ISNN 3030-3907

2026/3
VOLUME 6

DEVELOPMENT OF SCIENCE

ILMIY JURNAL



Development of science

Ilmiy jurnal

2026/3 VOLUME 6

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Асадова Раъно Дилмуратовна
Тошкент Давлат техника университети доценти

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ АККУМУЛЯТОРОВ С УЧЁТОМ ДЕГРАДАЦИИ

Жабборов Тўлқин Камолович.
Ферганский государственный технический университет, доцент кафедры Энергетической инженерии.
Жобборов Баходир Тўлқинжон ўғли.
Докторант кафедры "Электроники и приборостроения".
E-mail: baxodir.jabborov@fstu.uz,
Tel:+998911231595

Аннотатция. Ключевым этапом является функциональная интеграция разработанной модели с возможностями экспериментального стенда. Описана процедура калибровки и верификации модели на основе реальных данных (ток, напряжение, температура), что позволяет адаптировать теоретические зависимости к конкретным условиям эксплуатации. Применение коэффициента детерминации (R^2) обеспечивает количественную оценку адекватности модели. Разработанный подход создает основу для создания прогностического инструмента, позволяющего оценивать остаточный ресурс аккумуляторов и оптимизировать режимы работы систем накопления энергии в климатических условиях Узбекистана.

Ключевые слова: математическое моделирование, электрохимический аккумулятор, циклическая деградация, календарное старение, прогнозирование ресурса, глубина разряда, эквивалентная электрическая схема, автономные фотоэлектрические станции, климатические условия Узбекистана, экспериментальный стенд.

Annotatsiya. Asosiy bosqich ishlab chiqilgan modelni eksperimental stend imkoniyatlari bilan funksional integratsiyalash hisoblanadi. Nazariy bog'liqliklarni aniq ekspluatatsion sharoitlarga moslashtirish imkonini beruvchi modelni real ma'lumotlar (tok, kuchlanish, harorat) asosida kalibrlash va verifikatsiya qilish protsedurasi tavsiflangan. Determinatsiya koeffitsienti (R^2) qo'llanilishi model adekvatligini miqdoriy baholashni ta'minlaydi. Ishlab chiqilgan yondashuv O'zbekiston iqlim sharoitida akkumulyatorlarning qoldiq resursini baholash va energiya to'plash tizimlarining ish rejimlarini optimallashtirish imkonini beruvchi prognoz vositasini yaratishga asos bo'ladi.

Kalit so'zlar: matematik modellashtirish, elektrokimyoviy akkumulyator, siklik degradatsiya, kalendar eskirish, resursni prognoz qilish, zaryad chuqurligi, ekvivalent elektr sxemasi, avtonom fotoelektrik stansiyalar, O'zbekiston iqlim sharoitlari, eksperimental stend.

ISSN 3030-3907

Annotation. The key stage is the functional integration of the developed model with the capabilities of the experimental test bench. The procedure for calibrating and verifying the model based on real data (current, voltage, temperature) is described, which allows for the adaptation of theoretical dependencies to specific operating conditions. The application of the coefficient of determination (R^2) provides a quantitative assessment of the model's adequacy. The developed approach creates the foundation for creating a predictive tool that enables the estimation of the remaining service life of batteries and the optimization of operating modes for energy storage systems in the climatic conditions of Uzbekistan.

Keywords: mathematical modeling, electrochemical battery, cyclic degradation, calendar aging, service life prediction, depth of discharge, equivalent electrical circuit, autonomous photovoltaic stations, climatic conditions of Uzbekistan, experimental test bench.

ВВЕДЕНИЕ.

В условиях Республики Узбекистан, характеризующихся экстремальными климатическими перепадами (от -10°C зимой до +50°C летом), высокой запылённостью атмосферы, нестабильной влажностью, влияние окружающей среды на аккумуляторы усиливается, что требует разработки специализированных моделей, способных учитывать региональные особенности эксплуатации [1].

В этой связи особую актуальность приобретает задача создания сложной, многоуровневой математической модели электрохимического аккумулятора с учётом процессов деградации, которая могла бы не только описывать текущие параметры батареи, но и прогнозировать её ресурс в условиях циклических нагрузок, нестабильной температуры, вариации глубины разряда и скорости зарядки [2].

1.1. Физические и химические механизмы деградации

Электрохимические аккумуляторы, применяемые в системах накопления энергии, со временем теряют свои первоначальные характеристики, что напрямую связано с необратимыми изменениями как в активных материалах электродов, так и в структуре электролита. Понимание фундаментальных механизмов деградации необходимо для адекватного построения математических моделей, позволяющих прогнозировать поведение аккумуляторов в процессе эксплуатации.

В научной литературе и инженерной практике выделяют два основных типа деградации [3,4]:

ISSN 3030-3907

Циклическая деградация – вызвана множественными циклами заряда-разряда.

Календарное старение – происходит в результате длительного хранения при различных уровнях заряда, даже без активных циклов.

Циклическая деградация. Основными факторами, влияющими на деградацию аккумуляторов в процессе циклов, являются:

Глубина разряда. Чем выше глубина разряда, тем сильнее ускоряется износ аккумулятора [5]:

$$L = L_0 \cdot e^{-k_D \cdot \text{ГР}} \quad (1.1)$$

где L - фактический срок службы аккумулятора, циклы; L_0 - базовый ресурс без учёта глубины разряда; k_D - коэффициент чувствительности к глубине разряда; ГР - глубина разряда, доля от 0 до 1.

Скорость заряда/разряда ($C_{\text{скорость}}$) высокие значения $C_{\text{скорость}}$ вызывают локальный перегрев, что способствует разрушению активного материала [2,6]:

$$R_{\text{внт}} = R_{\text{внт0}} \cdot (1 + \alpha_C \cdot C_{\text{скорость}}) \quad (1.2)$$

где $R_{\text{внт}}$ - внутреннее сопротивление аккумулятора, Ом; $R_{\text{внт0}}$ - начальное сопротивление нового аккумулятора; α_C - коэффициент влияния скорости заряда; $C_{\text{скорость}}$ - скорость заряда/разряда.

Температура оказывает двойственное влияние: умеренное повышение увеличивает ёмкость за счёт ускорения диффузии, однако высокая температура значительно ускоряет старение [23]:

$$Q_{\text{пот}} = Q_0 \cdot \left(1 - e^{-k_T \cdot (T - T_{\text{опор}})}\right) \quad (1.3)$$

где $Q_{\text{пот}}$ - потеря ёмкости, $А{\cdot}ч$; Q_0 - начальная ёмкость, $А{\cdot}ч$; k_T - температурный коэффициент деградации; T - температура эксплуатации, $°C$; $T_{\text{опор}}$ - опорная температура, $°C$.

В условиях длительного хранения батареи происходит изменение структуры электродов, рост пассивных слоёв на аноде и катоде, а также медленное расщепление электролита [20]:

$$Q(t) = Q_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (1.4)$$

где $Q(t)$ - остаточная ёмкость в момент времени t, $А{\cdot}ч$; Q_0 - начальная ёмкость, $А{\cdot}ч$; λ - коэффициент скорости календарного старения, 1/день; t - время эксплуатации, дни.

Календарное старение оказывает наиболее выраженное влияние в аккумуляторах, находящихся в режиме резерва или при неиспользовании (например, в аварийных или резервных системах).

ISSN 3030-3907

Реальные условия эксплуатации, особенно в системах фотоэлектрических станций, представляют собой многофакторную нагрузку, где одновременно действуют колебания температуры, изменения глубины разряда, переменная скорость зарядки, длительные периоды хранения с частичной зарядкой.

Суммарное влияние можно аппроксимировать моделью [3]:

$$D = k_1 \cdot \text{ГР} + k_2 \cdot (T - T_{ref}) + k_3 \cdot C_{\text{скорость}} + k_4 \cdot t \quad (1.5)$$

где D - интегральная оценка деградации (условные единицы); k_1, k_2, k_3, k_4 - эмпирические коэффициенты влияния; ГР - глубина разряда; T - температура эксплуатации, °C; $T_{\text{опор}}$ - опорная температура, °C; $C_{\text{скорость}}$ - скорость заряда/разряда; t - длительность эксплуатации, дни.

Уникальность задач проекта заключается в необходимости адаптации данных моделей к специфике климатических зон Узбекистана, таких как высокая запылённость воздуха ускоряет старение вентиляторов охлаждения аккумуляторных шкафов, широкий диапазон температур приводит к частым переходам аккумуляторов в критические режимы, нестабильные профили нагрузок (характерные для систем автономного энергоснабжения) увеличивают число глубоких циклов разряда.

В связи с этим в последующих подразделах будет выполнена разработка модели, интегрирующей все вышеописанные факторы с возможностью последующей верификации на экспериментальном стенде.

Понимание и формализация физико-химических механизмов деградации являются основой для построения адекватной математической модели аккумуляторов. Это позволит не только точно описывать поведение накопителей энергии, но и формировать научно обоснованные рекомендации по оптимальному управлению процессами зарядки и разрядки для повышения срока службы и надёжности автономных фотоэлектрических станций [5,6].

1.2. Математическая модель аккумулятора

Разработка математической модели аккумулятора с учётом деградации является одним из ключевых этапов настоящего проекта. Основная задача – создание такого формализованного описания, которое одновременно отражало бы физические процессы, происходящие в аккумуляторе, позволяло бы применять экспериментальные данные, полученные на стенде, для калибровки и верификации модели, имело бы прогностический характер и позволило бы моделировать ресурс накопителя в условиях циклических нагрузок.

ISSN 3030-3907

Современные подходы в математическом моделировании аккумуляторов строятся на представлении аккумуляторной системы в виде эквивалентной электрической схемы, которая моделирует процессы: электродной реакции; сопротивления электролита; переноса ионов; накопления заряда [4,5,6].

В настоящем проекте применена многоуровневая модель, включающая: базовую RC-модель (первый уровень), модель деградации ёмкости и сопротивления (второй уровень), адаптацию модели к реальным данным стенда (третий уровень).

Базовая RC-модель (Electrical Equivalent Circuit Model) [4,6]. Электрическое поведение аккумулятора в первом приближении может быть описано схемой, состоящей из напряжения холостого хода V_{xx}, внутреннего сопротивления аккумулятора R_0, цепочки RC-контуров, моделирующих поляризационные эффекты.

Математически модель описывается уравнением Кирхгофа:

$$V_{\text{акк}}(t) = V_{\text{xx}}\big(S(t)\big) - I(t) \cdot R_0 - \sum_{i=1}^{n} V_{RC_i}(t) \qquad (1.6)$$

где $V_{\text{акк}}(t)$ - клеммное напряжение аккумулятора, В; $V_{\text{xx}}(S)$ - напряжение разомкнутой цепи, В; $I(t)$ - ток нагрузки, А; R_0 - внутреннее сопротивление аккумулятора, Ом; $V_{RC_i}(t)$ - напряжение на i-м RC-контуре, В; n - число RC-контуров.

Динамика напряжения на RC-контуре:

$$\frac{dV_{RC_i}}{dt} = -\frac{1}{R_i C_i} V_{RC_i}(t) + \frac{1}{C_i} I(t) \qquad (1.7)$$

где R_i - сопротивление RC-контуры, Ом; C_i - ёмкость RC-контуры, Ф; $V_{RC_i}(t)$ - напряжение на RC-контуре, В; $I(t)$ - ток нагрузки, А.

Модель деградации должна учитывать изменения ёмкости и внутреннего сопротивления с течением времени и количеством циклов.

Согласно эмпирическим и научным данным [18,19,23]:

$$Q(t) = Q_0 \cdot (1 - \alpha \cdot N(t)) \qquad (1.8)$$

$$R(t) = R_0 \cdot (1 - \beta \cdot N(t)) \qquad (1.9)$$

где $Q(t)$ - остаточная ёмкость аккумулятора в момент времени t, $А{\cdot}ч$; Q_0 - начальная ёмкость, $А{\cdot}ч$; α - коэффициент деградации ёмкости; $N(t)$ - число завершённых циклов.

Модель зависимости напряжения холостого хода. Для корректного отражения поведения батареи используется нелинейная зависимость [21]:

$$V_{\text{xx}}(\text{СЗ}) = a_0 + a_1 \cdot \text{СЗ} + a_2 \cdot \text{СЗ}^2 + \cdots + a_n \cdot \text{СЗ}^n \qquad (1.10)$$

ISSN 3030-3907

где V_{xx} - напряжение холостого хода, В; СЗ - состояние заряда, %; $a_0, a_1, \ldots, a_n$ - эмпирические коэффициенты полинома.

Интеграция с данными экспериментального стенда. Экспериментальный стенд позволяет снимать значения напряжения на аккумуляторе $V_{акк}$, тока нагрузки/зарядки I(t), остаточной ёмкости батареи, количества завершённых циклов N, температуры батарейного блока.

Эти параметры будут использованы для определения начальных значений Q_0,R_0, расчёта коэффициентов деградации **α,β,** калибровки модели напряжения холостого хода $\mathbf{V_{xx}(СЗ)}$ моделирования поведения батареи при нестандартных нагрузках**.**

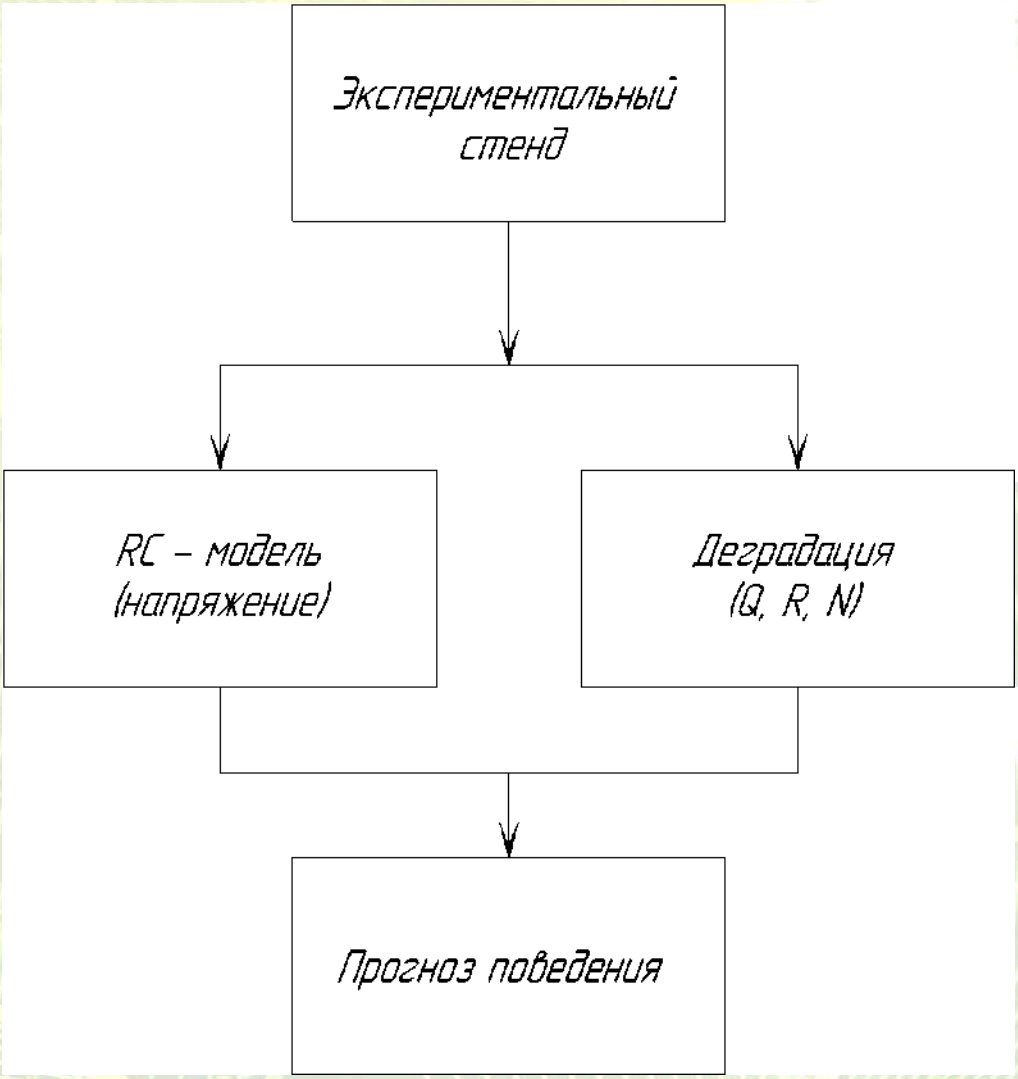


Рис.1.1. Диаграмма структуры модели

Преимущества предложенной модели - это объединение электрических и деградационных моделей; адаптивность, возможность калибровки на реальных данных, высокая степень достоверности: за счёт интеграции экспериментальных данных.

ISSN 3030-3907

Разработанная многоуровневая модель обеспечивает надёжное предсказание поведения аккумуляторов в реальных условиях эксплуатации автономных фотоэлектрических станций. В следующих подразделах будет выполнена адаптация данной модели к реальным климатическим и эксплуатационным условиям Узбекистана, с целью создания прогностической модели срока службы аккумуляторов.

1.3. Функциональная интеграция модели и возможностей стенда

Одной из основных задач настоящего проекта является не только теоретическое построение математической модели аккумулятора, но и её практическая интеграция с экспериментальными данными, получаемыми с использованием стенда. Такая интеграция обеспечивает калибровку модели на основе реальных данных, верификацию математических зависимостей и формирование прогностического инструмента для инженерных расчётов и оптимизации работы систем хранения энергии в реальных условиях [8].

Экспериментальный стенд обладает функциями регистрации всех необходимых параметров для функционирования модели такие как ток аккумулятора $I(t)$, напряжение на клеммах аккумулятора $V_{акк}(t)$, температура батарейного блока $T(t)$, количество циклов заряда-разряда $N(t)$, остаточная ёмкость $Q(t)$, сопротивление аккумулятора $R(t)$ [9].

Основные этапы интеграции в следующим:

1. Стенд позволяет задать стартовые параметры модели:

начальная ёмкость:

$$Q_0 = Q(t = 0)$$

начальное внутреннее сопротивление:

$$R_0 = R(t = 0)$$

2. На основании измеренных данных строится зависимость изменения ёмкости аккумулятора от числа циклов:

$$Q(N) = Q_0 \cdot (1 - \alpha \cdot N) \qquad (1.11)$$

и изменение внутреннего сопротивления:

$$R(N) = R_0 \cdot (1 + \beta \cdot N) \qquad (1.12)$$

где α и β - эмпирические коэффициенты деградации [10], [11].

3. Адаптация модели напряжения разомкнутой цепи Экспериментальные точки зависимости $V_{xx}=f(СЗ)$ аппроксимируются полиномом:

$$V_{xx}(СЗ) = a_0 + a_1 \cdot СЗ + a_2 \cdot СЗ^2 + \cdots + a_n \cdot СЗ^n \qquad (1.13)$$

где СЗ - состояние заряда аккумулятора, выраженное в % [12].

4. Контроль динамики напряжения на аккумуляторе. Данные стенда позволяют сравнить рассчитанное моделью значение:

ISSN 3030-3907

с фактическим:

$$V_{\text{модель}}(t) = V_{\text{хх}}\big(\text{СЗ}(t)\big) - I(t) \cdot R(t) - \sum_{i=1}^{n} V_{RC_i}(t) \qquad (1.14)$$

что даёт возможность оценить адекватность модели.

Для формального анализа расхождений используется коэффициент детерминации R^2:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(V_{exp}(t_i) - V_{\text{модель}}(t_i)\right)^2}{\sum_{i=1}^{n} \left(V_{exp}(t_i) - \bar{V}_{exp}\right)^2} \qquad (1.15)$$

где $V_{exp}(t_i)$ - измеренное значение, а $\bar{V}_{exp}$ - среднее значение по эксперименту.

Такой подход позволяет формировать модель, полностью привязанную к реальным данным и выполнять итерационную коррекцию модели, а также формировать научно обоснованные прогнозы ресурса аккумуляторов в конкретных условиях эксплуатации [13,14].

Разработанная концепция интеграции математической модели и возможностей экспериментального стенда обеспечивает уникальное сочетание теоретической строгости и практической применимости модели.

ВЫВОД.

1. Разработана математическая модель аккумуляторной системы, учитывающая как мгновенные, так и накопленные деградационные процессы, что обеспечивает возможность её применения для прогнозирования эксплуатационных характеристик накопителей энергии в условиях нестабильной генерации и переменных климатических факторов. В модели реализована структура многоуровневого приближения, включающая, электрический эквивалент (RC-модель) для описания внутренней динамики тока и напряжения, эмпирическую регрессионную структуру для оценки остаточной ёмкости и роста эквивалентного внутреннего сопротивления, температурно-зависимую компоненту, позволяющую учитывать локальные тепловые условия эксплуатации.

2. Проведён формальный анализ параметров деградации, учитывающие глубина разряда (ГР), скорость тока, число циклов, температура и время хранения. Установлены количественные закономерности, описывающие снижение полезной ёмкости по числу циклов и температуре, что позволило вывести обобщённую зависимость.

$$Q_{\text{res}}(N, T, \text{ГР}) = Q_0 \cdot \exp\left(-\alpha_1 N - \alpha_2 T - \alpha_3 \text{ГР}\right) \qquad (1.16)$$

где Q_0 - начальная ёмкость; α_i - эмпирически определённые коэффициенты.

ISSN 3030-3907

3. Построенная модель может служить основой для разработки цифрового двойника аккумуляторной системы, позволяющего в реальном времени моделировать поведение накопителя в гибридных энергетических системах на базе ФЭС + АКБ + SC + ДГУ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Birkl C. R., Howard W. F., McTurk E., et al. Degradation diagnostics for lithium ion cells // Journal of Power Sources. – 2017. – Vol. 341. – P. 373–386. – DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.12.011.
2. Zhang Y., Lee J., Leng Y., et al. A general model for estimating capacity fade in lithium-ion batteries // Applied Energy. – 2019. – Vol. 251. – Article 113387. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113387.
3. Keil P., Jossen A. Aging of lithium-ion batteries in electric vehicles: Impact of regenerative braking // Journal of The Electrochemical Society. – 2017. – Vol. 164, No. 1. – P. A6066–A6074. – DOI: 10.1149/2.0111701jes.
4. Dubarry M., Truchot C., Liaw B. Y., et al. Incremental capacity analysis and close-to-equilibrium OCV measurements to quantify capacity fade in commercial rechargeable lithium batteries // Journal of Power Sources. – 2011. – Vol. 196, No. 23. – P. 10336–10343. – DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.06.033.
5. Vetter J., Novak P., Wagner M. R., et al. Ageing mechanisms in lithium-ion batteries // Journal of Power Sources. – 2005. – Vol. 147, No. 1–2. – P. 269–281. – DOI: 10.1016/j.jpowsour.2005.01.006.
6. Alavi S. M., Babaei M. A physics-based model for battery thermal aging and capacity fade // Electrochimica Acta. – 2021. – Vol. 373. – Article 137851. – DOI: 10.1016/j.electacta.2021.137851.
7. Schmalstieg J., Käbitz S., Ecker M., Sauer D. U. A holistic aging model for Li(NiMnCo)O_2 based 18650 lithium-ion batteries // Journal of Power Sources. – 2014. – Vol. 257. – P. 325–334. – DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.11.012.
8. Smith K., Rahn C. D., Wang C. Y. Modeling and simulation of lithium-ion batteries from a systems engineering perspective // Journal of The Electrochemical Society. – 2007. – Vol. 154, № 4. – P. A331–A338.
9. Zhang S. S. The effect of the charging protocol on the cycle life of a Li-ion battery // Journal of Power Sources. – 2006. – Vol. 161, № 2. – P. 1385–1391.
10. Ecker M., Gerschler J. B., Vogel J., Käbitz S., Hust F., Dechent P., Sauer D. U. Development of a lifetime prediction model for lithium-ion batteries based on extended accelerated aging test data // Journal of Power Sources. – 2012. – Vol. 215. – P. 248–257.
11. Berecibar M., Gandiaga I., Villarreal I., Omar N., Van Mierlo J., Van den Bossche P. Critical review of state of health estimation methods of Li-ion batteries

ISSN 3030-3907

for real applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 56. – P. 572–587.
12. Hu X., Jain G., Lin X., Zhang C. Data-driven battery modeling for electric vehicle applications // eTransportation. – 2018. – Vol. 1. – Article ID 100003. – DOI: 10.1016/j.etran.2019.100003.
13. Draper N. R., Smith H. App lied Regression Analysis. – New York: Wiley, 1998. – 706 p.
14. Schmalstieg J., Käbitz S., Ecker M., Sauer D. U. A holistic aging model for Li(NiMnCo)O_2 based 18650 lithium-ion batteries // Journal of Power Sources. - 2014. - Vol. 257. - P. 325-334.

ISSN 3030-3907