

УДК 004.4

Прилуцька В.О., Манзюк Е.А., Скрипник Т.К.

Хмельницький національний університет

МЕТОД ОЦІНКИ СТАНУ ЗАРЯДУ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ОПТИМІЗОВАНОЇ LSTM НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

Представлено вдосконалений метод оцінки стану заряду накопичувачів енергії на основі LSTM нейронної мережі з використанням баєсівської оптимізації. Основним нововведенням є автоматизація підбору гіперпараметрів мережі, що дозволяє створити універсальну модель для різних типів накопичувачів енергії. Запропонований підхід ефективний для систем накопичення енергії, де потрібна швидка та точна оцінка стану заряду без специфічних налаштувань під конкретний тип накопичувача. Продемонстровано перспективність застосування оптимізованих LSTM мереж для задач оцінки SoC в системах управління енергією.

An improved method for assessing the state of charge of energy storage devices based on an LSTM neural network using Bayesian optimization is presented. The main innovation is the automation of the selection of network hyperparameters, which allows creating a universal model for different types of energy storage devices. The proposed approach is effective for energy storage systems that require fast and accurate assessment of the state of charge without specific settings for a particular type of storage device. Prospects for the use of optimized LSTM networks for SoC assessment tasks in energy management systems.

Автономні системи живлення, такі як сонячні панелі, вітрові турбіни та інші джерела альтернативної енергії, стають все більш поширеними як у побутовому, так і в промисловому використанні. Зростання попиту на ці системи обумовлене глобальними тенденціями переходу до використання відновлюваних джерел енергії, що сприяє зниженню викидів вуглецю та зменшенню залежності від викопного палива [1]. Однак, ефективність таких систем залежить від багатьох факторів, включаючи кліматичні умови, технічний стан обладнання, а також ефективність управління розподілом енергії між споживачами [2].

Одним із ключових завдань є своєчасне визначення та підтримка ефективного стану систем живлення, що безпосередньо впливає на їхню продуктивність та довговічність [3, 4]. У роботі представлено вдосконалений метод оцінки стану заряду (State of Charge, SoC) накопичувачів енергії на основі оптимізованої рекурентної нейронної мережі типу LSTM (Long Short-Term Memory). Запропоноване вдосконалення полягає у впровадженні баєсівської оптимізації для автоматичного налаштування гіперпараметрів мережі.

Точна оцінка стану заряду накопичувачів енергії є критично важливою задачею для ефективного управління енергетичними системами. Існуючі методи

часто вимагають складних обчислень або специфічні для конкретного типу накопичувача. Використання методів машинного навчання, зокрема рекурентних нейронних мереж, показало перспективні результати, проте залишається проблема оптимального налаштування таких моделей.

У даній роботі пропонується вдосконалення методу оцінки SoC шляхом впровадження баєсівської оптимізації для автоматичного підбору гіперпараметрів LSTM мережі. Такий підхід дозволяє створити універсальну модель, що може бути ефективно застосована до різних типів накопичувачів енергії.

Сучасні дослідження в області оцінки SoC можна розділити на декілька основних категорій. До першої категорії відносяться методи на основі фізичних моделей, які базуються на математичному описі процесів у накопичувачах енергії. Друга категорія включає методи на основі фільтрації та їх модифікації. Третя категорія представлена методами машинного навчання, які набувають все більшої популярності.

Останні дослідження показують перспективність використання глибоких нейронних мереж, особливо архітектури LSTM, для оцінки SoC. Проте існуючі підходи часто вимагають ручного налаштування параметрів моделі, що ускладнює їх практичне застосування.

Запропонована модель використовує архітектуру LSTM з трьома основними вхідними параметрами: струм, напруга та попереднє значення SoC. Структура мережі складається з послідовності шарів, що включає вхідний шар для обробки часових рядів даних, LSTM шар для виявлення довгострокових залежностей, dropout шар для запобігання перенавчання та вихідний шар для отримання прогнозованого значення SoC.

Для оптимізації гіперпараметрів використовується баєсівський підхід, який передбачає побудову сурогатної моделі та ітеративний процес пошуку оптимальних параметрів. В рамках оптимізації розглядаються такі параметри як кількість нейронів, значення dropout, розмір блоку, кількість епох.

Метод оцінки стану заряду накопичувачів енергії з використанням оптимізованої LSTM нейронної мережі є інноваційним підходом до вирішення важливої задачі точного визначення SoC в системах зберігання енергії (рисунок 1). Даний метод поєднує переваги глибокого навчання з сучасними методами оптимізації для досягнення максимальної ефективності прогнозування.

Перший етап методу полягає в отриманні та підготовці вхідних даних. На цьому етапі відбувається збір необхідної інформації про роботу накопичувача енергії, включаючи такі параметри як напруга, струм, температура та інші релевантні характеристики. Підготовка даних включає їх нормалізацію, видалення викидів, заповнення пропущених значень та формування часових послідовностей, придатних для подальшої обробки нейронною мережею.

Ключовою особливістю методу є використання Баєсівської оптимізації для знаходження оптимальної конфігурації LSTM мережі. Цей процес починається з визначення простору пошуку, який включає можливі діапазони значень для різних

гіперпараметрів мережі. Після цього виконується початкова ініціалізація, під час якої обираються перші конфігурації для тестування. На основі результатів цих початкових експериментів будується сурогатна модель, яка апроксимує залежність якості роботи мережі від її гіперпараметрів. Оцінка цільової функції дозволяє визначити найбільш перспективні напрямки пошуку в просторі гіперпараметрів.

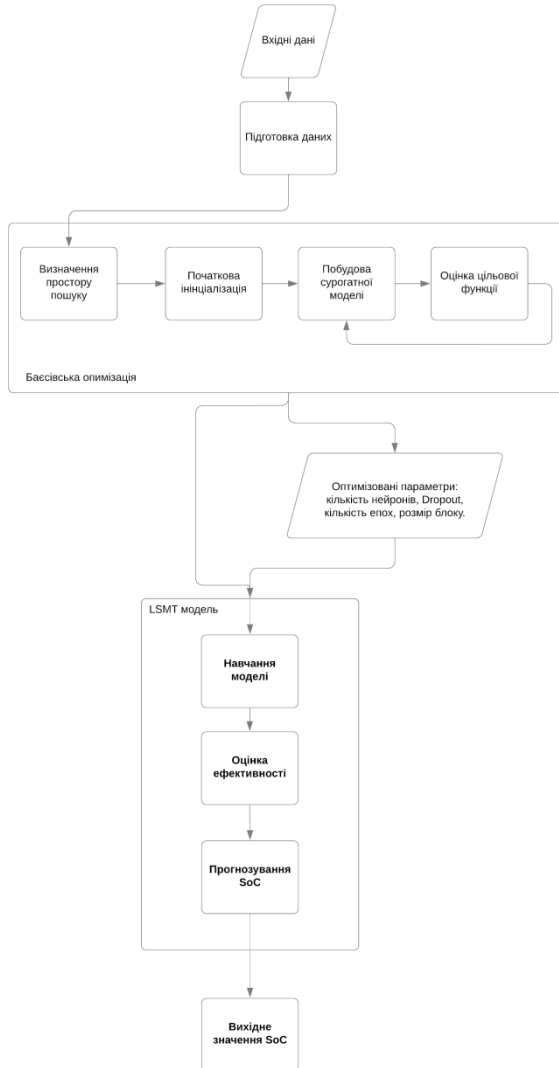


Рисунок 1 – Схеми застосування LSTM з оптимізатором Баєса

В результаті роботи оптимізаційного алгоритму визначаються оптимальні значення ключових параметрів архітектури LSTM мережі. Серед них кількість нейронів у кожному шарі, що впливає на здатність мережі до узагальнення; значення Dropout, яке допомагає запобігти перенавчанню шляхом випадкового відключення частини нейронів під час навчання; оптимальна кількість епох навчання, що забезпечує достатню тривалість тренування без ризику перенавчання; розмір блоку даних, який визначає, яка кількість часових кроків буде оброблятися одночасно.

Наступним важливим етапом є робота безпосередньо з LSTM моделлю. Процес навчання моделі відбувається з використанням оптимізованих гіперпараметрів на підготовленому наборі даних. При цьому використовується архітектура LSTM, яка особливо ефективна для обробки часових послідовностей завдяки своїй здатності зберігати інформацію про довгострокові залежності в даних. Після завершення навчання проводиться оцінка ефективності моделі на валідаційному наборі даних, що дозволяє переконатися в її здатності до узагальнення на нових даних.

Фінальним етапом методу є безпосереднє прогнозування значень SoC. На цьому етапі навчена модель застосовується до нових даних для отримання оцінок стану заряду накопичувача енергії. Важливою особливістю є можливість отримання не лише точкових оцінок, але й інтервалів довіри для прогнозованих значень, що підвищує практичну цінність методу в реальних застосуваннях.

Запропонований метод має ряд переваг порівняно з традиційними підходами до оцінки SoC. По-перше, використання LSTM архітектури дозволяє ефективно враховувати часову динаміку процесів у накопичувачі енергії. По-друге, застосування Басівської оптимізації забезпечує автоматичний підбір оптимальних параметрів моделі, що звільняє від необхідності ручного налаштування та потенційно покращує точність прогнозування. По-третє, метод є достатньо гнучким і може бути адаптований до різних типів накопичувачів енергії та умов їх експлуатації.

Застосування даного методу на практиці дозволяє підвищити точність оцінки стану заряду накопичувачів енергії, що є критично важливим для ефективного управління енергетичними системами, оптимізації режимів роботи накопичувачів та подовження терміну їх служби. Запропонований метод дозволить досягти покращення точності підвищення точності оцінки SoC при одночасному скороченні часу налаштування моделі втричі. Важливою особливістю розробленого методу є його універсальність щодо різних типів накопичувачів та автоматизація процесу оптимізації параметрів.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розширення набору оптимізованих параметрів, впровадження механізмів адаптивної оптимізації та інтеграцію з системами управління енергією.

Перелік посилань

1. Sen R., Bhattacharyya S. C. Off-grid electricity generation with renewable energy technologies in India: An application of HOMER. *Renewable Energy*. 2014. Vol. 62. Pp. 388–398. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.07.028>.
2. Zhao J., Qu X., Wu Y., Fowler M., Burke A. F. Artificial intelligence-driven real-world battery diagnostics. *Energy and AI*. 2024. Vol. 18.
3. Olabi A. G., Abdelghafar A. A., Soudan B., Alami A. H., Semeraro C., Al Radi M., Al-Murisi M., Abdelkareem M. A. Artificial neural network driven prognosis and estimation of Lithium-Ion battery states: Current insights and future perspectives. *Ain Shams Engineering Journal*. 2024. Vol. 15, No. 2.
4. Park S., Moura S., Lee K. Integration of Hardware and Software for Battery Hardware-in-the-Loop Toward Battery Artificial Intelligence. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2023. Vol. 10, No. 1. Pp. 888–900.