International Scientific Conference 20 UNITECH 26

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
19-21 November 2026
GABROVO

МОДЕЛИРАНЕ НА АКУМУЛАТОРНИ БАТЕРИИ

Христо Килифарев[1], Иван Симеонов[1], Райчо Иларионов[1], Егнар Йоздикилилер[2]

[1]Технически университет - Габрово, Х. Димитър 4, Габрово, България
[2]Истанбулски технически университет, Кампус Аязага, Маслак, Истанбул, Турция
[1,2]Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“
**кореспондиращ автор: hri.100@gmail.com*

MODELING OF RECHARGEABLE BATTERIES

Hristo Kilifarev[1], Ivan Siomeonov[1], Raycho Ilarionov[1], Egnar Özdikililer[2]

[1]Technical University of Gabrovo, 4 Hadji Dimitar str., Gabrovo, Bulgaria
[2]Istanbul Technical University, Ayazağa Kampüsü, Maslak, Istanbul, Turkey
[1,2]Center of competence "Smart mechatronic, eco- and energy-saving systems and technologies"
**Corresponding author: hri.100@gmail.com*

Abstract

This paper provides a comprehensive overview of currently developed electrical and simulation models for rechargeable battery cells and packs, focusing on their computational efficiency and accuracy. It analyzes equivalent circuit models (ECM) from first to third-order, including the integration of parasitic inductance and electro-thermal coupling determined by the Arrhenius and Bernardi equations. Furthermore, the study examines the challenges of scaling individual cells into multi-dimensional (M x N) battery pack matrices, accounting for cell-to-cell variations and thermal gradients. A comparative evaluation of leading engineering and open-source software tools – such as MATLAB/Simulink, Python (PyBaMM), Modelica, Scilab, and Ansys/COMSOL – is presented based on their licensing, complexity, and specific application domains. The custom simulation frameworks discussed herein serve as a methodological foundation for embedded BMS development, advanced scientific research, and engineering education.

Keywords: Rechargeable batteries; Battery simulation models; Programming tools and libraries; Electric vehicles (EV); Energy storage; Clean energy.

ВЪВЕДЕНИЕ

В контекста на глобалния преход към устойчива енергия и декарбонизация на транспорта, развитието на технологиите за чиста енергия (Clean energy) е неразривно свързано с масовото навлизане на електромобилите (EV) и стационарните системи за съхранение на енергия (Energy storage) [1]. В сърцето на тези технологии стоят съвременните акумулаторни батерии – предимно литиево-йонни (Li-ion) и техните модификации. Те представляват сложни електрохимични системи, изискващи прецизен контрол за постигане на оптимално и безопасно използване [2].

Проектирането на системи за управление на батериите (Battery Management Systems – BMS), оптимизирането на топлинните режими и прогнозирането на жизнения цикъл са критични задачи - екс-

Print ISSN: 1313-230X, Online ISSN: 3033-1404

перименталните изследвания са скъпи, времеемки и са свързани с рискове от аварии (термично излизане от контрол) [3], поради което могат да бъдат решени ефективно чрез симулации. Поради тази причина, компютърното и симулационното моделиране се утвърждават като водещ и незаменим подход в научно-изследователската и развойна дейност.

От гледна точка на компютърните системи и технологии, моделирането на акумулаторни клетки изисква баланс между изчислителна сложност и точност. Инженерите и изследователите са изправени пред предизвикателството да избират между различни математически подходи (еквивалентни електрически схеми, електрохимични или термични модели) и да ги реализират в подходящи софтуерни среди. Изборът на инструментариум – от комерсиални платформи до среди с отворен код – определя бързодействието и подходите за реализиране на симулациите и възможността за тяхното интегриране в реални вградени системи (embedded systems).

Настоящата публикация има за цел да направи систематизиран обзор на съвременните симулационни модели на акумулаторни батерии и да анализира възможностите на водещите софтуерни продукти и програмни среди за тяхното софтуерно реализиране. Разгледаните модели и инструменти могат да служат като методологична основа както за научно-изследователска дейност, така и за целите на инженерното образование.

ИЗЛОЖЕНИЕ

1. Класификация и теоретичен преглед на симулационните модели

1.1. Модели на еквивалентни електрически схеми (ECM)

Моделите на еквивалентни електрически схеми (ECM) са най-широко използваните инструменти в компютърните системи за управление на батерии (BMS). Ниската им изчислителна сложност ги прави идеални за симулации в реално време и вградени системи, осигурявайки отличен баланс между точност и бързодействие. Те описват поведението на батерията на макроскопично ниво чрез комбинация от идеални електрически компоненти:

- **Напрежение на празен ход (Voc или OCV (Open-Circuit Voltage)):** Представя се с идеален източник, който се изменя нелинейно в зависимост от състоянието на заряд (State of Charge – SOC). При разряд на клетката OCV намалява.
- **Омично вътрешно съпротивление (R_0):** Моделира моменталния пад на напрежението при прилагане на ток, причинен от съпротивлението на електролита, токоприемниците и активните материали.
- **RC вериги (R_1, C_1):** Моделират преходните процеси (поляризация, дифузия на йони и трансфер на заряд) при протичане на товарен/заряден ток I(t). В зависимост от търсената точност се използват модели от първи ред (Thevenin), втори ред (Dual Polarization) или по-сложни.

Динамичното поведение на напрежението на клемите на клетката (Vt) при модел от първи ред може да се опише със следната класическа система от диференциално-алгебрични уравнения (1) и (2) [4]:

$$V_t(t) = V_{oc}(SOC) - R_0.I(t) - V_1(t) \quad (1)$$

$$\frac{dV_1(t)}{dt} = -\frac{1}{R_1.C_1}V_1(t) + \frac{1}{C_1}I(t) \quad (2)$$

където Voc е напрежението на празен ход (в нелинейна функция от SOC), I(t) е товарният ток, R_0 е омичното вътрешно съпротивление, R_1 и C_1 описват динамиката на RC веригата, а V_1 е напрежението върху нея.

В зависимост от изискванията на симулацията, ECM моделите могат да бъдат усложнени в няколко направления:

- **Модели от по-висок ред (2-ри и 3-ти ред):** Добавят се допълнителни RC вериги (паралелни двойки Rn-Cn), за да се разграничат бързите електрохимични процеси от по-бавните дифузионни явления в електролита. Моделите от 3-ти ред осигуряват екстремно висока точност в

преходните режими, но увеличават броя на променливите на състоянието в компютърния модел.

- **Включване на паразитна индуктивност (L):** При симулиране на бързи комутационни процеси (например в силовата електроника на електромобилите или при импулсно зареждане), последователно във веригата се добавя индуктивен елемент. Той отразява индуктивността на изводите и вътрешната геометрия на клетката, което е критично за високочестотни симулации.
- **Електро-термични ECM:** Тъй като параметрите на електрическата схема (Voc, R_0, R_1, C_1) не са константи, те се моделират като многомерни справочни таблици (Lookup tables) или математически функции, зависещи динамично от два основни фактора: текущото състояние на заряд (SOC) и локалната температура на клетката (T).

1.2. Електро-термична обвързаност и процеси на стареене

Компютърното симулиране на съвременни батерии изисква двупосочна връзка между електрическия и топлинния модел на клетката (т.нар. електро-термичен модел). Тази зависимост се проявява в две противоположни направления:

- **Влияние на температурата върху електрическите параметри:** Скоростта на електрохимичните реакции вътре в клетката зависи критично от температурните условия. Влиянието на температурата (T) върху вътрешното съпротивление (R_0, R_1) и дифузионните процеси обикновено се описва чрез закона на Арениус (Arrhenius equation) (3) [6]:

$$R(T) = R_{ref}.\exp\left(\frac{E_a}{R_g}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) \qquad (3)$$

където Ea е активиращата енергия на процеса, Rg е универсалната газова константа, а Rref е съпротивлението при референтна температура Tref. При ниски температури вътрешното съпротивление нараства експоненциално, което драстично намалява енергийната ефективност при заряд и разряд.

- **Генериране на топлина и самозагряване:** По време на работа батерията отделя топлина, която променя нейната вътрешна температура в следствие на два основни механизма: **омични загуби** (закон на Джаул-Ленц) и **енталпийни (ентропийни) промени от химичните реакции**. Общото отделено количество топлина (Qgen) в клетката се моделира чрез класическото уравнение на Бернарди (Bernardi equation) (4) [6]:

$$Q_{gen} = I(t).(V_{oc} - V_t) - I(t).T.\frac{dV_{oc}}{dT} \qquad (4)$$

където генерирането на топлина е разделено на два компонента:

1. Омични загуби (необратима топлина): Описани чрез члена $I(t).(V_{oc} - V_t)$ (което е еквивалентно на $I^2(t).R_{int}$). Това са омичните загуби от преминаването на тока през вътрешните елементи (R_0 и RC веригите). Стойността винаги е положителна, т.е. батерията се загрява при протичане на ток, както при заряд, така и при разряд.

2. Reaction / Ентропиен ефект (обратима топлина): Описан чрез члена $I(t).T.\frac{dV_{oc}}{dT}$, където $\frac{dV_{oc}}{dT}$ е температурният коефициент на напрежението (ентропиен коефициент). Тази топлина зависи от посоката на тока (знака на I) и вида на химичната реакция. Тя може да бъде както положителна (допълнително генериране на топлина), така и отрицателна (ендотермичен ефект, водещ до леко охлаждане на клетката в определени фази).

- **Влияние на стареенето (Degradation / Aging):** С течение на времето и циклите на експлоатация (календарно и циклично стареене), вътрешната структура на батерията се деградира, например вследствие на натрупване на слой от твърда електролитна интерфаза (Solid Electrolyte Interphase – SEI) върху анода. От гледна точка на симулационния модел, това води до две основни компютърни промени:

постепенна загуба на номиналния капацитет (Capacity Fade) и прогресивно увеличаване на вътрешното съпротивление (R_0). По-високото съпротивление, от своя страна, води до по-голямо отделяне на топлина при същия работен ток, което ускорява топлинните процеси и може да предизвика термична нестабилност [6].

1.3. Мащабиране до пакет от клетки (Battery Pack Modeling)

При прехода от единична клетка към батериен пакет (Battery Pack), изчислителната сложност на модела нараства експоненциално. Конструктивно пакетът се състои от десетки или стотици отделни клетки (най-често с цилиндрична или призматична форма), подредени в блокове с висока плътност. Компютърното моделиране на тази структура изисква съвместяване на две разпределени мрежи:

- **Електрическа топология:** Клетките се свързват последователно и паралелно в матрица със зададен брой редове и колони (M x N), където M е броят на последователно свързаните групи за постигане на необходимото работно напрежение, а N е броят на клетките в паралел за осигуряване на нужния капацитет и големина на изходния ток. Симулационният модел на пакета трябва да отчита неидентичността (cell-to-cell variation) на производствените параметри (вътрешно съпротивление R_0, капацитет) на всяка отделна клетка. Това е критично за симулиране на софтуерните алгоритми за балансиране във вградените BMS системи.

- **Термична разпределена мрежа:** В пространствената структура на пакета, отделните клетки се моделират като топлинни възли, свързани в 2D или 3D мрежа. Топлообменът между съседните клетки се осъществява чрез кондукция (провеждане на топлина през допирните повърхности и шините), а охлаждането на пакета – чрез конвекция (преминаване на флуид/въздух около клетките). Симулацията трябва динамично да отчита, че клетките, разположени в геометричното ядро (центъра) на пакета, са изолирани и се охлаждат много по-трудно от външните (периферните). Това води до появата на сериозни температурни градиенти в матрицата, което софтуерно се отразява като ускорено локално стареене на централните клетки и преждевременно извеждане на целия пакет от експлоатация.

2. Софтуерни среди и инструменти за моделиране

Изборът на софтуерна среда определя баланса между време за разработка, гъвкавост, изчислителна сложност, бързодействие, разходи и възможни области на приложение (Таблица 1) [7, 8]:

- **MATLAB / Simulink (Simscape Battery):** Индустриален стандарт за мащабиране от клетка до пакет чрез готови блок-диаграми. Позволява дефиниране на химията (LFP – литиево-железен фосфат, NMC – никел-манган-кобалт, LMO – литиево-манганов оксид) и корпуса (цилиндрични, призматични, тип „торбичка“ – pouch). Потребителят може да конфигурира подреждането на клетките и да добавя охлаждащи плочи, термични мостове и изолационни слоеве. Средата предлага инструменти за симулация, запис на данни в реално време 3D термична визуализация и автоматично генериране на C/C++ код за BMS, но е скъп комерсиален продукт.

- **Python (PyBaMM):** Модерен инструмент с отворен код (Python Battery Mathematical Modelling) за симулиране на батерии, чрез детайлно математическо параметризиране на вътрешните материали (активна маса, дебелина на електродите, състав на електролита). Поддържа алгоритми за адаптиране при промяна на химията и стареенето. Чрез matplotlib и Jupyter Notebooks осигурява графичен анализ и запис на профилите на напреже-

Таблица 1. Сравнителен анализ на среди за моделиране на батерии

Софтуерна среда	Лиценз	Изчислителна сложност	Подходящ за батерийни пакети	Генериране на код за вградени системи (BMS)	Основна област на приложение
MATLAB / Simulink	Комерсиален	Ниска до средна	**Да** (изключително лесно)	**Да** (автоматично C/C++)	Индустриално проектиране, BMS
Python (PyBaMM)	Отворен код	Средна до висока	Частично	Не директно	Научни изследвания, AI, ML
Modelica	Свободен / Комерсиален	Средна	**Да** (мултифизично)	**Да**	Системна симулация, охлаждане
Scilab / Xcos	Отворен код	Ниска	Частично (ръчно)	Ограничено	Образование, леки симулации
Ansys / COMSOL	Комерсиален	Изключително висока	**Да** (3D термичен/CFD)	Не	Детайлен 3D физически анализ

нието и дифузията. Съществуват ограничения за 3D моделиране на корпуси на пакети, но позволява бързо решаване на сложни диференциални уравнения за електрохимични модели (Single Particle Model – SPM модел с концентриран разтвор) и (Doyle-Fuller-Newman – DFN модел) и е идеален за интеграция с AI и машинно обучение (ML) [8].

- **Modelica:** Обектно-ориентиран език, идеален за мултифизично (комбинирано физическо) системно моделиране. Подходящ за симулация на батерийни пакети, чрез едновременно описание на електрическата верига и комплексни охладителни системи –пасивни (радиаторни ребра, топлинни тръби – heat pipes) и активни (въздушно / течно охлаждане). Потребителят може да дефинира сложни термични връзки между корпуса на пакета и околната среда. Резултатите се анализират чрез мощни софтуерни инструменти за графичен анализ и пост-процесинг.
- **Scilab / Xcos:** Напълно безплатна алтернатива на MATLAB. Чрез блоковата среда Xcos могат да се симулират еквивалентни схеми (ECM) и опростени термични възли (пасивно охлаждане, термични съпротивления). Тя няма готови библиотеки за геометрия на клетки или течно охлаждане, което изисква потребителят сам да дефинира математическите уравнения за формата на корпуса и въздушното охлаждане. Представлява сравнително лек инструмент и се използва основно за образователен анализ на базови процеси.
- **Ansys Fluent / COMSOL:** Тежък и специализиран инженерен софтуер за 3D мултифизични симулации (компютърни симулационни методи: изчислителна динамика на флуидите (Computational Fluid Dynamics – CFD) и метод на крайните елементи (Finite Element Analysis – FEA)). Използва се за детайлен 3D термичен анализ (CFD), когато е критично да се симулира точната динамика на активното въздушно/течно охлаждане около специфични форми на корпуса на пакета. Позволява моделиране на радиаторни ребра, термоинтерфейсни материали (Thermal Interface Materials – TIM), по-известни като термопасти или термоподложки и локални термични мостове. Предоставя фотореалистични 3D температурни карти за визуализация на градиентите, но изисква огромен изчислителен ресурс и не поддържа работа в реално време.

3. Приложение в науката и образованието

Разгледаните симулационни модели и програмни среди намират критично приложение в две основни направления:

- **Научно-изследователска дейност:** Позволяват виртуално тестване на BMS алгоритми (SOC/SOH, термична защита) в безопасна среда, елиминирайки риска от пожар или деструкция на скъпи физически прототипи.
- **Инженерно образование:**

Внедряването на безплатни инструменти като PyBaMM и Scilab в лабораториите позволява на студентите да изследват процеси в батериите, развивайки умения за моделиране без нужда от скъп хардуер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Компютърното моделиране и симулация на акумулаторни батерии е критичен компонент в развойната дейност на технологиите за чиста енергия и електромобилност. В настоящия доклад бе направен систематизиран преглед на математическите модели и водещите софтуерни среди, като бяха анализирани техните възможности за мащабиране от единична клетка до батериен пакет.

На база на направения анализ могат да се формулират следните основни изводи:

- **Компромис между детайлност и ресурси:**

За симулации на ниво пакет и внедряване във вградени системи (BMS контролери) в реално време, еквивалентните електрически схеми (ECM) от 1-ви до 3-ти ред остават единственото изчислително приложимо решение. Интегрирането им в среди като MATLAB или Modelica осигурява бързодействие, докато електрохимичните и 3D CFD модели изискват специализиран хардуер и остават ограничени до предварителния инженерен дизайн на охлаждането.

- **Гъвкавост на инструментариума:**

Търговските среди предлагат най-бърз път за конструиране на пакети със сложни охладителни системи благодарение на богатите си готови библиотеки. В същото време средите с отворен код (Python/PyBaMM) се утвърждават като по-гъвкава и икономически изгодна платформа за изследване на нови материали, химии и интеграция с алгоритми за изкуствен интелект.

Внедряването на тези софтуерни инструменти в научно-изследователската дейност и висшето образование позволява скъсяване на времето за проектиране и осигурява безопасна среда за обучение на бъдещите инженерни кадри.

БЛАГОДАРНОСТИ:

Този доклад е финансиран от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

ЛИТЕРАТУРА

[1] International Energy Agency (IEA), "Global EV Outlook 2024: Moving towards increased deployment," *IEA Report*, 2024. [Online]. Available: iea.org

[2] M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Mohamed, and A. Ayob, "Review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 834-854, 2017.

[3] X. Hu, S. Li, and H. Peng, "A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 198, pp. 359-367, 2012.

[4] H. He, R. Xiong, and J. Fan, "Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach," *Energies*, vol. 4, no. 4, pp. 582-598, 2011.

[5] M. Abdel-Monem et al., "Lithium-ion battery intelligence with focus on simulation, aging and physics-based models," *Energies*, vol. 13, no. 21, p. 5607, 2020.

[6] G. Miro-Padilla et al., "Electro-thermal modeling of lithium-ion batteries: A review," *Journal of Energy Storage*, vol. 43, p. 103230, 2021.

[7] F. Ahmed, "A review of battery pack modeling and simulation for electric vehicles," *Journal of Energy Storage*, vol. 51, p. 104410, 2022.

[8] T. G. Tranter et al., "PyBaMM: A python battery mathematical modelling package," *Journal of Open Source Software*, vol. 6, no. 62, p. 2981, 2021.