

МЕТОДИ И СРЕДСТВА ЗА ОЦЕНКА НА СТЕПЕНТА НА ЗАРЕЖДАНЕ НА АКУМУЛАТОРНИ БАТЕРИИ ЗА ЕЛЕКТРОМОБИЛИ**Страхил Събев , Николай Маджаров , Доброслав Данков***Технически университет - Габрово
Катедра Електроника***METHODS AND MEANS FOR EVALUATING THE STATE OF CHARGE IN BATTERIES FOR ELECTRIC VEHICLES****Strahil Sabev, Nikolai Madjarov , Dobroslav Dankov***Technical University - Gabrovo
Department of Electronics***Abstract**

State of Charge (SOC) is a critical parameter in the operation and management of electric vehicle (EV) batteries. Accurate SOC estimation is essential for maximizing battery performance, prolonging its lifespan, and ensuring safe operation. This article explores various SOC estimation methods used in car batteries, highlighting their differences and advantages. Through a comparative analysis of these methods, we aim to provide insights into the challenges and advancements in SOC estimation for electric vehicles.

Keywords: (SOC)-State of charge of a battery, Ah-Amper hour, OCV- Open Circuit Voltage

ВЪВЕДЕНИЕ

В електрическите превозни средства степента на зареждане (SOC) се отнася до процента от капацитета на батерията, който в момента е наличен за използване. Оценката на SOC е от решаващо значение за електромобилите, тъй като помага на шофьорите да планират пътуванията си, да избягват неочаквано изтощаване на батерията и да оптимизират циклите на зареждане. SOC е важен не само за удобството, но и за безопасността и дълготрайността на батерията. Този доклад разглежда различни методи за оценка на SOC, използвани в автомобилните батерии, като представя сравнителен анализ на техните силни страни и ограничения.

ИЗЛОЖЕНИЕ

SOC не е физическа величина, която може да бъде измерена директно. SOC

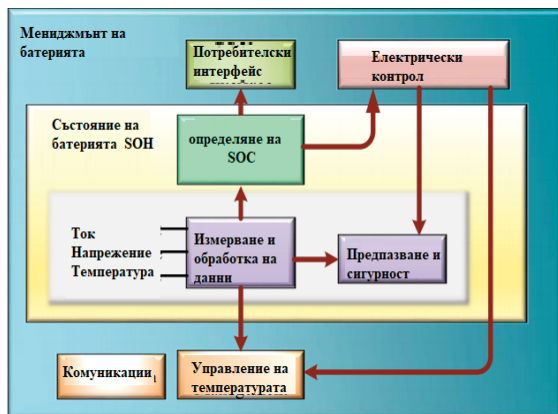
може да се оцени само чрез измерване на силно корелирани прокси величини като напрежение, ток и температура [1] и обикновено се изразява в проценти спрямо номиналния капацитет. В литературата SOC се определя като съотношение на наличното количество на заряда $Q_{available}$ към максималния заряд на батерията Q_{rated} [2]. Уравнение (1) показва математическото определение на SOC.

$$SOC = \frac{Q_{available}}{Q_{rated}} \quad (1)$$

Въпреки ясното определение на SOC, изразено в (1), точната оценка на SOC не е тривиална. Причината за това е, че Q_{rated} , който не отразява истинския капацитет на батерията, както предлагат производителите на батерии [3]. За да се улесни още повече ситуацията, Q_{rated} не е постоянен през целия живот на батерия-

та, тъй като се променя в зависимост от различни фактори, като например възрастта на батерията, температурата на околната среда и сложните химични реакции на батерията [4]. Освен това съществуват ограничени сензори, като например амперометрични и кондуктометрични сензори, които могат директно да измерват електрохимичните явления в батерията. Освен това механични фактори, като производствени дефекти и физически повреди в монтажната линия също са известни [4]. Поради тези различни неизчислими фактори, високоточната оценка на SOC остава предизвикателен проблем за решаване.

Пример за илюстриране на ползите от точна оценка на SOC може да се види във всяка система за управление на батерии (BMS). BMS е електронна система, която управлява акумулаторна батерия, като следи състоянието и параметрите и [5]. Примерът за BMS на батерия включва напрежение на клетките, ток, температура, SOC, състояние на батерията, състояние на здравето (SOH), състояние на западането (SOP) и т.н.



Фиг. 1. Блок-схема на системата за управление на батерията (BMS).

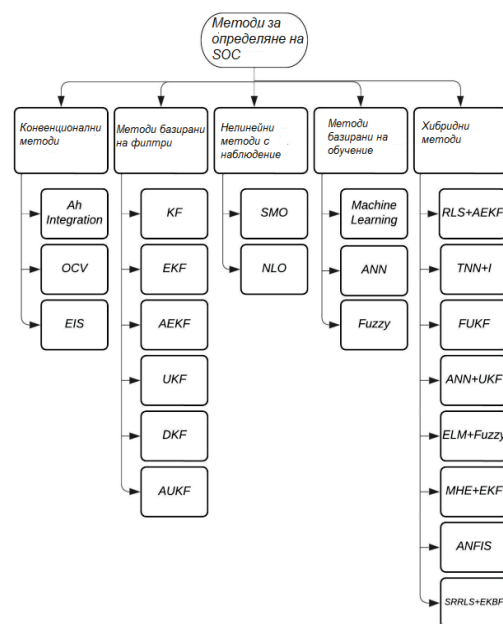
Мониторингът на тези състояния позволява на BMS да взема решения, като например кога да се зареди батерията и кога да се задейства прекъсване на използването на батерията, за да се избегнат опасни условия на работа [5].



Фиг. 2. Определяне на SOC в BMS.

По този начин BMS гарантира, че батерията и крайният потребител е добре защитен от всякакви вреди. Фиг. 1 показва блокова схема на типична BMS. Фиг. 2 илюстрира ролята на SOC в BMS.

Разработени са различни методи за оценка на SOC в автомобилните батерии. Тези методи могат да бъдат широко категоризирани в техники за директно измерване, базирани на напрежение, базирани на ток и техники, базирани на модел. Всеки метод има свой набор от предимства и ограничения, което го прави подходящ за конкретни приложения. На фиг.3 е представена класификацията на методи и средства за определяне на SOC, съгласно известните литературни източници [6]. Целта на настоящия доклад е да се обобщят постигнатите резултати по отношение на методите и средствата за определяне на състоянието на заряда на батерията в съвременните електромобили и да се предложи най-подходящия за приложение.



Фиг. 3. Класификация на методите за определяне на SOC.

Конвенционалните методи включват методи за директно измерване с методите, които се базират на измерване на напрежение и/или ток.

1. Методи за директно измерване.

Директните методи за измерване включват физическо измерване на количеството заряд, който влиза или излиза от батерията. Кулоновото броене Coulomb count (CC) е често срещана техника за директно измерване, при която SOC се изчислява чрез интегриране на тока във времето. Съотношението на наличния капацитет към общият капацитет на батерията е показан в уравнението (2).

$$SOC = 1 - \frac{\int idt}{C_m} \quad (2)$$

където i показва тока на батерията, а C_m показва общия капацитет. Общият капацитет на батерията намалява постепенно поради нейната вътрешна и външна реакция на натоварване, което води до нелинейни и нестационарни деградационни характеристики. Електрохимичната импедансна спектроскопия (EIS) е метод за оценка на SoC, при който към батерията се подават малки токови сигнали с различни честоти. Този стратегия е подходяща за офлайн анализ, тъй като оценката отнема известно време [6].

Табл.1. Сравнение на методите за директно измерване

Метод	Предимства	Недостатъци
Coulomb counting	Точни измервания с правилно калибриране	Нагрупва грешки във времето
Ah counting/integration	Прост и лесен за вграждане	Чувствителен на варирането на температурата и стареенето на батерията
Gravimetric	Голяма прецизност особено в лабораторна среда	Тестването уврежда батерията

2. Методи, базирани на напрежение.

Базираната на напрежение SOC оценка разчита на измерването на напрежението на клемите на батерията. SOC се оценява въз основа на връзката между напрежението и SOC, която може да варира в зависимост от химическия състав на батерията и работните условия. Методът на напрежението при отворена верига (OCV) [4] се използва широко за извършване на първоначална оценка на SoC за статична или незаредена батерия. Въпреки това тези условия не винаги са наблюдават по време на използването му, тъй като не позволяват използването на техниката в реално време. Поради това този метод обикновено се прилага заедно с метода Ah за определяне на първоначалното прогнозиране на SoC [9].

Табл.2. Сравнение на методите базирани на напрежение

Метод	Предимства	Недостатъци
OCV-based	Лесен за вграждане и щадящо за батерията	Точността пада с стареенето
Kalman filtering(KF)	Подходящо за динамични условия	Комплексен алгоритъм и чувствителен към параметрите на модела
Open-circuit tests	Минимални изисквания към конструкцията	Нуждае се от периодична калибрация

3. Методи, базирани на ток.

Методите, базирани на ток, оценяват SOC чрез интегриране на тока, протичащ във и от батерията във времето съгласно (2). Тези методи често се комбинират с други техники за подобряване на точността.

Табл.3. Сравнение на методите, базирани на ток

Метод	Предимства	Недостатъци
Coulomb counting	Може да бъде много точен с правилно калибриране	Натрупва грешки в времето
Ah counting	Прост и евтин за имплементиране	Чувствителен на варирането на температурата и стареенето на батерията
Ah throughput	Ефективен и точен в дългосрочен план	Податлив на грешки поради загуба на капацитет или стареене на батерията

4. Методи, базирани на модел.

Базираните на модел SOC оценки използват математически модели, които представят поведението на батерията. Тези модели вземат предвид фактори като напрежение, ток, температура и стареене, за да оценят SOC. Филтърът на Калман (KF) е техника, която може да предсказва поведението на сложни системи, като например SoC на батерия. Въпреки че е успешна и широко използвана, тя се характеризира с високи изчислителни разходи и трудности при представянето на нелинейни системи [6]. Прилагането на тази техника, когато се прилага за оценка на SoC, може да се раздели на две основни части две части. В първата се извършва прогнозиране на изходната променлива на текущото състояние; в втората, прогнозата се актуализира, за да се минимизира грешката [7]. Методът представя добри точност и не е чувствителен към първоначалната SoC и свързания с нея шум. Той изисква няколко като входни параметри, като например напрежение, ток, капацитет, ефективност на Кулон, саморазряд скорост на разреждане, начална стойност на SoC и модел на батерията.

Техниката се основава на частични производни и разширение на редицата на Тейлър за линеаризиране на нелинейното поведение на акумулаторната батерия, което ѝ позволява да работи в нелинейни системи.

Въпреки че не представя най-добрите стойности за оценка, методът е адаптивен към различните моделите на батериите, използвани за симулации. Този метод обаче има недостатъци, тъй като работи ефективно само с нелинейни модели от първи и втори ред. В [7] се работи с адаптивния разширен филтър на Калман (АЕКФ). Работата на адаптивния разширен филтър на Калман (АЕКФ) зависи значително от определянето на параметрите на модела на литиево-йонната батерия и от информацията за шума. Използва се още и неадресиран филтър на Калман (UKF), а Zheng et al. [7] използват двоен филтър на Калман и UKF с разширен филтър на Калман. Biswas et al. [7] предлагат разширения неакцентиран филтър на Калман (AUKF), който се оказва по-точен от UKF. Моделът също така осигурява автоматично регулиране на параметрите в зависимост от тестовите на цикъла на шофиране. Наблюдение с плъзгащ се режим –sliding mode (SMO) е техника, която гарантира стабилност и устойчивост на измерванията, дори при наличие на неопределеност и шум. Полученият модел представлява уравнение на състоянието, така че изходът на системата се разлага на уравнения на наблюдателя, следващи етапа. SMO се основава на изчерпателно изследване на поведението на батерията, така че е възможно да се изберат подходящи параметри на SMO, като например усилвания на превключване и граници на неопределеност [8]. Методът на нелинейния наблюдател (NLO) може да извършва оценка на SoC от набор от нелинейни уравнения за наблюдение, като използва модели, базирани на RC еквивалентна схема от първи ред. При NLO не е необходимо извършването на матрично изчисление с високи изчислителни разходи, което представя

устойчивост срещу грешки и неопределености при измерване [8]. В сравнение със SMO този метод може да подобри точността и времето за сходимост. Въпреки това получаването на подходяща матрица за намаляване на грешката е трудно. Изкуствените невронни мрежи (ANN) се характеризират с адаптивност и самообучение. ANN могат да се използват в много системи с разумно приближение, включително сложни нелинейни случаи. Все пак е необходима база данни, която описва динамиката на системата. Що се отнася до задачите за оценка на SoC при използване на ANN, най-обичайните входни данни са напрежение, ток, и температура [8]. Недостатъкът на ANN за оценка на SoC е необходимостта от значителни изчислителни усилия и количеството памет, необходимо за нейното прилагане и настройка. Той изисква голям набор от данни с всички параметрични вариации, които могат да възникнат по време на циклите на зареждане и разреждане и различните температури, при които могат да работят батериите [8-10].

Табл.4. Сравнение на методите, базирани на модел

Метод	Предимства	Недостатъци
Equivalent circuit models	Подходящ за бързи измервания на момента	Сложен за разработка
Extended Kalman filter(EKF)	Добра точност в динамични условия	Чувствителен към параметрите на модела
Neural networks	Много адаптивен към самообучение	Нужда се от голяма база данни за обучение

Размитата логика - Fuzzy logic е една от най-важните области на компютърния интелект, използвана за моделиране на сложни и нелинейни системи [8]. Проектирането на размита система се състои от модул за размиване, който отговаря за преобразуването на действителните

входове в размити множества, и група от размити правила, които корелират входовете и изходите. Механизъм наречен дефузификация, съответства на обратния процес на размиване, при който размитите изходи се преобразуват в действителни изходни променливи. Размитата логика емулира човешката способността за рационално вземане на решения дори в двусмислени и несигурни ситуации [8,9]. Прилагането ѝ обаче изисква голям брой математически операции и налична памет, както и изчислителен блок.

5. Сравнение на различните методи

За да разберем по-добре разликите между тези методи за оценка на SOC, нека разгледаме основните им характеристики и ги сравним в таблица.

Табл.5. Сравнение на различните методи

Метод	Методи за директно измерване	Методи, базирани на напрежение	Методи, базирани на ток	Методи, базирани на модел
Точност	Висока	Средна	Средна	Висока
Сложност	Ниска	Ниска до Средна	Ниска до Средна	Висока
Чувствителност към стареене	Да	Да	Да	Да
Измерване на момента	Да	Да	Да	Да
Нужда от калибрация	Да	Да	Да	Да

Докато тези методи предоставят различни начини за оценка на SOC в автомобилните батерии, има няколко предизвикателства, които изследователите и инженерите продължават да решават:

- Ефекти от стареене: Всички методи са чувствителни към стареенето на батерията. Точното определяне на SOC през живота на батерията остава предизвикателство.

- Температурна чувствителност: Температурните вариации влияят върху точността на оценката на SOC. Алгоритмите трябва да отчитат тези колебания.

- Калибриране: Много методи изискват периодично калибриране за поддържане на точността, което може да бъде неудобно за потребителите.

- Динамични условия: Оценката на SOC в реално време при динамични условия на шофиране е предизвикателство и изисква тестови алгоритми.

Напредъкът в оценката на SOC се прави чрез разработването на по-точни модели за батерии, подобрени сензорни технологии и техники за машинно обучение. Neural networks, показва възможност за обучение и адаптиране към поведението на батерията, намалявайки необходимостта от обширно калибриране.

За да се постигне това развитие, е необходим процес, който изпълнява следните характеристики: автоматично калибриране чрез практически експерименти (самонастройване във времето); метод за онлайн оценка, точност и надеждност; мащабируемост за огромни батерии или с различни конфигурации; процес на просто, практическо изпълнение; модел, който изисква по-малко изчислителни усилия; работи при различни температурни условия; работи добре с нелинейностите на батерията; отчита загубата на капацитет, който батерията има за съхранение на енергия (SoH) през цикъла; малък обем на хардуера, който не заема твърде много физическо пространство.

Анализирайки данните в таблица 1, може да се забележи, че въпреки добрите стойности на нелинейните методи, базирани на наблюдение, не са в състояние да работят в реално време, което е точно това, което индустрията изисква. Същото се отнася и за конвенционалните методи, когато те изискват информация за физическите състояния на батерията, което не е осъществимо за непрекъснато използване. Макар че те представят по-високи стойности на достоверност в сравнение с двете споменати по-горе методи, методи-

те, базирани на филтриране и обучение, позволяват оценяване в реално време на SoC, което благоприятства прилагането им в промишлен контекст. Идеалният метод трябва да може да оценява SoC при различни скорости на зареждане, при температурни колебания, които се случват през деня и през годината. Изключително важно е да се отбележи, че сезонът и метеорологичните явления променят характеристиките на батериите. Следователно използваният модел трябва да може да определи колко заряд остава в електромобила при всички тези условия. Изборът на най-подходящата техника зависи от няколко фактора, в т.ч. вида на акумулатора, наличието на данни, изчислителните ресурси и желаното ниво на точност. Изборът на оптимална техника включва отчитане на специфичните изисквания на приложението; отчитане на наличните ресурси; и постигане на баланс между точността, сложността и цената.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценката на състоянието на заряд (SOC) е основен аспект на управлението на батерията на електрическите превозни средства. Различни методи, като директно измерване, техники, базирани на напрежение, ток и модели, предлагат различни предимства и ограничения. Изборът на метод за оценка на SOC зависи от фактори като изисквания за точност, сложност и чувствителност към стареене.

Тъй като технологията на батериите продължава да се развива, така ще се развиват и методите за оценка на SOC. Изследователи и инженери работят неуморно, за да преодолеят предизвикателствата и да осигурят по-точни, стабилни и удобни за потребителя решения за оценка на SOC в автомобилни батерии. Тези подобрения са от съществено значение за подобряване на производителността, безопасността и дълготрайността на батериите за електрически превозни средства, като в крайна сметка допринасят за широкото внедряване на електрическия транспорт.

ACKNOWLEDGMENT

Авторите биха искали да благодарят на всички рецензенти за техните съвети и предложения за подобряване на този доклад. Настоящият доклад е изготвен във връзка с изпълнението на договор №2303У/16.03.2023 г., към УЦНИТ на Технически университет – Габрово.

REFERENCE

- [1] Y. Liu, S. Li, and J. Han, "State of charge estimation of electric vehicle batteries using extended Kalman filtering," in 2012 American Control Conference, 2012.
- [2] J. Zhang, W. Lin, and D. Cao, "Online state-of-charge estimation for lithium-ion batteries using neural networks," in 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2016.
- [3] R. E. White, "Coulomb counting," in Battery Management Systems, 2010.
- [4] M. L. Crow, "Battery state of charge measurement using the open-circuit voltage method: a survey," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2003.
- [5] D. N. T. How, M. A. Hannan, M. S. Hossain Lipu and P. J. Ker, "State of Charge Estimation for Lithium-Ion Batteries Using Model-Based and Data-Driven Methods: A Review," in IEEE Access, vol. 7, pp. 136116-136136, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2942213.
- [6] Marques, T.M.B.; dos Santos, J.L.F.; Castanho, D.S.; Ferreira, M.B.; Stevan, S.L., Jr.; Illa Font, C.H.; Antonini Alves, T.; Piekarski, C.M.; Siqueira, H.V.; Corrêa, F.C. An Overview of Methods and Technologies for Estimating Battery State of Charge in Electric Vehicles. *Energies* 2023, 16, 5050. <https://doi.org/10.3390/en16135050>.
- [7] Prashant Shrivastava, Tey Kok Soon, Mohd Yamani Idna Bin Idris, Saad Mekhilef, Overview of model-based online state-of-charge estimation using Kalman filter family for lithium-ion batteries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 113, 2019, 109233, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.040>.
- [8] D. N. T. How, M. A. Hannan, M. S. Hossain Lipu and P. J. Ker, "State of Charge Estimation for Lithium-Ion Batteries Using Model-Based and Data-Driven Methods: A Review," in IEEE Access, vol. 7, pp. 136116-136136, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2942213.
- [9] Yongsong Yang, Lijun Zhao, Quanqing Yu, Shizhuo Liu, Guanghui Zhou, Weixiang Shen, State of charge estimation for lithium-ion batteries based on cross-domain transfer learning with feedback mechanism, *Journal of Energy Storage*, Volume 70, 2023, 108037, ISSN 2352-152X, <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108037>.
- [10] P. J. Kollmeyer, M. Naguib, F. Khanum and A. Emadi, "A Blind Modeling Tool for Standardized Evaluation of Battery State of Charge Estimation Algorithms," 2022 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC), Anaheim, CA, USA, 2022, pp. 243-248, doi: 10.1109/ITEC53557.2022.9813996.