

Системный подход к созданию литий-ионных аккумуляторов: связь основных компонентов батареи и принцип работы

Д. О. Митягин

МИРЭА- Российский Технологический Университет, Москва

Аннотация: В статье рассматривается применение системного подхода к разработке и оптимизации литий-ионных аккумуляторов (ЛИА). Традиционные методы, фокусирующиеся на улучшении отдельных компонентов (анода, катода, электролита), часто не приводят к пропорциональному повышению общих характеристик аккумуляторной системы. Системный подход рассматривает ЛИА как сложную взаимосвязанную систему, где свойства каждого компонента напрямую влияют на поведение других и на интегральные показатели: энерго- и мощностную плотность, жизненный цикл, безопасность и стоимость. В работе проанализированы ключевые аспекты подхода: взаимозависимость между основными составляющими литий-ионной батареи, а также особенности при выборе материалов для каждой составляющей. Доказано, что только мультидисциплинарный подход, объединяющий химию, материаловедение и инженерия, позволяет достичь синергетического эффекта и создать высокоэффективные, безопасные и надежные аккумуляторные системы для современных применений.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, системный подход, материалы электродов, деградация, оптимизация, катод, литий-титановый аккумулятор, никель-марганец-кобальтовый аккумулятор.

Введение

Литий-ионные аккумуляторы стали доминирующим источником энергии для портативной электроники, электрического транспорта и систем накопления энергии. Растущие требования к их производительности диктуют необходимость перехода от эмпирического поиска новых материалов к целостному, системному проектированию [1,2]. Классический подход, направленный на изолированное увеличение емкости катодного или анодного материала, часто приводит к непредвиденным последствиям: ускоренной деградации, потере мощности или снижению термической стабильности [3]. Аккумуляторная ячейка представляет собой сложную электрохимическую систему, где анод, катод, электролит и сепаратор находятся в динамическом взаимодействии. Поэтому изменение одного параметра требует корректировки других для сохранения баланса системы. [4] Системный подход предлагает рассмотреть изменение совокупности

характеристик в зависимости от свойств отдельных элементов для такого всестороннего проектирования, рассматривая иерархические уровни: от атомарной структуры материалов до полностью собранной батареи [5].

Методология системного подхода

Системный подход к созданию ЛИА подразумевает параллельное проектирование и оптимизацию на трёх взаимосвязанных уровнях:

1. Уровень материалов: Выбор и синтез активных материалов, проводящих добавок, связующих, электролитов и сепараторов, применяемых при создании отдельных компонентов;

2. Уровень электрода и ячейки: Проектирование архитектуры электрода (толщина, пористость, состав), проектирование геометрии ячейки (призматическая, цилиндрическая);

3. Уровень модуля и батареи: Компоновка ячеек, система охлаждения, механическое сжатие, электрическая коммутация.

Ключевым принципом является итеративная обратная связь между уровнями. Данные о деградиационных процессах на уровне батареи используются для корректировки состава материалов на первом уровне.

Анализ отдельных элементов литиевой батареи

Литий-ионный аккумулятор представляет собой сложную электрохимическую систему, принцип работы которой основан на процессе интеркаляции ионов лития в кристаллическую решетку активных материалов электродов в процессе разряда, и на обратном процессе при заряде. При разряде ионы лития перемещаются от отрицательного электрода, называемого анодом, к положительному (катоду) через ионопроводящий электролит, в то время как электроны движутся по внешней цепи, создавая полезный ток. При заряде процесс обращается под действием внешнего источника тока [6].

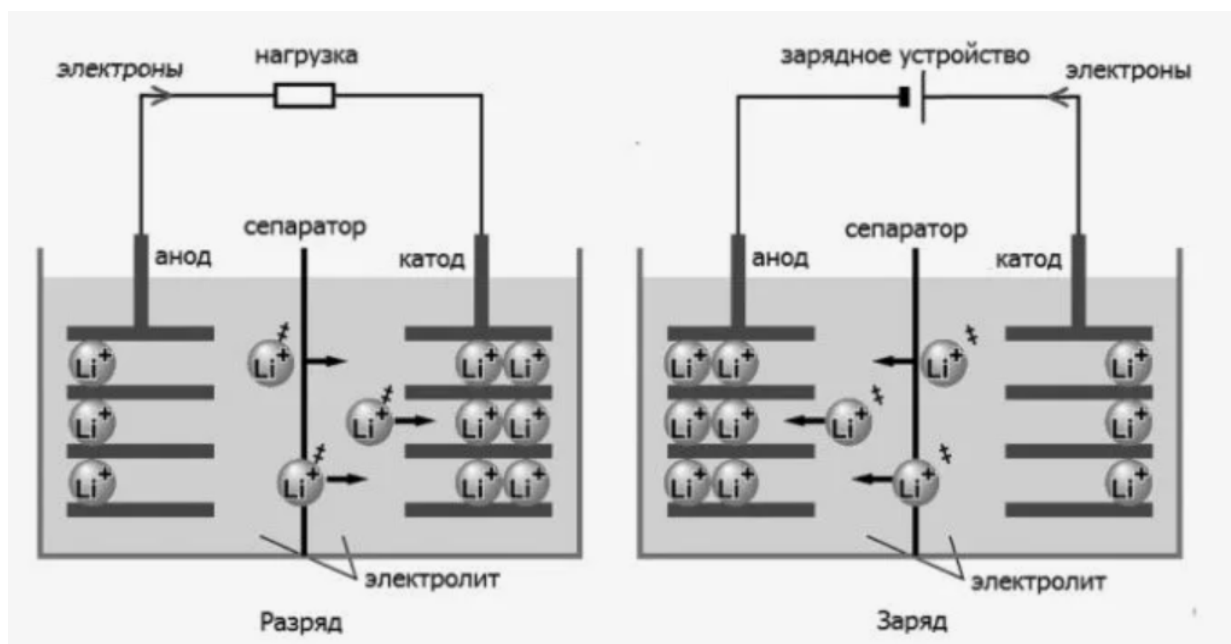


Рис 1. Принцип работы литий-ионного аккумулятора.

Рассмотрим более детально каждый элемент данной системы и определим их функции. Первый элемент, который можно выделить, это анод. Основной функцией анода является хранение ионов лития в заряженном состоянии, а следовательно, в процессе разряда он является основным источником ионов. В качестве материалов для изготовления анода чаще всего используется графит благодаря своей слоистой структуре, низкому рабочему потенциалу и стабильности. В качестве перспективных материалов возможно использовать кремний, а также его композиты (SiO_x , Si-C). В особых модификациях аккумуляторов можно использовать литий-титанат ($\text{LTO} - \text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) в качестве анода[7]. Во время первого заряда на поверхности анода формируется твердая электролитная фаза (SEI – Solid Electrolyte Interphase) – пассивирующий слой, который предотвращает дальнейшее разложение электролита, но необратимо забирает часть ионов лития [8], что влияет на его дальнейшую интеркалляцию, ухудшая его электрохимические свойства. Структура и свойства анода как части системы “литий-ионный аккумулятор”, а также связи между основными функциями данного элемента приведены на рис. 2.

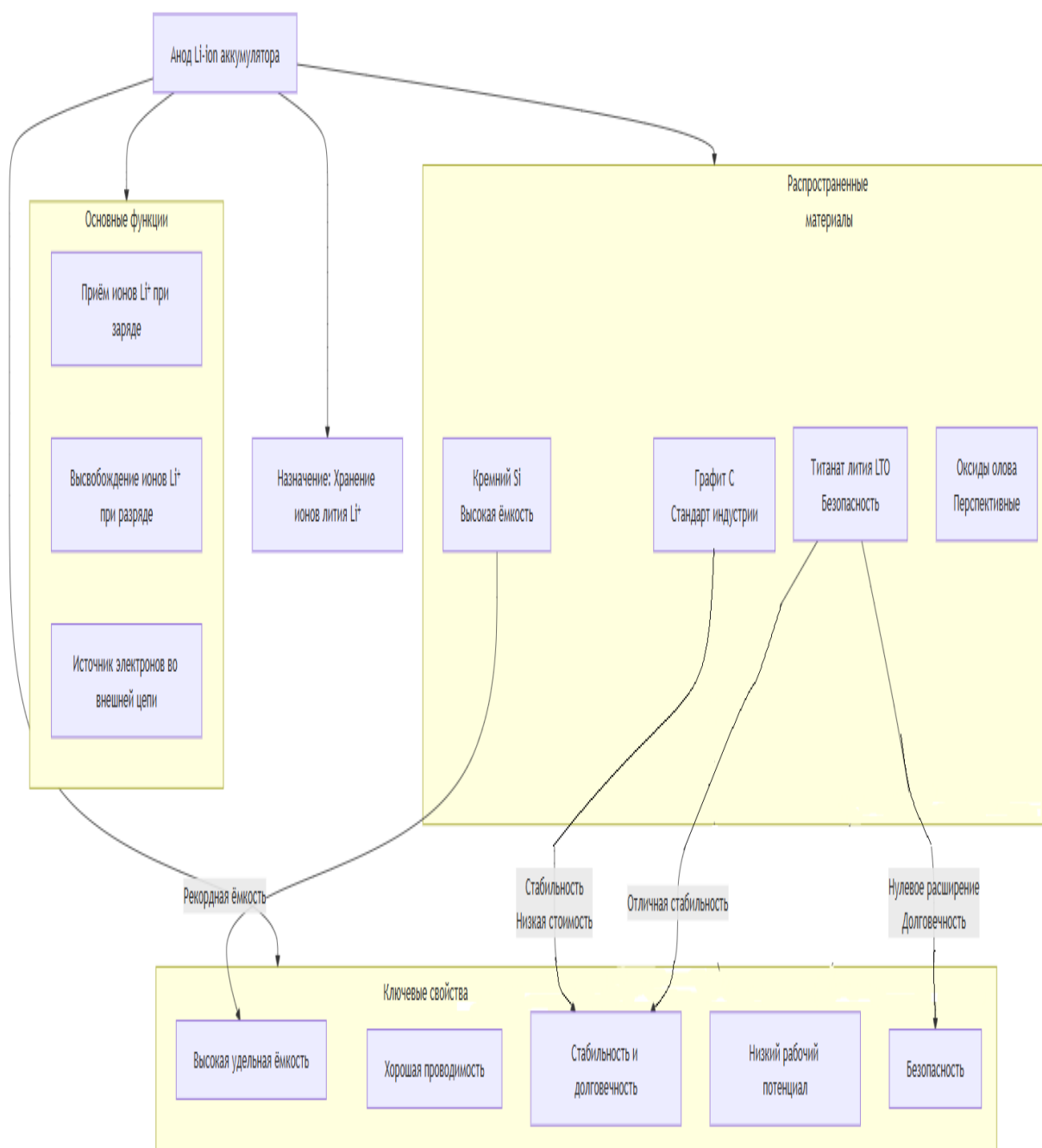


Рисунок 2. Основные свойства анода как элемента системы «Литий-ионный аккумулятор».

Другим важным элементом электрической схемы является катод. Основной функцией катода является приём ионов лития при разряде. Кроме того, катод является источником ионов лития при заряде аккумулятора. При изготовлении катода имеется огромный выбор различных материалов, которые определяют напряжение и емкость ячейки. Среди всех возможных

вариантов можно выделить слоистые оксиды (LiCoO_2 (LCO), $\text{LiNi}_x\text{MnyCozO}_2$ (NMC), $\text{LiNi}_x\text{CoyAlzO}_2$ (NCA)), шпинели (LiMn_2O_4 (LMO)), а также соединение типа Li-Fe-P-O (LFP-технология), которые отличаются термической стабильностью и долговечностью, но более низким рабочим напряжением [9]. В процессе работы на поверхности катода также может формироваться защитный слой (CEI – Cathode Electrolyte Interphase), который стабилизирует структуру катода. Структура и свойства катода как части системы «литий-ионный аккумулятор» приведены на рис. 3.

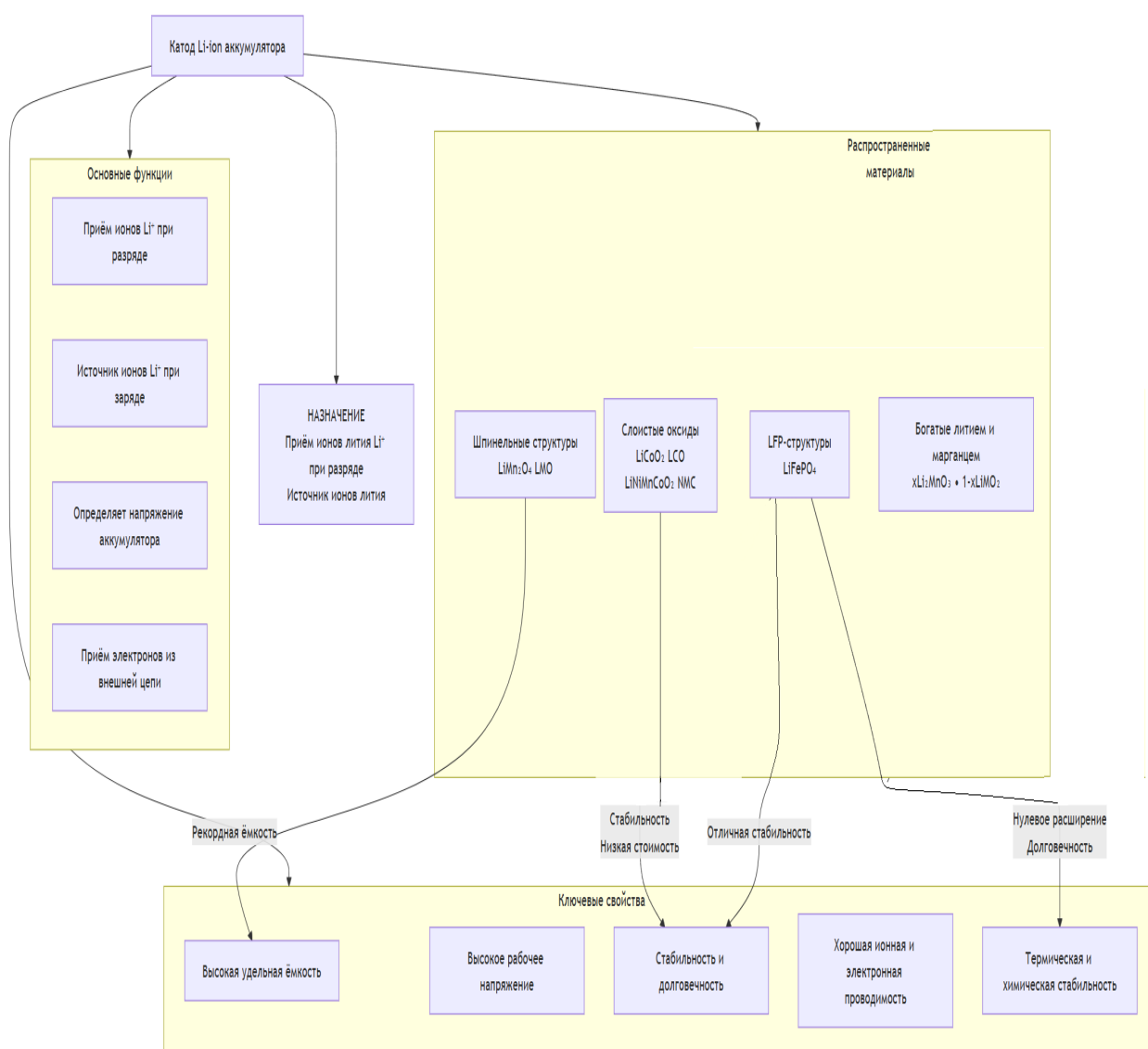


Рис. 3. Основные свойства катода как элемента системы «Литий-ионный аккумулятор».

Не менее важным элементом системы является электролит – слой между катодом и анодом. Основной функцией электролита является обеспечение ионной проводимости между электродами (катодом и анодом). В большинстве случаев электролит представляет собой соль лития (чаще всего LiPF_6), растворенную в смеси органических карбонатных растворителей (этилен-карбонат – ЕС, диметил-карбонат – DMC, этил-метил-карбонат – EMC). Для формирования SEI/CEI-плёнок со стабильными свойствами используются дополнительные вещества (например, винилкарбонат – VC или фторэтиленкарбонат – FEC) [10]. Основными свойствами электролита являются электрохимическая стабильность (широкий спектр рабочих напряжений), высокая ионная проводимость, поддержка широкого температурного диапазона, безопасность. Структура и свойства электролита как части системы “литий-ионный аккумулятор” приведены на рис. 4.

Следующий элемент литий-ионного аккумулятора – сепаратор. Назначение сепаратора - разделение анода и катода, которое предотвращает внутреннее короткое замыкание, но при этом позволяет ионам лития свободно проходить через свои поры. Для изготовления сепараторов, как правило, используются материалы, которые подходят для изготовления пористых полимерных плёнок (полипропилен – PP, полиэтилен – PE или их комбинация – PP/PE/PP), часто с керамическим покрытием для повышения термостойкости и смачиваемости электролитом [11]. Основными требованиями, которые выдвигаются к сепараторам, являются предотвращение короткого замыкания (обеспечивает безопасность и продлевает срок службы батареи), наличие защиты при перегреве (возможность отключения аккумулятора во время работы при высоких температурах), механическая прочность структуры, а также стабильность. Структура и свойства сепаратора как части системы “литий-ионный аккумулятор” приведены на рис. 5.

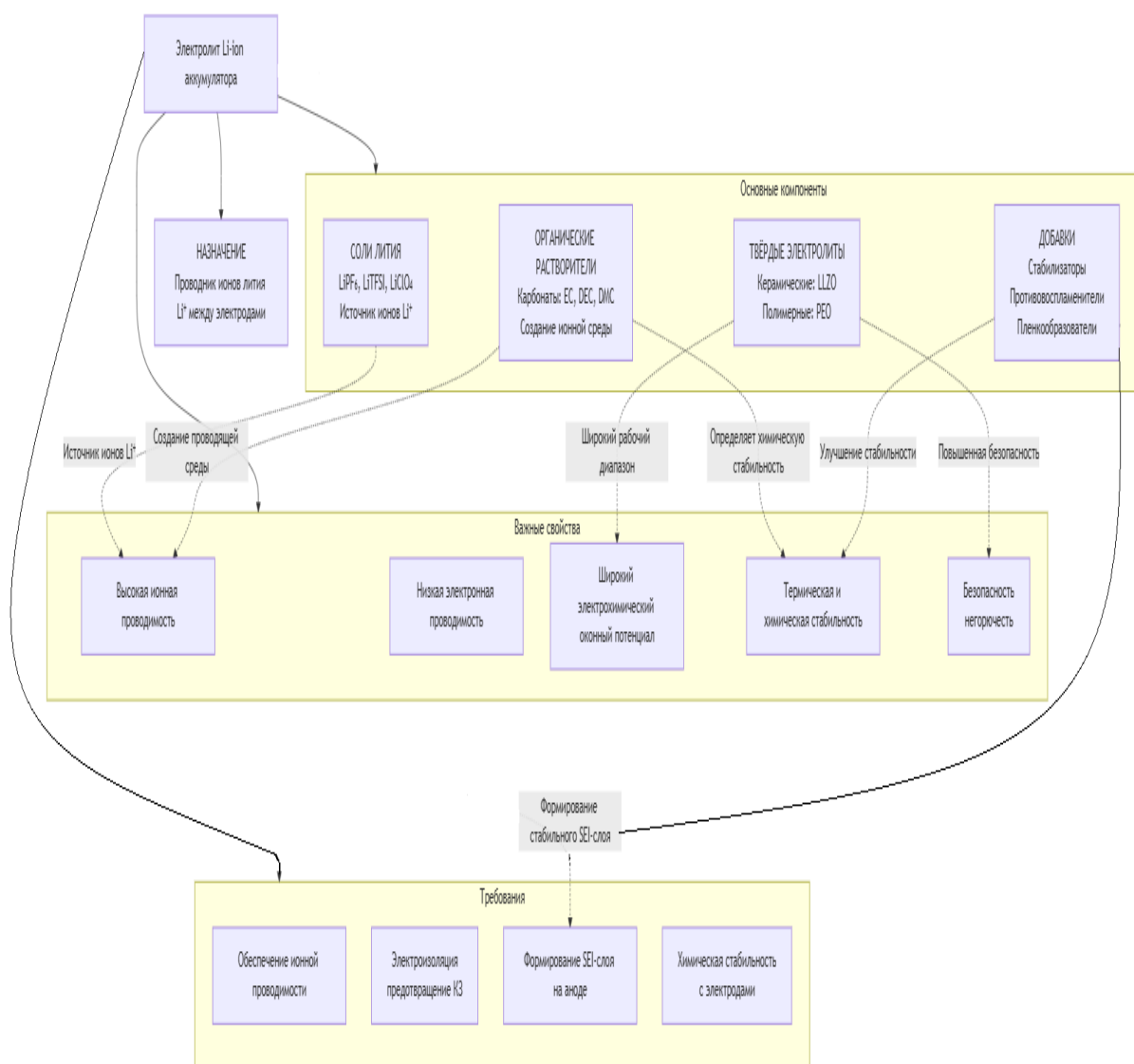


Рис. 4. Основные свойства электролита как элемента системы «Литий-ионный аккумулятор».

Ещё одним важным элементом системы «литий-ионный аккумулятор» является токосъёмник – элемент, который формирует контакт с электрической сетью. Основной функцией токосъёмников является обеспечение тока в цепи с литий-ионной батареей. Изготавливаются токосъёмники, преимущественно, из меди (если говорить об анодной части) или из алюминия (если говорить о катодной части). Идеальный токосъёмник должен быть максимально тонким и лёгким (чтобы не снижать удельную

энергоёмкость всего аккумулятора), но при этом обладать высокой проводимостью и прочностью.

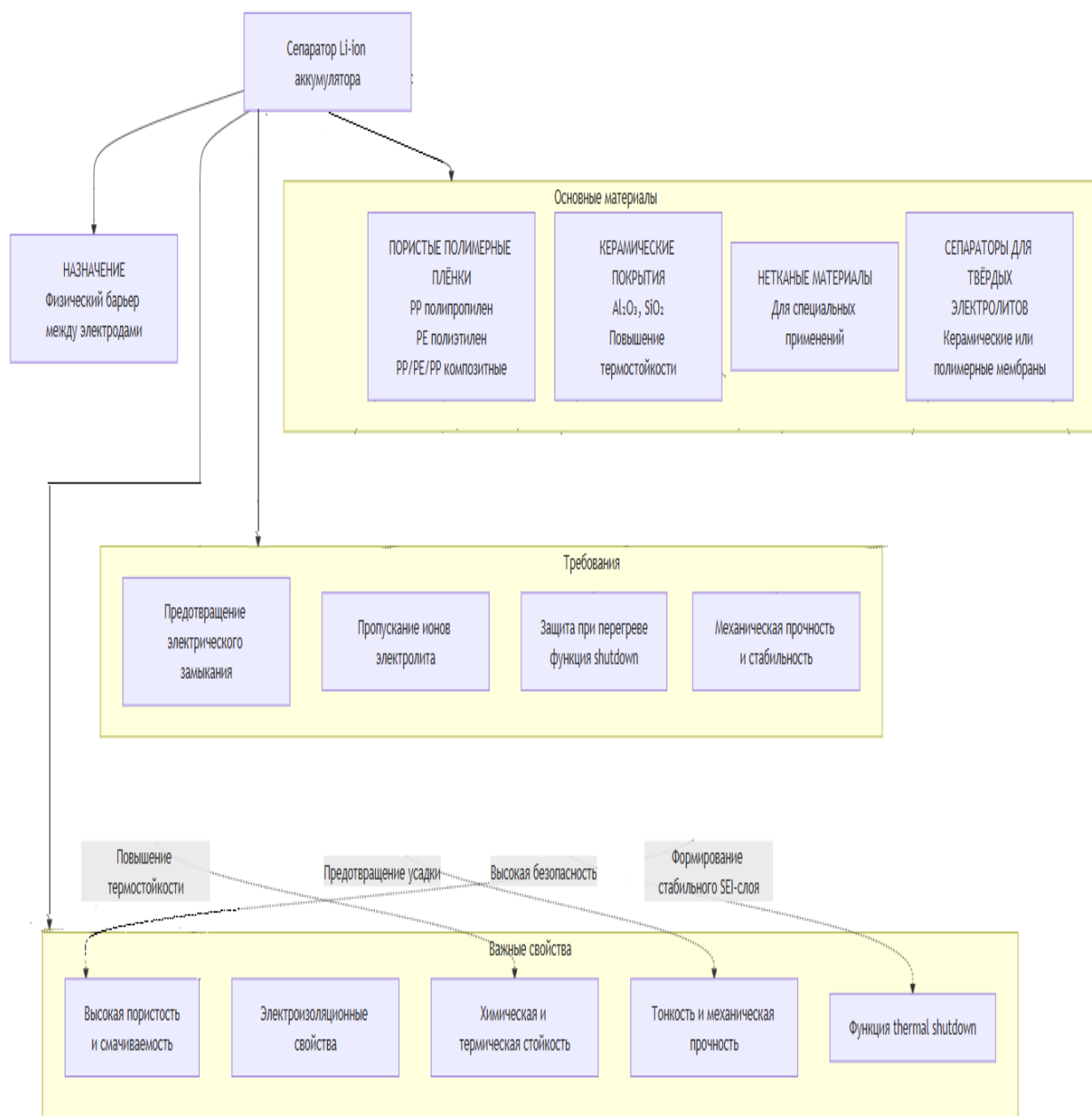


Рис. 5. Основные свойства сепаратора как элемента системы «Литий-ионный аккумулятор».

Структура и свойства токосъёмника как части системы “литий-ионный аккумулятор” приведены на рис. 6.

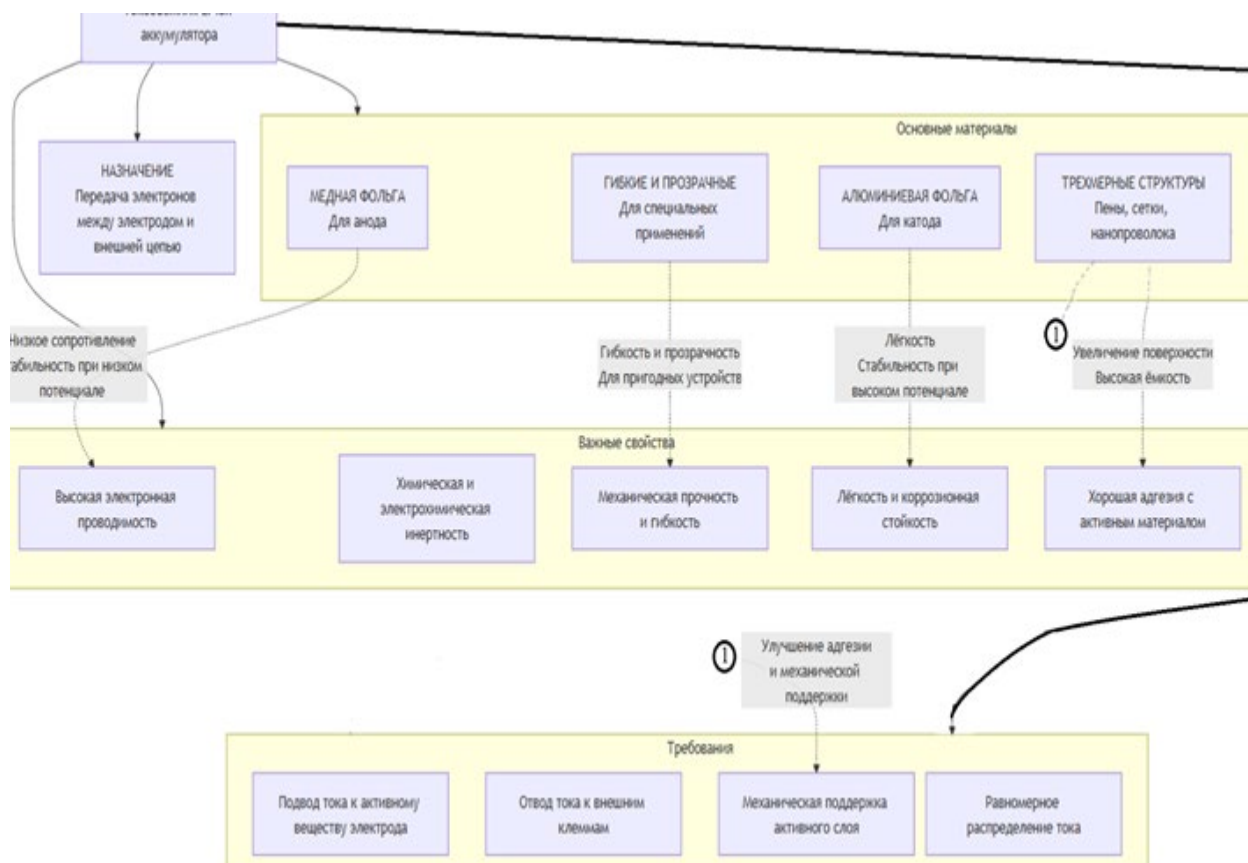


Рис. 6. Основные свойства токосъёмника как элемента системы «Литий-ионный аккумулятор».

Выделив основные элементы, можем установить взаимосвязи между ними. Рассмотрим общую концепцию связи элементов в литий-ионном аккумуляторе для образования единой системы, на которой отразим принцип работы аккумулятора. Каждый из элементов выполняет свою функцию, создавая единый механизм. У каждого из элементов есть уникальные свойства, которые влияют на итоговые характеристики рабочей батареи, из-за чего не всегда эффективно рассматривать изменения только одного активного элемента всей батареи, поскольку только комплексная работа может действительно дать усиление ряда свойств аккумулятора. Полная схема работы аккумулятора, а также связи между всеми активными элементами батареи с их основными назначениями, приведена на рис. 7.

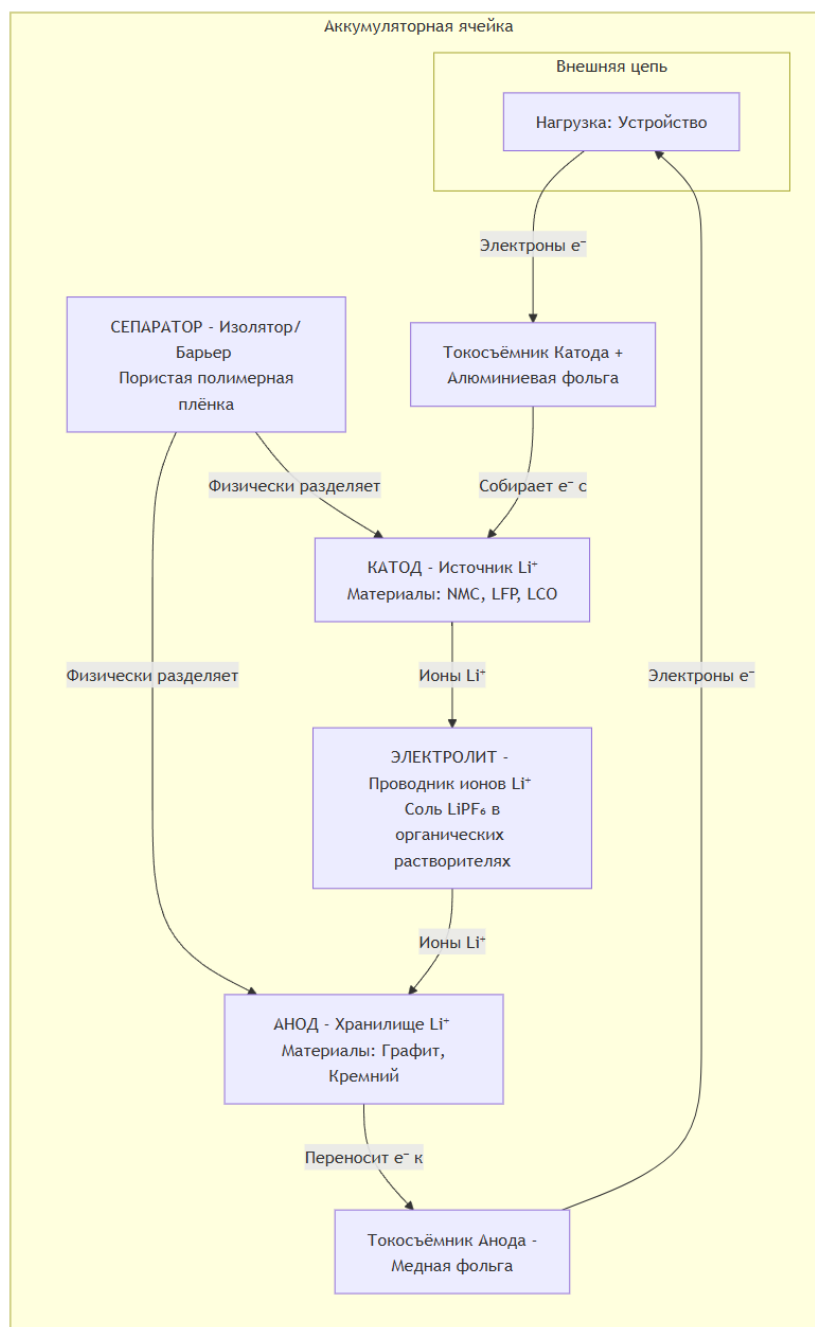


Рис. 7. Функциональная схема системы «Литий-ионный аккумулятор».

Основная схема разряда литий-ионного аккумулятора наглядно отражает, какие процессы происходят с активными компонентами батареи, а также позволяет определить, какой из элементов отвечает за перемещение заряженных частиц. Схема разряда изображена на рис. 8.

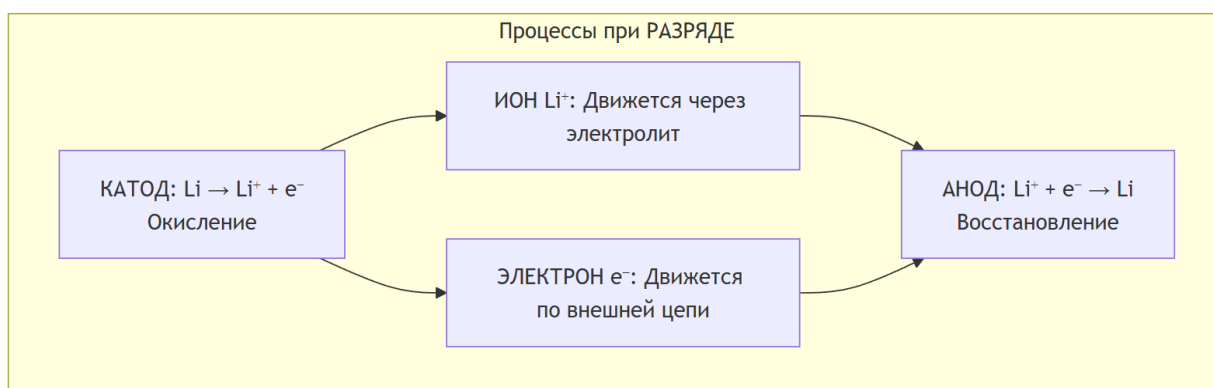


Рис. 8. Разряд литий-ионного аккумулятора

Заключение

Применение системного подхода является не опцией, а необходимостью для следующего поколения литий-ионных аккумуляторов. Погоня за отдельными рекордными показателями (например, емкостью одного электрода) бессмысленна без учета ее влияния на систему целиком. Дальнейший прогресс возможен только через тесную интеграцию усилий материаловедов, электрохимиков, инженеров-конструкторов и специалистов по системам управления. Создание единых платформ для многомасштабного моделирования и стандартизированных протоколов тестирования позволит ускорить итерационный процесс проектирования и вывести аккумуляторные технологии на новый уровень, необходимый для полномасштабной электрификации транспорта и энергетики.

Литература/References

1. Schmuck R., Wagner R., Hörpel G., et al. Performance and cost of materials for lithium-based rechargeable automotive batteries // Nature Energy. 2018. Vol. 3. pp. 267–278.
2. Li P., Zhao G., Zheng X., et al. Recent progress on silicon-based anode materials for practical lithium-ion battery applications // Energy Storage Materials. 2018. Vol. 15. pp. 422–446.

3. Manthiram A., Knight J.C., Myung S.T., et al. Nickel-rich and lithium-rich layered oxide cathodes: progress and perspectives // *Advanced Energy Materials*. 2016. Vol. 6. Iss. 1. 1501010.
4. Zhang S.S. Problems and their origins of Ni-rich layered oxide cathode materials // *Energy Storage Materials*. 2020. Vol. 24. pp. 247–254.
5. Xiong R., Sun F., Gong X., et al. A data-driven multi-scale extended Kalman filtering based parameter and state estimation approach of lithium-ion polymer battery in electric vehicles // *Applied Energy*. 2014. Vol. 113. pp. 463–476.
6. Schmuck R., Wagner R., Hörpel G., et al. Performance and cost of materials for lithium-based rechargeable automotive batteries // *Nature Energy*. 2018. Vol. 3. pp. 267–278.
7. Li P., Zhao G., Zheng X., et al. Recent progress on silicon-based anode materials for practical lithium-ion battery applications // *Energy Storage Materials*. 2018. Vol. 15. pp. 422–446.
8. Zhang S.S. Problems and their origins of Ni-rich layered oxide cathode materials // *Energy Storage Materials*. 2020. Vol. 24. pp. 247–254.
9. Doyle M., Fuller T. F., Newman J. Modeling of Galvanostatic Charge and Discharge of the Lithium/Polymer/Insertion Cell // *Journal of the Electrochemical Society*. 1993. Vol. 140. pp. 1526–1533.
10. Deshpande R., Verbrugge M., Cheng Y.-T., et al. Battery cycle life prediction with coupled chemical degradation and fatigue mechanics // *Journal of the Electrochemical Society*. 2012. Vol. 159. № 10. pp. A1730–A1738.
11. Single F., Latz A., Horstmann B. Identifying the mechanism of continued growth of the solid–electrolyte interphase // *ChemSusChem*. 2018. Vol. 11. № 12. pp. 1950–1955.

Дата поступления: 11.09.2025

Дата публикации: 28.10.2025