

Применение комбинированного фильтра Калмана для оценки степени заряда (SoC) аккумуляторных батарей

Чернов М.Б.¹, Голубков А.В.²

1 - Ульяновский государственный педагогический университет имени И.Н. Ульянова, Факультет физико-математического и технологического образования, Ульяновская область, Россия, E-mail: chernovmb2002@gmail.com; 2 - Ульяновский государственный педагогический университет имени

И.Н. Ульянова, Факультет физико-математического и технологического образования, Ульяновская область, Россия, E-mail: kr8589@gmail.com

Оценка степени заряда (State of Charge, SoC) аккумуляторов является важной задачей в современной науке и технике, учитывая её практическое значение. Степень заряда аккумулятора недоступна для прямых измерений, её оценку можно осуществить с использованием различных типов фильтров Калмана. В данной статье представлен комбинированный фильтр, интегрирующий линейный и расширенный фильтры Калмана.

Среди множества методов моделирования аккумуляторов наиболее распространённым является использование модели Тевенена второго порядка [2]. В соответствии с ней дискретная стохастическая модель в пространстве состояний имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} SOC_k \\ U_{1k} \\ U_{2k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{\Delta t}{R_1 C_1}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\frac{\Delta t}{R_2 C_2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC_{k-1} \\ U_{1k-1} \\ U_{2k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\Delta t}{Q_{cap} \cdot 3600} \\ R_1(1 - e^{-\frac{\Delta t}{R_1 C_1}}) \\ R_2(1 - e^{-\frac{\Delta t}{R_2 C_2}}) \end{bmatrix} I_t + \begin{bmatrix} w_{soc_k} \\ w_{u_{1k}} \\ w_{u_{2k}} \end{bmatrix},$$

$$U_k = U_0 - R_0 I_k - U_1 - U_2 + v_k,$$

где $U_0 = OCV(SOC)$ – функция, описывающая нелинейную зависимость напряжения холостого хода (Open Circuit Voltage, OCV) от степени заряда, I_{t_k} – ток нагрузки. Случайные возмущения в модели аккумулятора представим дискретным шумом $w_k \sim \mathcal{N}(0, Q)$, $v_{t_k} \sim \mathcal{N}(0, R)$ – ошибки измерений в уравнении наблюдений.

В предлагаемом подходе линейный фильтр Калмана применяется в диапазонах степени заряда (SoC), где нелинейность модели незначительна. В участках с преобладанием нелинейной динамики зависимости напряжения от SoC используется расширенный фильтр Калмана. Подробный вывод используемых фильтров для решения задачи оценки SoC представлен в [3].

Для выделения участков, где линейная модель адекватно описывает зависимость между напряжением и SoC, применяется метод линейной регрессии. Оценка качества модели осуществляется с использованием коэффициента детерминации (R^2).

Для сравнения работы фильтров была проведена идентификация SoC на основе экспериментальных данных, полученных в [1]. Ниже представлены графики оценки SoC, а также составлена сравнительная таблица результатов. Шумы в уравнении модели представлены ковариационной матрицей $Q = 0,002I_3$, шум в измерениях $R = 0,2$ В, начальная ковариационная матрица $P = I_3$.

Анализируя графики и полученные данные, можно сделать следующий вывод. Комбинированный фильтр Калмана показывает наилучшие результаты по всем метрикам, что делает его предпочтительным выбором для оценки состояния заряда аккумуляторных батарей в рассматриваемых условиях. Линейный фильтр также демонстрирует хорошую производительность, однако его точность несколько ниже. Расширенный фильтр, несмотря на свою способность учитывать нелинейные эффекты, показывает наименьшую точность и стабильность, что может ограничивать его применение в задачах, требующих высокой точности.

Таблица 1: Результаты сравнения идентификации SoC фильтрами

Фильтр	ME	MAE	RMSE	SDE
Комбинированный	0,122	0,015	0,021	0,020
Линейный	0,122	0,023	0,030	0,030
Расширенный	0,963	0,058	0,164	0,156

Источники и литература

- 1) Чернов М. Б., Голубков А. В. Идентификация параметров модели литий-ионного аккумулятора // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной научной конференции, Воронеж, 04–06 декабря 2023 г. – Воронеж: «Научно-исследовательские публикации», 2024. – С. 758–763.
- 2) Melentjev S., Lebedev D. Overview of Simplified Mathematical Models of Batteries // Doctoral School of Energy and Geotechnology: Parnu, Estoni, 2013. P. 231–235.
- 3) Zhang R., Zhang H. Extended Kalman Filter-Based SOC Estimation for Lithium Battery Packs // E3S Web of Conferences 406, 02040. 2023.

Иллюстрации

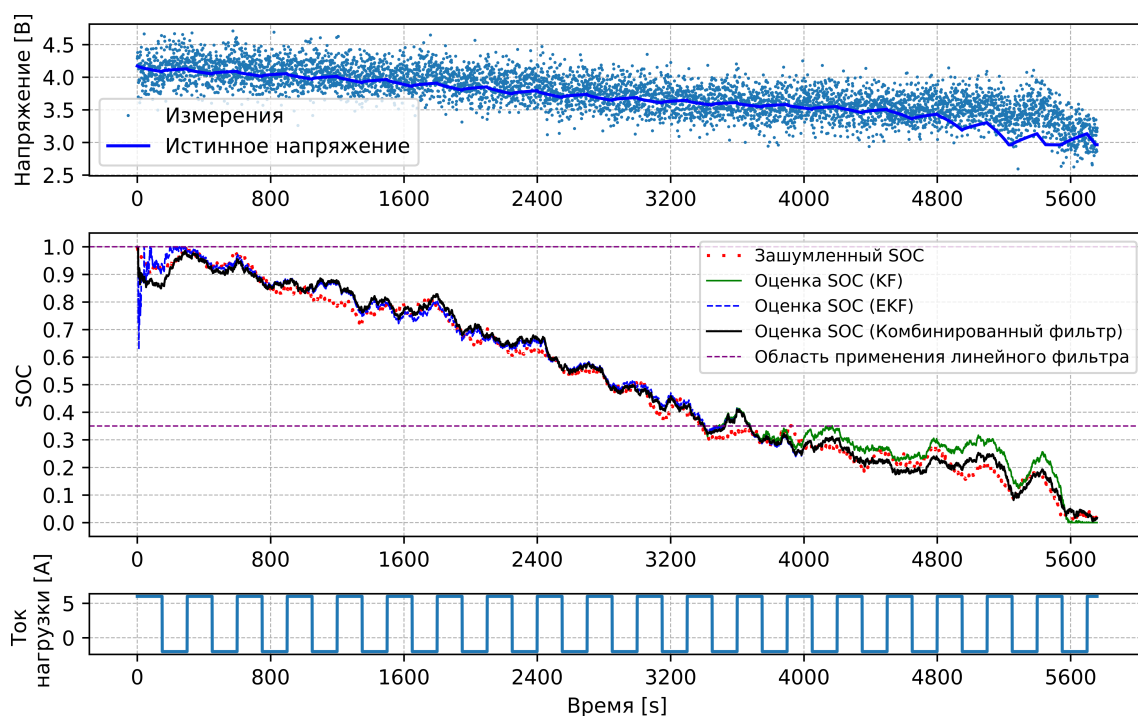


Рис. : Оценка SOC с помощью комбинированного фильтра, KF и EKF