátorok esetében. Megkülönböztetünk pozitív és negatív elektródát, illetve az ezekhez tartozó pozitív (PAM) és negatív (NAM) aktív anyagot. Fő alkotóelemek még az elektrolit ( $H_2SO_4+H_2O$ ) és a belső rövidzár elkerülésére szolgáló szeparátor. A használatlaltal járó kapacitás-vesztésért az elektródák, valamint az aktív anyag felületén végbemenő változások a fő felelősek. A többi komponens degradációban betöltött szerepe elhanyagolható, így ezek külön nem kerülnek részletezésre.



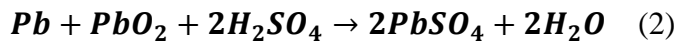
**5. Ábra: Az AGM akkumulátor „szendvices” belső szerkezete [10]**

### **2.3. Szulfátosodás és korrózió**

A továbbiakban az akkumulátor kapacitásának a csökkenését előidéző kémiai folyamatok kerülnek bemutatásra, amelyek elsődlegesen felelősek a *SoH* romlásáért. A töltési-merítési ciklusok során olyan *irreverzibilis* folyamatok játszódnak le, amelyek az akkumulátor kapacitás-vesztésével járnak. Ezen folyamatokra nagy hatással van az, hogy milyen hőmérsékleten játszódnak le, illetve milyen merítési-töltési karakterisztika kerül alkalmazásra, vagyis a felhasználás típusa, körülménye nagy mértékben befolyásolja az öregedés mértékét, sebességét.

A szulfátosodás egy irreverzibilis kémiai folyamat, amely az akkumulátorban elsősorban a merítési ciklusok hatására megy végbe. A folyamat végbemenetelét elősegíti a magas hőmérséklet ( $T > 25\text{ °C}$ ), a használatból eredő sajátosságok, valamint az akkumulátor kora.

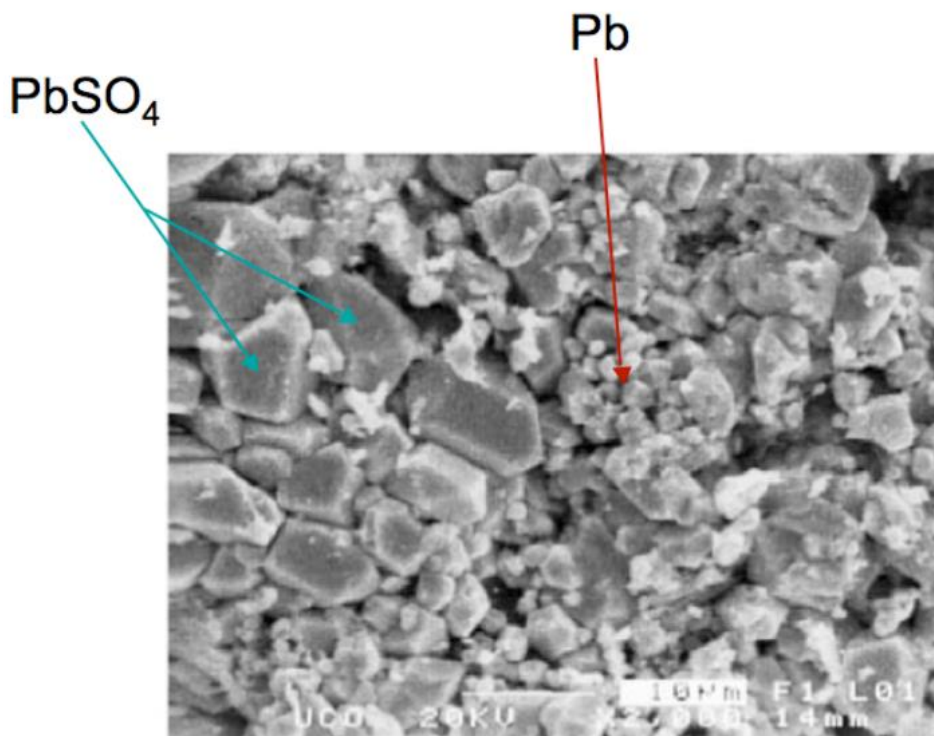
A következő egyenlet a szulfátosodás folyamatát mutatja be merítés hatására [9]:



ahol,

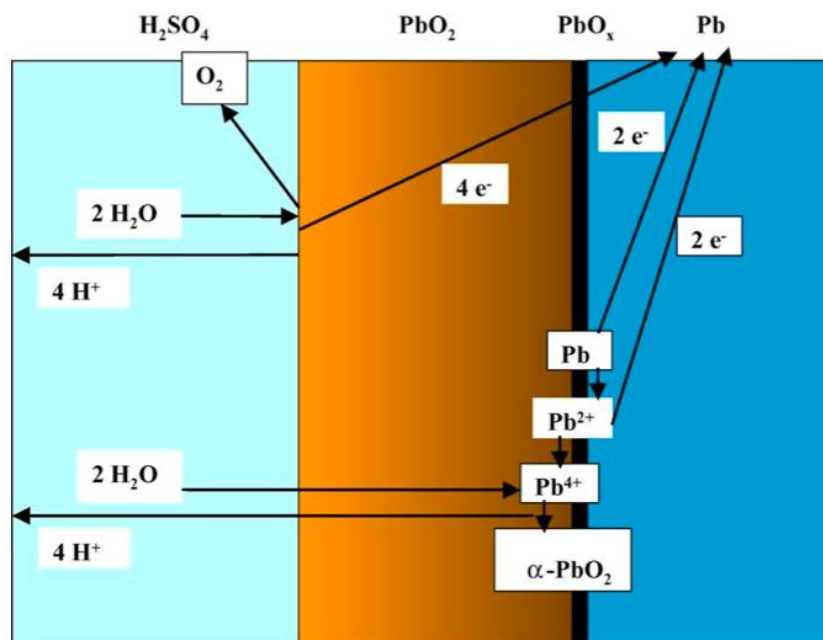
Pb	az ólom
PbO <sub>2</sub>	az ólom-dioxid
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	a kénsav
PbSO <sub>4</sub>	az ólom-szulfát
H <sub>2</sub> O	a víz.

Az ólom-szulfát (**PbSO<sub>4</sub>**) merítés hatására jön létre. A probléma akkor jelentkezik, amikor az ólom-szulfát kikristályosodik az aktív anyagra és elektrokémiai inaktív lesz. A folyamat irreverzibilis, ami az akkumulátor töltésével sem, vagy csak elenyésző szinten visszafordítható. Az inaktív kristályok elfedik az elektródákon megtalálható aktív anyagot, illetve gátolják annak diffúzióját, ezáltal jelentős kapacitás-csökkenést idézve elő. Kísérlettel bizonyítható, hogy a szulfátosodás intenzitását növeli az alacsony töltöttségi szint, a magas hőmérséklet, valamint a nagy árammal ( $I > 1 \text{ C}$ ) végzett merítés. A szulfátosodás hatására az akkumulátor töltést továbbító képessége jelentősen romlik (**töltés-átlépési** ellenállás növekszik).

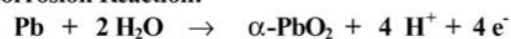


6. Ábra. Az ólom-szulfát elfedi a nála kisebb aktív ólmot [9]

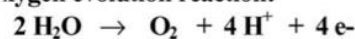
Az akkumulátor egészségi állapotát szintén nagy mértékben befolyásolja az elektródákon végbemenő korrózió. Az elektrolitban lévő víz az elektródán található ólom ötvözetet ólom-szulfáttá oxidálja, amely inaktív anyaggá kristályosodik az elektróda felületén, ezzel csökkentve a leadható kapacitás nagyságát. A korróziót mind a töltés, mind a használatlan állapot elősegíti. Empirikus úton belátható, hogy magas töltőfeszültség ( $U_{töltő} > 14V$ ) alkalmazása és nagy töltőáramok ( $I > 0.1 C$ ) használata felgyorsítja a korrodálást. A korrodálás eredményeként az akkumulátor *ohmikus* ellenállása növekszik.



Corrosion Reaction:



Oxygen evolution reaction:

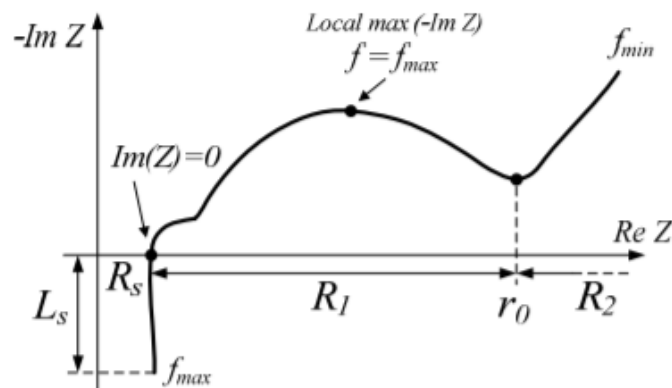


7. Ábra: A korrózió folyamata [9]

A bemutatott jelenségek kimagasló szerepet töltenek be az akkumulátorok kapacitásvesztésében. Ezen jelenségek eredményeként az akkumulátorok ohmikus, illetve töltés átlépési ellenállása növekszik. Ismerve ezen ellenállások értékeit, következtethető, hogy az akkumulátor élete mely stádiumában jár. Ezen ellenállásoknak a meghatározása azonban bonyolult feladatot jelent. Az előzőekben bemutatott EIS eljárás ugyan hatékonyan képes ezeket az értékeket meghatározni, de a műszer, illetve időigénye nem teszi kedvező megoldássá valós idejű alkalmazások esetében. Szükséges tehát egy olyan módszer megalkotása, amely képes az akkumulátorok ellenállását meghatározni valós időben, egyszerű mérési módszerekkel.

### 3. A vizsgáló jelek módszere

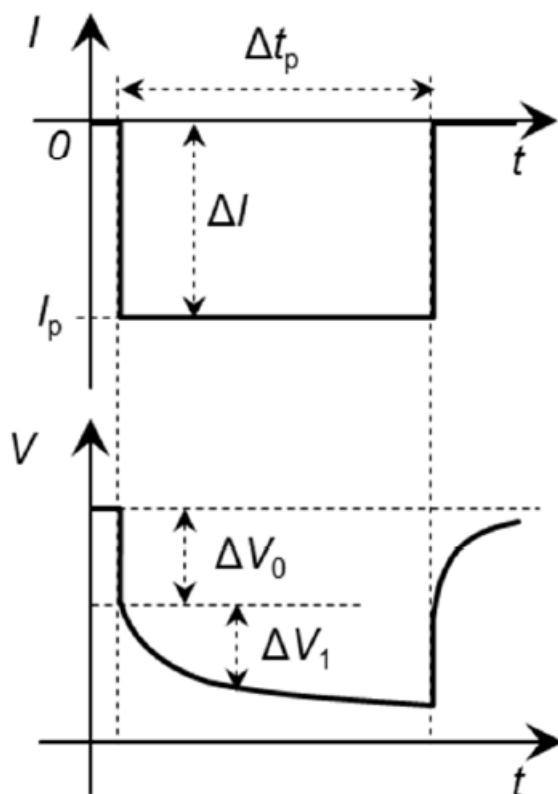
A következőkben egy olyan saját kutatások útján elért módszer kerül bemutatásra, amely lehetővé teszi az akkumulátorok ellenállás változásának feltérképezését az egészségi állapot meghatározásához. A módszer alap gondolata, hogy egy vizsgálójel hatásaként megjelenő feszültségválaszból kerül megállapításra az ellenállás érték. A módszer alapjául a már korábban bemutatott EIS szolgál.



8. Ábra. Akkumulátorokra jellemző Nyquist-diagram [11]

Az új módszer előnye, hogy az impedancia spektroszkópia eredményeként kapott Nyquist-diagram csupán egy pontját veszi figyelembe, határozza meg egy egyénileg megalkotott eljárás alapján, ahol az impedancia képzetes része 0 ( $Im(Z) = 0$ ), így lényegében a feladat ellenállásértékek vizsgálatára egyszerűsödik. A módszer további nagy előnye a spektroszkópiával szemben, hogy lényegesen kevesebb számításigény és vizsgálati idő jellemzi, emellett a hardver igénye is alacsonyabb.

A kapott ellenállás értékekhez az aktuális  $SoH$  érték hozzárendelhető, így az akkumulátor egészségi állapota ismertté válik. A módszer egyszerűen elvégezhető, kevés kapacitás felhasználása mellett ( $1\% >$  kivett kapacitás), továbbá az adatok kiértékelése is alacsony számításigénnyel jár. A módszer további előnye, hogy a vizsgálójel és a használt paraméterek ( $SoC$ ,  $T$ ,  $I$ ,  $t(I)$ ,  $t(R)$ ) teljes mértékben az adott akkumulátorhoz, valamint felhasználási módhoz igazíthatóak.



9. Ábra. Feszültség válasz konstans merítőáram hatására [12]

Az 9. ábra egy tipikus kisütési karakterisztikát mutat be konstans merítőáramot alkalmazva. Abban a pillanatban, amikor az akkumulátor terhelés alá kerül a feszültség közel „végtelen” meredekséggel zuhan egy az akkumulátorra jellemző pontig. Ezt a feszültségesést  $\Delta V_0$  jelöli. Ezért a feszültségesésért az akkumulátor tisztán ohmikus ellenállása ( $R_0$ ) a felelős. A második szakaszban a feszültségesés lelassul, még egy pontban a feszültség beáll egy rövid időre (az adott áram alakítja az idő hosszát) konstans (*stabil* pont) értékre. Ezt a feszültségesést a  $\Delta V_1$  jelöli. Ezért a szakaszért az akkumulátor töltés-átlépési ( $Rt$ ) ellenállása a felelős. Ez a két ellenállás érték együttesen egy az akkumulátorra jellemző egyedi értéket ad meg, amely a 2.3 részben ismertetett módon az akkumulátor degradációjával változik, ennek következtében a  $\Delta V_0 + \Delta V_1 = \Delta V$  érték növekszik.



## 4. A mérési eljárás bemutatása

Jelen fejezet célja bemutatni, a mérési módszertant. A módszer empirikus mérések útján került felépítésre, így az akkumulátor viselkedésének alapos megismerése kiemelt fontosságú volt.

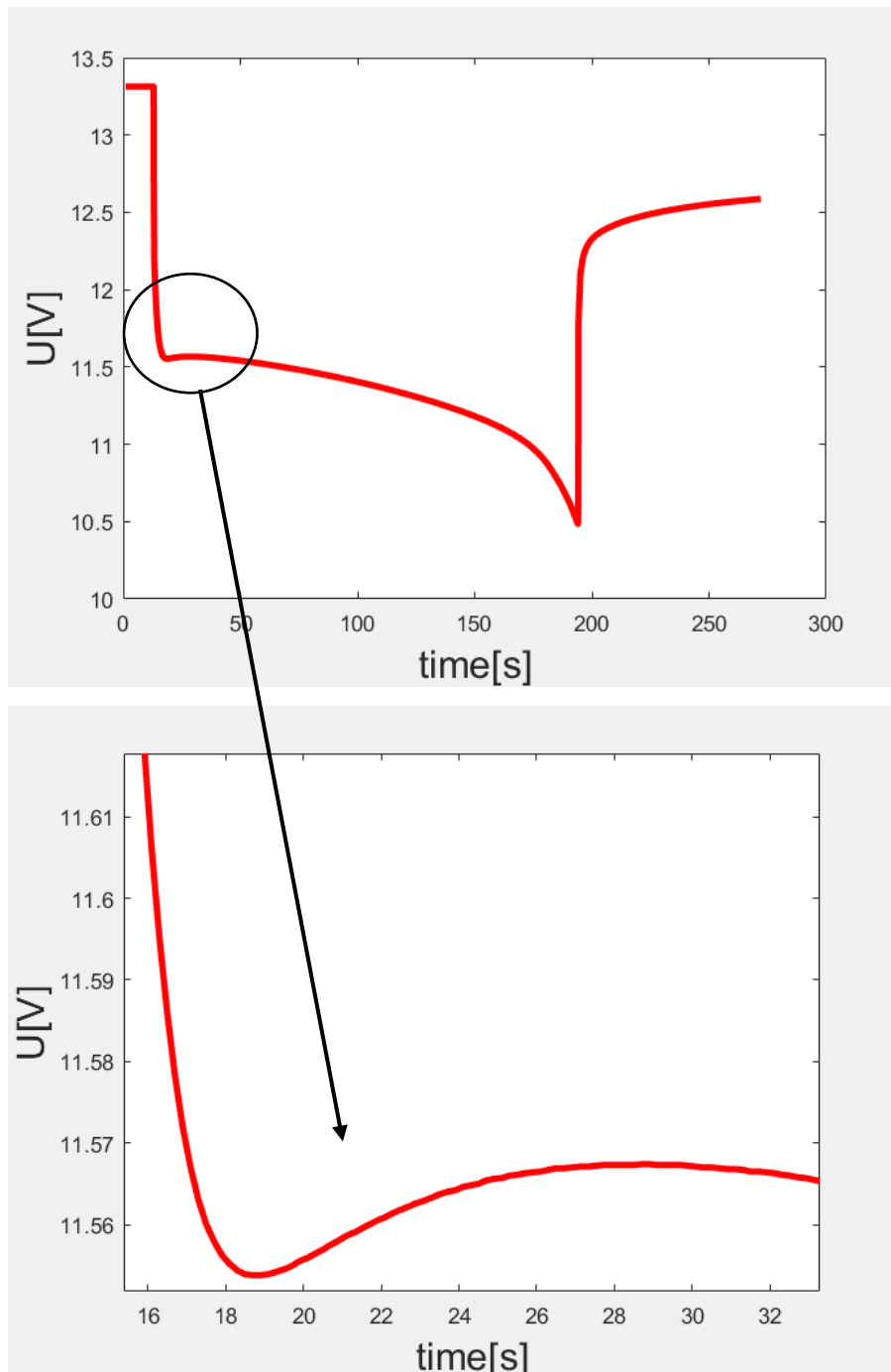
### 4.1. Pre-kondicionálás

Az akkumulátorokon a vizsgálódásokat elkezdve nem várt jelenség volt megfigyelhető. Az akkumulátorok kapacitása a mérések során növekedni kezdett. A szakirodalom a növekedést azzal magyarázza, hogy az akkumulátor ismeretlen ideig állhat töltés nélkül a kereskedőknél, aminek eredményeként a kémiai szerkezete passziválódik (a használat ezt visszafordítja új akkumulátorok esetében). Ezen felül a gyártás után az akkumulátor aktív anyagának a felülete még nincs kialakulva, illetve porozitás szempontjából sem vette fel a végleges formáját. Az első (~ 5 db) töltési/ merítési ciklusok után a kapacitás jelentős mértékben (akár ~5 %) növekszik. A jelenséget felismerve a mérések egy olyan akkumulátoron kezdődtek meg, amelyen a pre-kondicionálás elvégzésre került [13].

### 4.2. Paraméterek bemutatása

A 3. fejezetben bemutatott  $\Delta V$  meghatározásához  $I C$  konstans nagyságú terhelőáram került alkalmazásra. A terhelést egy programozható terhelőellenállás biztosította, amely egyben az adatok gyűjtésére is alkalmas volt. A vizsgált akkumulátor névleges kapacitása 4 Ah. A mérések szobahőmérsékleten ( $T \sim 25^\circ\text{C}$ ) kerültek elvégzésre 100 %-os töltöttség mellett ( $SoC = 100\%$ ).

Az eredményeket nagy mértékben befolyásolja a merítő áram alkalmazásának az időtartama ( $t(I)$ ), illetve a töltés és merítés között eltelt relaxációs idő ( $t(R)$ ). Nagy ( $I > I C$ ) merítőáramok esetében az tapasztalható, hogy a  $\Delta V$  meghatározásához szükséges ( $t(I)$ ) idő lecsökken, a kémiai folyamatok hamarabb játszódnak le.  $I C$  esetén a  $\Delta V$  meghatározásához szükséges *stabil* pont elérése 18 másodperc. Azonban mérések útján belátható, hogy az áram nagysága nem növelhető tetszőleges nagyságig az idő csökkentésének az érdekében. Egy bizonyos áramnagyság felett a feszültségválasz nem rendelkezik stabil ponttal, illetve nehezen értelmezhető komponenseket tartalmaz.

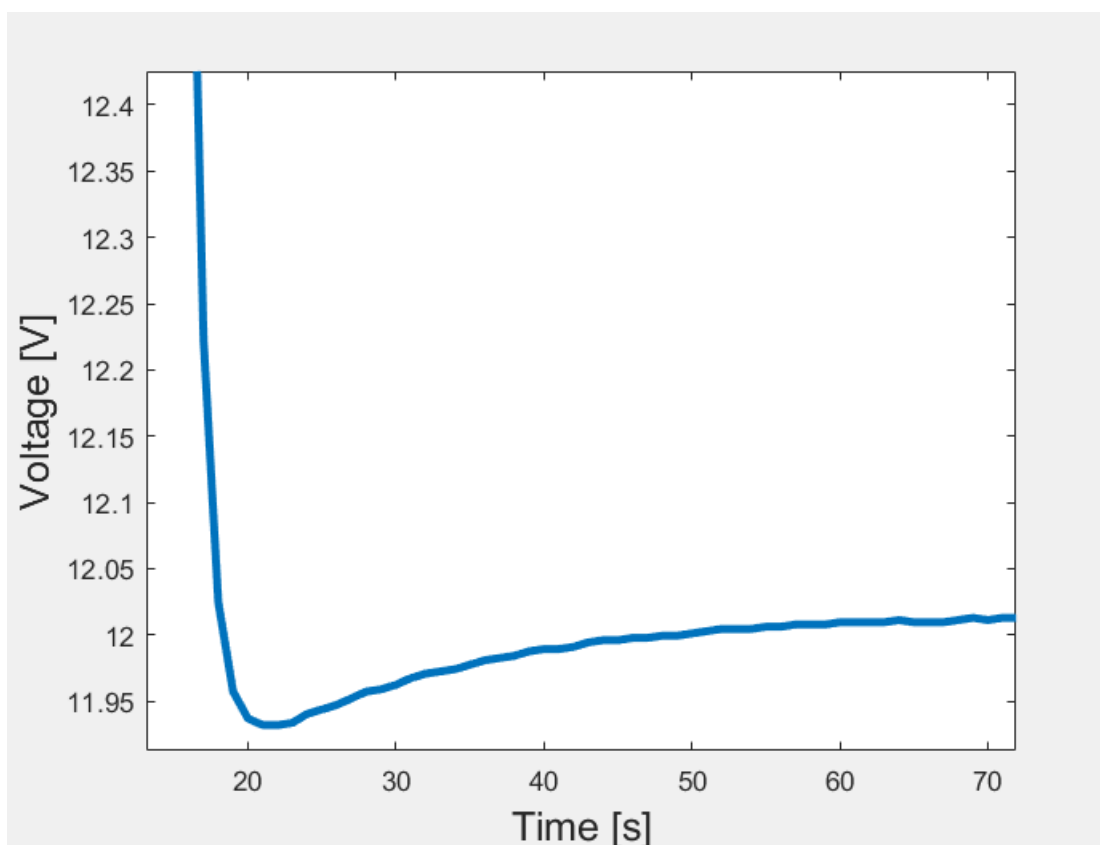


**10. Ábra: Ostor-effektus megjelenése nagy merítőáramok hatására**

Ahogy azt a **10. ábra** bemutatja, nagy merítőáram hatására a válasz eltér a **9. ábrán** bemutatottaktól. A folyamat olyan nagy intenzitással zajlik le, hogy szinte teljes egészében az ohmikus ellenállás hatása érzékelhető, illetve a várt stabil pont helyett a diffúzió hirtelen, „robbanásszerűen” megy végbe, így a válaszban egy nehezen értelmezhető „ostor-effektust” eredményez. A mérések során adódott, hogy a legnagyobb merítő áram az  $1,5 C$ , ahol a

diffúziós-áramok hatása még nem okoz zavart a mérésben, mindezek mellett a szükséges vizsgálati idő körülbelül 50 %-kal csökkent, 18-ról 9 másodperce.

A merítő áram nagysága mellett fontos, hogy a relaxációs idő sem választható meg tetszőlegesen nagy értékre. A relaxációs idő esetében törekedni kell a lehető legrövidebb időt megválasztani a töltés és merítés között, mivel a hosszú ideig pihentetett akkumulátorban számottevő elektrolit diffundál az elektródákba, így a válaszban ismét egy nehezen értelmezhető komponens jelenik meg. Hosszú relaxációs idő hatására a válaszban intenzívebb növekedés jelenik meg a stabil pont helyett, mint nagy áramú merítés hatására, továbbá a hatása is hosszabb ideig fennmarad.



**11. Ábra: A válasz módosulása hosszú  $t(R)$  esetén**

Hosszú pihentetés hatására már szükséges lenne az önkisülést is figyelembe venni, illetve az akkumulátor kémiai szerkezete is enyhén passzíválódhat. Ezek a tényezők jelentősen megnehezítik a mért adatok kiértékelését, így elkerülésük célszerű.

### 4.3. A használt paraméterek és a degradáció felgyorsítása

Az alkalmazott paraméterek:

- Hőmérséklet:  $\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Vizsgáló jel:  $1\text{ C DC}$
- Relaxációs idő: 20 perc
- Töltöttségi szint: 100 %
- Stabil pont elérése: 18 s

A degradációnak a felgyorsításának az érdekében az akkumulátor szándékos öregítésnek volt kitéve. A mérések után szándékos nagyáramú merítéseken esett keresztül, illetve mélymerített állapotban (10 V-ig merítve) relaxálódott  $1\text{ C}$  hétig a következő mérésig. Az ólomsavas akkumulátornak egy sajátos tulajdonsága, hogy a teljes kisütésekre különösen érzékeny és felgyorsul a kapacitás-vesztés. A mélymerített állapotban gyakran  $\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$  hőmérsékletnek volt kitéve az akkumulátor, amit egy hőfűvő biztosított. A felsoroltakat alkalmazva az akkumulátorban végbemenő szulfátosodás felgyorsítása volt a cél. Ugyanakkor nagy feszültség és töltőáramok kerültek alkalmazásra a korrózió felgyorsításának az érdekében. A töltés CC+CV módon történt a kísérletek során,  $14.4\text{ V}$  végfeszültséggel és  $0.5\text{ C}$  töltőárammal C/30 áramhatárig.

### 4.4. A módszertan összegzése

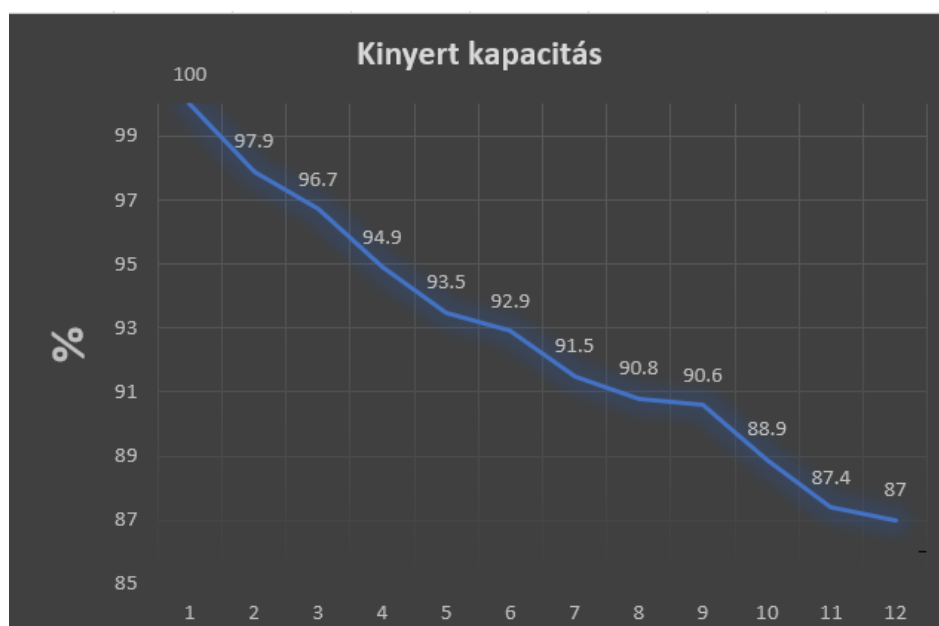
A megalkotott módszer az akkumulátor ellenállását határozza meg speciális vizsgálójel hatására, amely a következő módon működik: az akkumulátort a töltés után, 20 percet pihentetve DC merítőárammal terheljük, aminek a nagyságától függően egy bizonyos időtartamon belül az akkumulátor feszültségválasza elér egy stabil pontba (a feszültség értéke nem változik ebben a pontban). Mérésekből adódik, hogy az akkumulátor adott áramokra mindig ugyanakkora időn belül éri el ezt a pontot, ami  $1\text{ C}$  merítőáram esetén 18 másodperc. Az adott időtartamon belül az induló, valamint a végfeszültség kerül mérésre, így a  $\Delta V$  ismerté válik. Az akkumulátor ellenállás változása a degradációval a  $\Delta V$  növekedéséhez vezet, ami az akkumulátor ellenállásáról ad információt. A  $\Delta V$  növekedésével párhuzamosan az akkumulátor kapacitása is mérésre kerül (töltésszámlálással), ami csökkenést mutat. Az adott  $\Delta V$  értékek hozzárendelhetőek a mért kapacitásértékekhez. Az adatokból egy ellenállástérkép hozható létre, aminek az ismeretében az akkumulátor SoH paramétere meghatározható a kapacitás-vesztés mérése nélkül.

## 5. Mérési eredmények és következtetések

Az akkumulátorok tulajdonságainak a megismerése után a mérések egy új akkumulátoron kezdődtek meg. A mérések 12 alkalommal kerültek elvégzésre. A mérések fő célja volt, hogy megállapítsa, hogy az akkumulátor ellenállása valóban az elméleti megfontolások szerint növekszik, illetve milyen mértékben.

### 5.1. A kapacitás

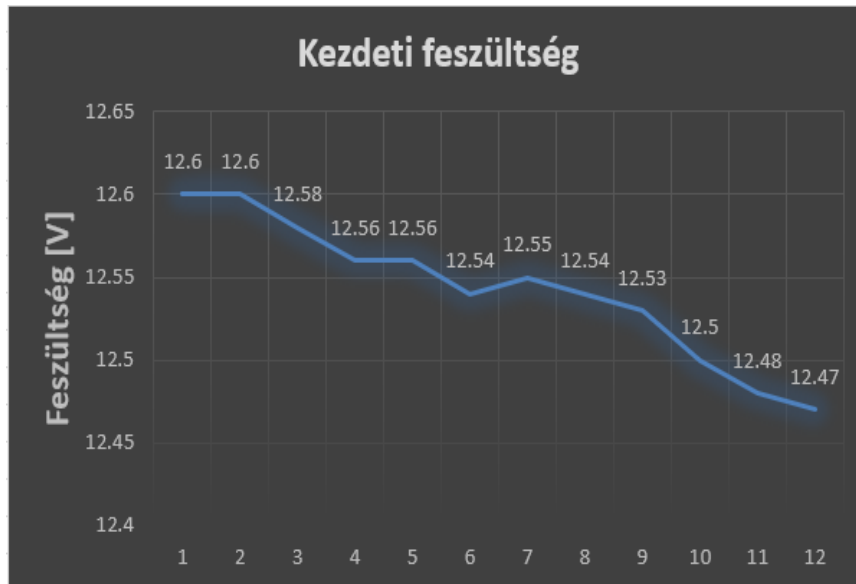
A kapacitás vizsgálat célja, megállapítani, hogy az öregedés hatására hogyan változik a megfigyelt akkumulátor kapacitása.



*12. Ábra: A kinyert kapacitás változása*

A **12. ábra** a kinyert kapacításra adódó adatokat mutatja. Jól látható, hogy az elvárásoknak megfelelően a kivehető kapacitás csökkent az öregítés hatására. A 12 mérési ciklus alatt bekövetkezett 13 %-os kapacitásvesztés számottevően soknak mutatkozhat, azonban fontos megjegyezni, hogy az akkumulátor „extrém” körülmények és merítési ciklusok hatásainak volt kitéve a vizsgálat során. A 100 %-os kapacitás a pre-kondicionálás után mért első merítési ciklus során kinyert kapacitás, a további értékek ehhez az értékhez kerültek viszonyításra.

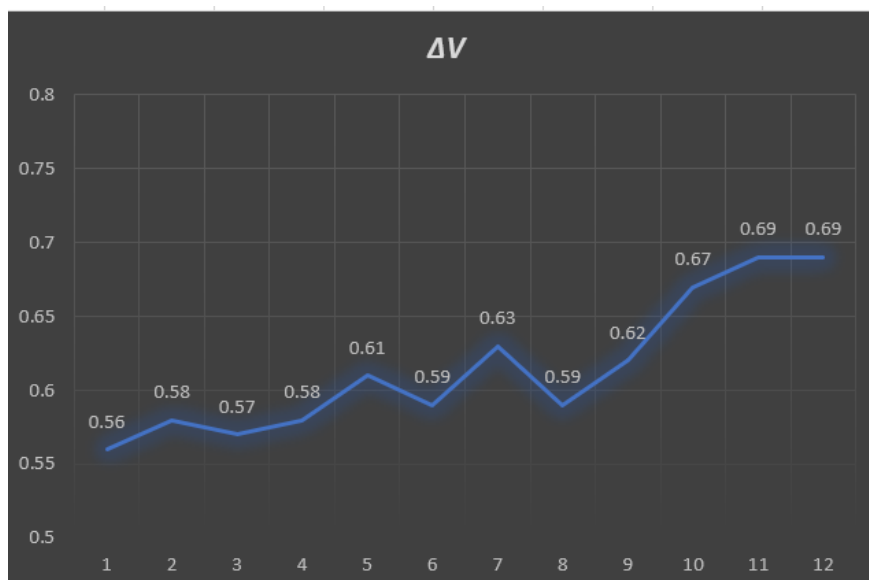
## 5.2. Kezdeti kapocsfeszültség



13. Ábra: A kezdeti feszültségváltozás

Ahogy azt a **13. ábra** mutatja a degradáció hatására a kezdeti kapocsfeszültség is csökkenést mutat. Ugyan nem figyelhető meg olyan jelentős mértékű csökkenés, mint a kivett kapacitás esetében, azonban az adott felhasználást figyelembe véve érdemes lehet a feszültségtartomány változását is számításba venni későbbi továbbfejlesztések céljából, így pontosabb *SoH* paraméter meghatározását téve lehetővé.

## 5.3. A $\Delta V$ változása és az ellenállás meghatározása



14. Ábra:  $\Delta V$  változása

A **14. ábra** a  $\Delta V$  változását mutatja be. A  $\Delta V$  az elvárásoknak megfelelően növekvő tendenciát mutat a degradáció hatására, míg a kivethető kapacitás a 5.1 részben bemutatott módon csökken. A  $\Delta V$ , illetve a vizsgálóáram ( $I$ ) értékét ismerve, Ohm-törvényét alkalmazva az akkumulátor általunk keresett ellenállása ismerté válik:

$$R_s = \frac{\Delta V}{I} \quad (3)$$

ahol

$R_s$  az akkumulátor keresett ellenállása.

A mért adatokban a 6-8. méréseknél megfigyelhető éles eltérések többek között mérési hiba eredményének tudhatók be. A mérések során az időzítés rosszul lett beállítva, így a vizsgáló jel hossza kevesebb volt, mint 18 másodperc. Azonban ezek az adatok is a mérési sorozat részét képezik, továbbá mivel a  $\Delta V$  paraméteren kívül a többi paraméter helyesen került meghatározásra, így az eredmények sorozatában feltüntetésre kerültek.



**15. Ábra:  $R_s$  értékei**

Az  $R_s$  értékek ismeretében azok hozzárendelhetőek az adott méréseknél ismert kapacitás értékekhez. Figyelembe véve a lehetséges mérési hibákat a kapott eredményeknél megállapítható, hogy meglehetősen jó képet adnak az akkumulátor öregedéséről. A fenti mérések alapján a kapacitásvesztés és az ellenállásérték ismeretében megállapítható, hogy  $R_s = 0.1725$  értéknél a  $SoH = 35\%$ , amennyiben a  $SoH = 100\%$  az akkumulátor kezdeti

kapacitásához, és az  $SoH = 0\%$  értéket az akkumulátor  $80\%$ -os kapacitásához rendeljük hozzá (tehát az  $SoH = 0\%$ , amikor az akkumulátor a névleges kapacitásának csupán  $80\%$ -át képes szolgáltatni az új merítési ciklus elején). Ez az  $R_s$  térkép a továbbiakban képes a  $SoH$  értékéről információt adni ennek az akkumulátor típusnak ennél a specifikus felhasználásánál.



## 6. Szimuláció

A fejezet célja egy olyan részben saját fejlesztésű modell bemutatása, amely lehetővé teszi az 5. fejezetben kapott empirikus adatok alapján egy akkumulátor *SoH* állapotának a meghatározását. Az akkumulátorok modellezése komplexitásuk és nemlinearitásuk miatt egy komplikált feladat. A megfelelő akkumulátor modell megalkotása függ az akkumulátor kémijától, illetve attól, hogy milyen felhasználásra szánjuk. A dolgozat során egy olyan modell megalkotása volt a cél, amely a feszültségválasz szimulációjára képes, illetve könnyen implementálható egy esetleges funkciószoftverbe.

### 6.1. Az akkumulátor modellezés típusai

#### 6.1.1. Elektrokémiai modellek

Az elektrokémiai modellek az akkumulátorban végbemenő kémiai folyamatokon alapulnak. Az ilyen típusú modellek nagy pontossággal írják le a végbemenő kémiai folyamatokat, aminek eredményeként a legpontosabb akkumulátor modellek. Mindazonáltal, a folyamatok részletes leírásának köszönhetően rendkívül komplex modellek, ami implementálásukat és felhasználásukat korlátozza [14].

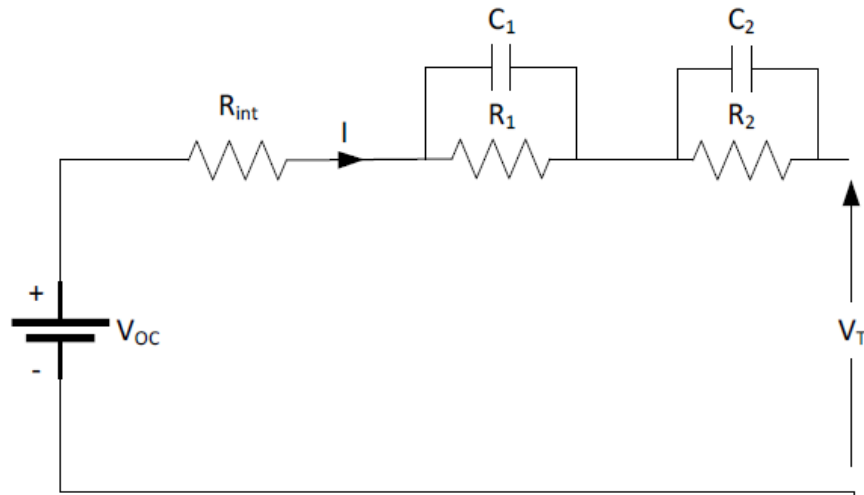
#### 6.1.2. Sztochasztikus modellek

Az akkumulátorok modellezésre szolgáló másik modelleszalád a sztochasztikus modellek. Az ilyen típusú modellek képesek az akkumulátor működését magas szinten leírni sztochasztikus algoritmusokkal, azonban ezeket az algoritmusokat többségében magas számításigény jellemzi, illetve a modellek megalkotásához nagy adatmennyiség szükséges, amelynek az elérése rendkívül idő- és műszerigényes feladat [15].

#### 6.1.3. Elektromos modellek

Szintén elterjedt modell típus az elektromos akkumulátor modell. A modell elektromos komponensek segítségével reprezentálja az akkumulátort. A modell tartalmaz egy feszültségforrást, amely az akkumulátor üresjárási feszültségét reprezentálja. Továbbá tartalmaz egy a feszültségforrással sorba kötött ellenállást, ami az akkumulátor ohmikus ellenállását helyettesíti. A modellben található még az ellenállással sorba kötött párhuzamos R-C tagokat, amelyek az akkumulátor dinamikus válaszkomponenséért a felelősek. Minél pontosabb modell megalkotása a cél annál több R-C tag használata szükséges, azonban figyelembe véve a pontosságot és a komplexitást a 2 darab R-C tag

használata mondható az optimálisnak. Ez a típusú modell kifejezetten előnyös akkor, amikor a kapocsfeszültséget szeretnénk modellezni. Ezen felül előnye a modellnek, hogy egy esetleges funkciófejlesztés során könnyen integrálható egy már meglévő másik modellbe.

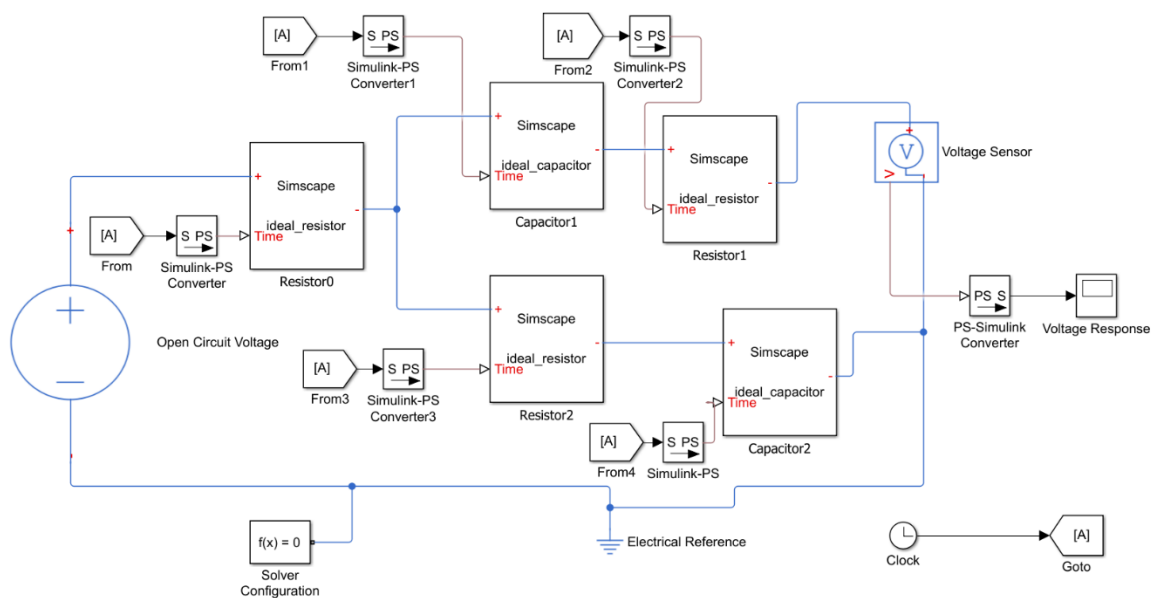


**15. Ábra: Másodfokú (2 R-C tag) elektromos helyettesítő modell [16]**

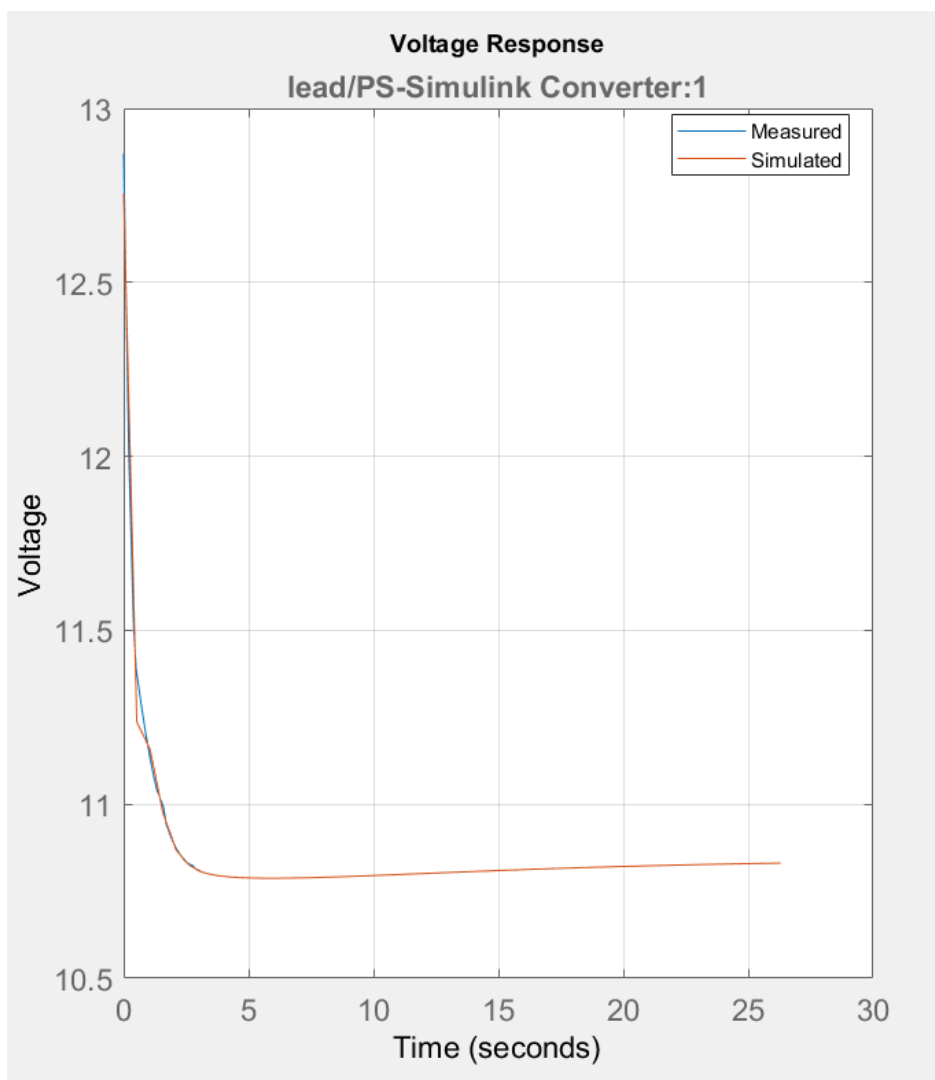
Az elektromos helyettesítő modell a SoC függvényében határozza meg a kapocsfeszültséget, ami a jelen esetben nem teljesen célra vezető, mivel a tanulmányban bemutatott  $\Delta V$  meghatározása az idő függvényében történik a mérések alapján  $I C$  konstans terheléssel. A modell úgy került módosításra, hogy a kapocsfeszültséget az idő függvényében határozza meg egy ismert terhelés hatására ( $I C$ ).

A modell felépítése Simulink-ben került megvalósításra a fizikai modellezést támogató Simscape Toolbox használatával. Az akkumulátorok nemlineáris rendszerek, így feszültségválaszuk számos tényezőtől függ. Ebből következik, hogy az elektromos modellt alkotó komponensek paraméterei nem állandóak. A változó paramétereket az idő függvényében egy look-up table tárolja. A modellben használt ellenállás, illetve kondenzátor elemek kiegészített funkciókkal (például look-up table) egyénileg megalkotott blokkok Simscape nyelven megírva. A C és R paraméterek meghatározására a Parameter Estimation Toolbox került felhasználásra.

A mérések során a kimért adatok alapján egy  $R_s - SoH$  look-up table megalkotható az 5. fejezet alapján. A modell az akkumulátor feszültségválaszát az első 18 másodpercre szimulálja, így a  $\Delta V$  számolható, amiből az ellenállás meghatározható a merítőáram ismeretében, így a hozzárendelt  $SoH$  (definíciók) érték ismerté válik. Ahogy azt a 17. ábra is bemutatja, a valós mért feszültségválasz adatok, illetve a szimulált adatok nagymértékben fedik egymást másodfokú elektromos helyettesítőképet alkalmazva.



**16. Ábra: Az elektromos modell elvi felépítése**



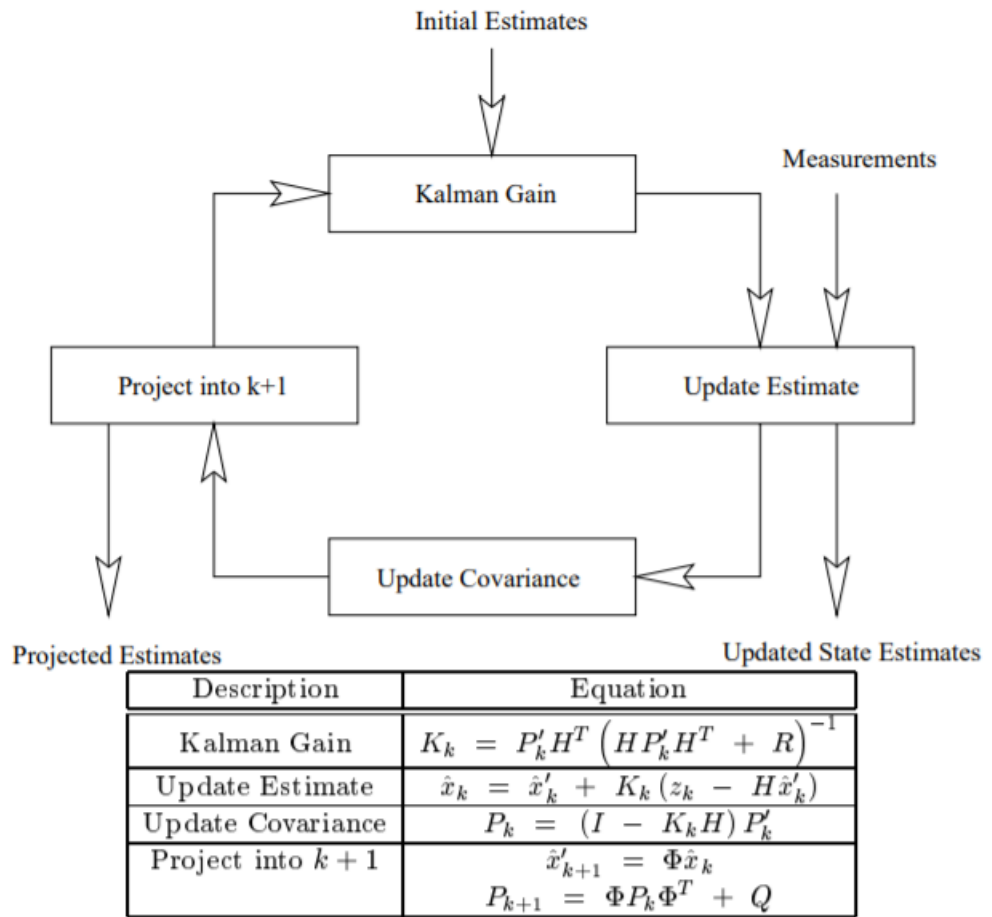
**17. Ábra: A szimulált (sárga) és a mért (kék) feszültségadatok kapcsolata**

## 6.2. Továbbfejlesztési lehetőség

A jelenlegi modell további bővítésekkel pontosabbá tehető, ami használatát még kedvezőbbé teheti valós idejű környezetbe való implementáláshoz. Ennek az alfejezetnek egy lehetséges továbbfejlesztési elgondolás bemutatása a célja. A fejezetben az elgondolás kerül bemutatásra, a matematikai háttér ismertetése nincs részletezve.

Amennyiben a szoftver egy beágyazott rendszeren fut és a feszültségmérés megoldott (ez az esetek nagy részében a monitorozás érdekében megoldott), úgy a mért feszültségadatok a modell további pontosítására szolgálnak Kálmán-szűrőt alkalmazva. A Kálmán-szűrő egy matematikai algoritmus, mely mozgó, változó rendszerek állapotáról ad optimális becslést sorozatos mérésekkel, figyelembe véve az állapotméréseket és a zavaró tényezőket (zajok, bizonytalanságok, pontatlanságok). Ezzel az algoritmussal pontosabb információ kapható a vizsgált tárgyról, mintha csak egy mérést végeznének el. Más szóval a Kálmán-szűrő a zajos bemenő adatok rekurzív mérésével egy optimális becslést ad a mérés tárgyának állapotáról [17]. A Kálmán-szűrő lineáris rendszerekhez lett kifejlesztve, azonban a kiterjesztett Kálmán-szűrőt alkalmazva ez a probléma áthidalható, mivel a kiterjesztett Kálmán-szűrő a nemlineáris adatok linearizálását is elvégzi.

A jelenlegi rendszer csupán egy Kálmán-szűrő blokkal egészülne ki, ami megírható MATLAB-ban, vagy a Simulink-ben található Extended Kalman Filter blokk is felhasználható. A Kálmán-szűrő blokk egyik bemenete a jelenlegi modell által számolt feszültségválasz lenne. A másik bemenet a feszültség szenzor által mért adat. A Kálmán-szűrő egy olyan eredményt szolgáltat, amely a modellen kívül figyelembe veszi a valós mért adatokat is, így még pontosabb feszültségválasz ismeretét téve lehetővé.



18. Ábra: A Kálmán-szűrő folyamatábrája és egyenletei [18]

## Összegzés

Az akkumulátortechnológiák nagyütemű fejlődésének köszönhetően egyre kedvezőbb lehetőséggé válik a biztonságkritikus rendszerek tápellátása akkumulátorról. Ezeknek a rendszereknek a magas szintű monitorozása alapelvárás a biztonságos működés érdekében. Az akkumulátorok komplexitásának köszönhetően a megfelelő állapotbecslő algoritmusok megalkotása egy multidiszciplináris kihívás, amely a jövő energiatárolásának egy meghatározó kutatási területe.

Jelen tanulmány célkitűzése egy olyan modell megalkotása volt, amely egyszerű mérések útján becslést képes adni kifejezetten a *SoH* állapotra. Az elvégzett mérések eredményeiből látható, hogy az akkumulátorok ellenállása a degradáció hatására növekszik, ezzel ellenben a kinyerhető kapacitás csökken. Ezeknek az értékeknek az alakulásának a függvényében a *SoH* becsülhető. Az ellenállástérkép meghatározására bemutatott saját fejlesztésű módszer nagy előnye, hogy a vizsgálathoz szükséges paraméterek egyénileg hangolhatók a felhasználáshoz igazítva. Emellett, a módszer számítás, illetve hardver igénye sem jelentős, de a méréshez kinyert kapacitás (<1%) emellett is rendkívül alacsony.

Továbbá, a dolgozat bemutat egy lehetséges funkciószoftver megvalósítást, amely alkalmazható a *SoH* meghatározására az empirikus úton nyert adatokat felhasználva. Rávilágítást kapunk arra is, hogy az akkumulátorok szimulációjára számos modell típus áll rendelkezésre, azonban a megfelelő modell kiválasztása nagy mértékben függ az akkumulátor paramétereitől, illetve a felhasználástól.

A mérési módszer és a szoftver bemutatásán kívül a lehetséges jövőbeli továbbfejlesztések is ismertetésre kerültek. Kálmán-szűrőt alkalmazva a becsült *SoH* értékek pontosabbá tehetők. A jövőben érdemes a méréseket ismételt elvégezni a megszerzett tapasztalatok tükrében több eltérő kapacitású, márkájú akkumulátorra. A szoftver, illetve a kapott eredmények helytállóságának a teszteléséhez egy mikrokontroller megtervezése célszerű, amely lehetővé teszi a bővített funkciószoftver futtatását is.

## Irodalomjegyzék

- [1] **Martin M., Adel G.:** *A Closer Look at State of Charge (SOC) and State of Health (SOH) Estimation Techniques for Batteries*, 2017.
- [2] **Dasong W., Feng Y., Lin G., Yuliang L.:** *Fuzzy Prediction of Power Lithium Ion Battery State of Function Based on the Fuzzy c-Means Clustering Algorithm*, Chengdu, 2019.
- [3] **MIT Electric Vehicle Team:** *A Guide to Understanding Battery Specifications*, 2008.
- [4] **Dr. Balogh András:** *Autóipari beágyazott rendszerek*, Dunaiújvárosi Főiskola, 2013
- [5] **Matthew M., David M.J.C., Steven F.:** *Review of battery powered embedded systems design for mission-critical low-power applications*, University of Leeds, 2017
- [6] *Characteristic Curves of a Lead-acid Cell:* [http://engineeringslab.com/tutorial\\_electrical/characteristic-curves-of-a-lead-acid-cell-1603.htm](http://engineeringslab.com/tutorial_electrical/characteristic-curves-of-a-lead-acid-cell-1603.htm) , Megtekintés dátuma: 2019.10.16
- [7] **Horváth P., Dr. Sors L.:** *Kémiai áramforrások és alkalmazásaik*, Budapest, 1978
- [8] **D. Andre, M. Meiler, k. Steiner, Ch. Wimmer, T. Soczka-Guth, D. U. Sauer:** *Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. I. Experimental investigation*, *Journal of Power Sources*, 2011
- [9] **Christopher Suozzo:** *Lead-acid battery aging and state of health diagnosis*, Ohio, 2008
- [10] **AGM akkumulátor:** <https://www.autobatteries.com/en-us/battery-technology-types/absorbent-glass-mat-agm-battery> , Megtekintés dátuma: 2019.10.19.
- [11] **Stroe D. I., Swierczynski M. J., Stan A-I, Knap V., Teodorescu R., Andreasen S. J.:** *Diagnosis of Lithium-Ion Batteries State-of-Health based on Electrochemical Impedance Spectroscopy Technique*, Aalborg, 2014
- [12] **Wladislaw W., Stefan K., Dirk U. S.:** *Experimental investigation of the lithium-ion battery impedance characteristic at various conditions and aging states and its influence on the application*, Aachen, 2013
- [13] **Daniel-I S., Maciej S., Ana-I S. Soren K. K.:** *Generalized Characterization Methodology for Performance Modelling of Lithium-Ion Batteries*, Aalborg University, 2016
- [14] **M.R. Jongerden, B. R. Haverkort:** *Battery Modeling*, University of Twente, 2008
- [15] **Laifa T., Jain M, Yujie C., Azadeh N., Jin C., Chen L.:** *A review of stochastic battery models and health management*, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017
- [16] **Gaizka S., José I. S.M., Inmaculada Z., Francisco J. A., Oier O.:** *Analysis of the Current Electric Battery Models for Electric Vehicle Simulation*, *Energies*, 2019
- [17] **Kálmán-Szűrő:** <https://hu.wikipedia.org/wiki/K%C3%A1lm%C3%A1n-sz%C5%B1r%C5%91> , Megtekintés dátuma: 2019.10.20.
- [18] **Tony Lacey, Neil Thacker:** *The Kalman Filter*, 1998