Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2025, Том 17, № 5 / 2025, Vol. 17, Iss. 5 https://esj.today/issue-5-2025.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/18NZVN525.pdf

1.6.21. Геоэкология (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:
Кириллов, А. М. Аккумуляторные батареи для беспилотных летательных аппаратов: моделирование срока службы / А. М. Кириллов, М. Н. Догадайло, Е. В. Белякова // Вестник евразийской науки. — 2025. — Т. 17. — № 5. — URL: https://esj.today/PDF/18NZVN525.pdf.

For citation:
Kirillov A.M., Dogadaylo M.N., Belyakova E.V. Drone batteries: lifespan modeling. *The Eurasian Scientific Journal*. 2025;17(5): 18NZVN525. Available at: https://esj.today/PDF/18NZVN525.pdf. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 537.22; 629.7

Кириллов Андрей Михайлович
ФГБОУ ВО «Сочинский государственный университет», Сочи, Россия
Доцент
Кандидат физико-математических наук
E-mail: kirill806@gmail.com
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=38847
WoS: https://www.webofscience.com/wos/author/rid/D-1235-2016
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=7102546144
Google Scholar: https://scholar.google.ru/citations?user=qM3HDIUAAAAJ

Догадайло Михаил Николаевич
ФГБОУ ВО «Сочинский государственный университет», Сочи, Россия

Белякова Екатерина Владимировна
ФГБОУ ВО «Сочинский государственный университет», Сочи, Россия
Старший преподаватель
E-mail: bev.03@yandex.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=865553

Аккумуляторные батареи для беспилотных летательных аппаратов: моделирование срока службы

Аннотация. Сфера применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в настоящее время широка и разнообразна: начиная, например, от сельского хозяйства и реагирования на чрезвычайные ситуации до военно-боевого применения. Видов и типов БПЛА в зависимости от условий применения и их функционального назначения существует большое множество. Общей проблемой во всех случаях является электроснабжение подвесного оборудования и электродвигателей БПЛА на электрической тяге. Последнее накладывает существенное ограничение на время и дальность полетов. Поэтому исследования, касающиеся увеличения энергоэффективности техники БПЛА являются актуальными. В данной работе предложены и проанализированы математико-физические модели срока службы аккумуляторных батарей (АКБ). Применение подобных моделей позволит производить подбор оптимальных эксплуатационных режимов батарей для увеличения их срока службы. В качестве характеристики срока службы АКБ выбрано количество циклов заряда аккумулятора, которое рассматривается в его зависимости от глубины разряда батареи. Рассмотрены два типа аккумуляторных батарей: свинцово-кислотные и литий-железофосфатные. Сделано заключение, что наиболее подходящая глубина разряда батареи при учете правильного баланса между долговечностью и практичностью находится в интервале от 20–30 % до 60–90 %, в зависимости

от конкретного применения аккумуляторной батареи литий-железофосфатного типа. Кроме того, на основании проведенного анализа сделаны также выводы, лежащие в плоскости общих вопросов надежности технических систем.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; БПЛА; дрон; чрезвычайная ситуация; аккумуляторная батарея; надежность технических систем; число циклов заряда; глубина разряда; свинцово-кислотный аккумулятор; литий-железофосфатный аккумулятор

Введение

Сфера применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в настоящее время широка и разнообразна: начиная, например, от сельского хозяйства и реагирования на чрезвычайные ситуации до военно-боевого применения [1]. Видов и типов БПЛА в зависимости от условий применения и их функционального назначения существует большое множество. Общей проблемой во всех случаях является электроснабжение подвесного оборудования и электродвигателей БПЛА на электрической тяге. Последнее накладывает существенное ограничение на время и дальность полетов. Поэтому исследования, касающиеся увеличения энергоэффективности техники БПЛА являются актуальными.

В данной работе предложены математико-физические модели срока службы аккумуляторных батарей (АКБ). Применение подобных моделей позволит производить подбор оптимальных эксплуатационных режимов батарей для увеличения их срока службы. В качестве характеристики срока службы АКБ выбрано количество циклов заряда аккумулятора, которое рассматривается в его зависимости от глубины разряда батареи.

Под сроком службы будем понимать число циклов заряда аккумуляторной батареи N, которое находится в зависимости от глубины разряда батареи (DoD — depth of discharge). Одним циклом принято считать полный расход заряда аккумулятора от 100 % до 0 %. Параметр DoD определяет, какая доля накопленной энергии извлекается из аккумулятора в процессе его работы, и непосредственно влияет на его ресурс и производительность. Глубина разряда различными способами влияет на срок службы аккумуляторов разных типов, таких как AGM, гелевые и литий-железо-фосфатные ($LiFePO_4$).

Встречающиеся в литературе графики зависимостей N от DoD построены либо по данным экспериментальных исследований [2], либо с помощью выражений, полученных на основании степенной интерполяции [3]. Однако физического обоснования подобного рода выражений пока в литературе не обнаружено. Авторами данной статьи сделан пробный шаг в этом направлении.

Свинцово-кислотные аккумуляторы

В работе [2] приведен график зависимости N от DoD для свинцово-кислотной аккумуляторной батареи (lead acid battery). Данная зависимость очень напоминает изотерму или адиабату для идеального газа (в зависимости давления от объема), а в общем случае политропу — $pV^n = const$. Применив метод термодинамики к рассматриваемому случаю, можем записать выражение, связывающее число циклов заряда N с глубиной разряда батареи DoD (выраженной в долях, т. е. числом от 0 до 1, что соответствует интервалу от 0 % до 100 %):

$$N \cdot DoD^n = c, \quad (1)$$

где:

c — некоторая константа;

n — «показатель политропы».

По графику из [2] получены числовые значения *N* и соответствующих значений *DoD* (табл. 1).

Таблица 1

Глубина разряда батареи и соответствующее число циклов ее заряда

DoD (%)	12.4	15.2	19.3	26	38	60	70	80	90	100
N	3 500	3 000	2 500	2 000	1 500	1 000	885	730	690	650

Составлено соавтором Кирилловым А.М. на основе данных [2]

С помощью соотношения (1) и данных таблицы 1 можно составить систему двух уравнений, например:

$$\begin{cases} 3500 \cdot 0.124^n = c, \\ 650 \cdot 1.0^n = c. \end{cases}$$

Решив полученную систему, находим n = 0,806 и c = 650.

Таким образом, для случая, соответствующего данным работы [2]. Получаем зависимость числа циклов от глубины разряда:

$$N = 650 \cdot DoD^{-0.806}. \quad (2)$$

Общий вид формулы:

$$N = c \cdot DoD^{-n}. \quad (3)$$

График зависимости *N* от *DoD*, построенного согласно (2), представлен на рисунке 1 сплошной линией. Данные таблицы 1 приведены на графике в виде точек.

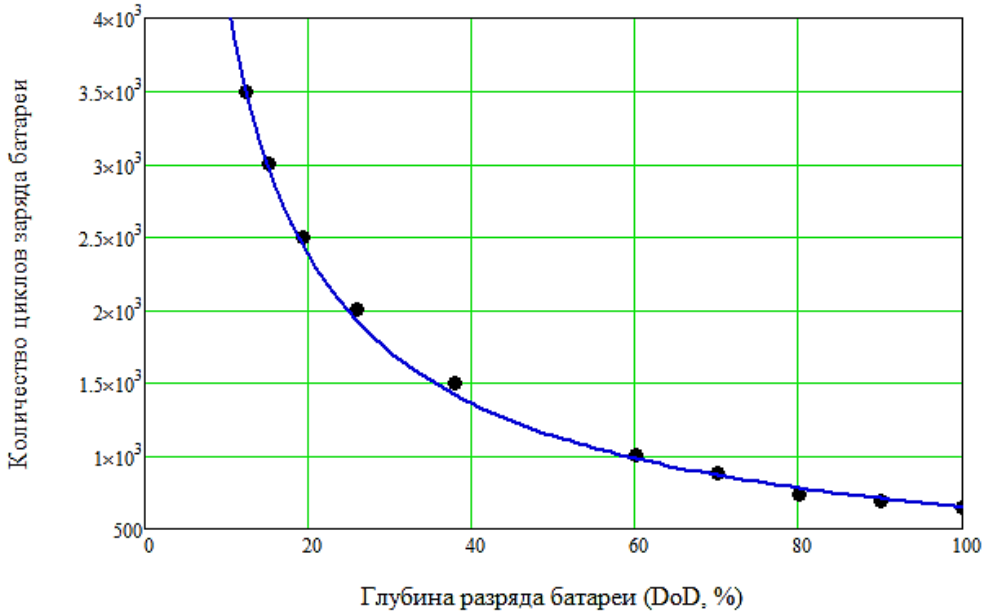

Рисунок 1. *Зависимость количества циклов заряда батареи от глубины ее разряда (выполнен соавтором А.М. Кирилловым)*

Можно видеть, что степенная аппроксимация числовых значений из работы [2] дает очень хороший результат. Полученный результат, вместе с предположением о «политропности» данной зависимости, дает основания для более глубокого осмысления «физики» происходящих в аккумуляторной батарее процессов в ходе её эксплуатации. «Физики», как в прямом, так и переносном смыслах, ведь процессы не только «чисто» физические, но и более влиятельные — химические (точнее — электрохимические).

Физический смысл константы c в выражении (1) очевиден. Это число циклов зарядки батареи в случае ее полной разрядки ($DoD = 100$ %). С показателем степени n («показатель политропы») дело обстоит сложнее. Эта величина, скорее всего, зависит от множества факторов. Это может быть, например, химический состав всех элементов АКБ, концентрации электролита, энергоемкость батареи, конструктивные особенности аккумулятора и др.

В [3] приведена «справочная» зависимость для расчета числа циклов:

$$lgN_c = lgN_1 - b(1 - \theta_p), \tag{4}$$

где:

N_c — число циклов заряда-разряда;

N_1 — число циклов при глубине разряда $\theta_p = 1$ (100 %);

b — эмпирический коэффициент равный -0,9…-0,97.

Обратим внимание, что первоисточником, содержащим формулу (4), является справочник по химическим источникам тока.[1]

Отметим, однако, что в указанной работе [3] содержится неточность. Написано, что N_1 — число циклов при глубине разряда $\theta_p = 0$. Индекс 1 для N_1, конечно не случаен, он соответствует $\theta_p = 1$. И очевидно, что N_c окажется равным N_1 при $\theta_p = 1$.

Формулу (4) можно с использованием принятых в данной статье обозначений преобразовать к виду:

$$N = N_1 \cdot 10^{-b(1-DoD)}. \tag{5}$$

На рисунке 2 приведены графики, построенные по выражению (2) и (5) (две верхних кривых).

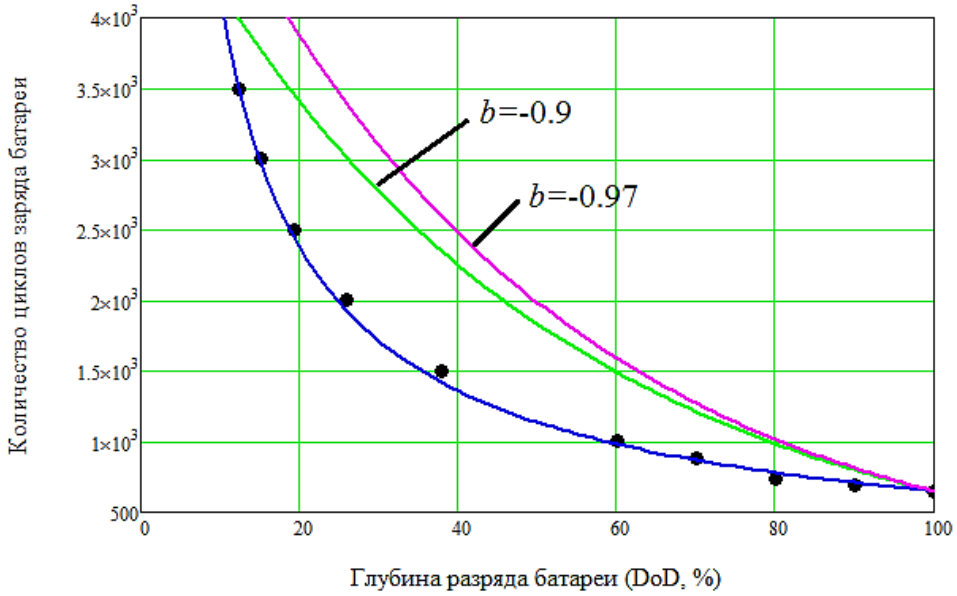

Рисунок 2. *Сопоставление модельных расчетов с экспериментальной зависимостью (выполнен соавтором А.М. Кирилловым)*

[1] Химические источники тока: Справочник. Под ред. Коровина Н.В., Скундина А.М. // М.: Издательство МЭИ, 2003. С. 267.

Можно видеть, что предложенная авторами данной статьи модель аппроксимации (2) более точна в сравнении с моделью (4), приведенной в [3].

С физической точки зрения очень оправдана аппроксимация исследуемой зависимости экспонентой, т. к. известно, что подавляющее большинство процессов релаксации (стремления систем к состоянию равновесия) протекают по экспоненциальному закону. Проведем подобную аппроксимацию, задав функцию *N* от *DoD* в виде:

$$N = c_1 \cdot e^{-c_2 \cdot DoD}, \tag{6}$$

где:

c_1 и c_2 — постоянные, определяемые условиями задачи.

С помощью соотношения (6) и данных таблицы 1 составим систему двух уравнений, например:

$$\begin{cases} 3500 = c_1 \cdot e^{-c_2 \cdot 0.124}, \\ 650 = c_1 \cdot e^{-c_2 \cdot 1.000}. \end{cases}$$

Решив полученную систему, находим $c_1 = 4442$ и $c_2 = 1.922$. В итоге получаем:

$$N = 4442 \cdot e^{-1.922 \cdot DoD}. \tag{7}$$

Для сравнения построим графики (рис. 3).

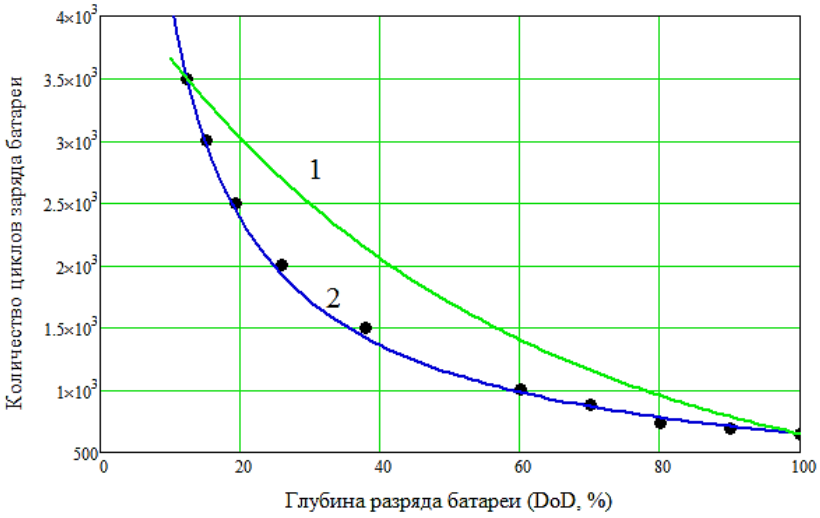

Рисунок 3. *Сопоставление модельных расчетов с экспериментальной зависимостью при экспоненциальной аппроксимации (кривая 1) и степенной аппроксимации (кривая 2) (выполнен соавтором А.М. Кирилловым)*

На графике, представленном на рисунке 3, кривая 1 соответствует экспоненциальной аппроксимации (7), а кривая 2 — степенной аппроксимации (2). Можно видеть, что экспоненциальная аппроксимация, в отличие от степенной, не дает удовлетворительного совпадения с заданными значениями числа циклов и глубины разряда (представлены точками). Совпали только первая и последняя точки, что, конечно, не удивительно, т. к. система уравнений решалась с помощью числовых значений, соответствующих этим точкам.

Таким образом, можно сделать вывод, что для свинцово-кислотных аккумуляторов более подходящим методом интерполяции экспериментальных данных, отражающих зависимость их срока жизни от глубины разряда, является степенная аппроксимация. Методы термодинамики здесь приводят к хорошим результатам, т. к. приводя процесс к физическому смыслу, его можно представлять в виде некоторого политропного процесса.

В работе [4] рассмотрен обобщенный алгоритм расчета срока службы аккумуляторных батарей и приведена блок-схема этого алгоритма. Однако, конкретных формул в математическом виде авторами не представлено, что несколько затрудняет практическую реализацию этого алгоритма заинтересованными лицами. В основу исследования авторами [4] положены типовые характеристики срока службы аккумуляторных батарей в зависимости от глубины разряда для различных типов свинцовых аккумуляторов (FLA — залитая свинцово-кислотная; LCB — свинцово-карбоновая; OPzS — залитая свинцово-кислотная с цилиндрическими пластинами; OPzV — гелеобразная свинцово-кислотная с цилиндрическими пластинами; AGM — свинцово-кислотная с абсорбированным электролитом).

Литий-железофосфатные аккумуляторы

В отличие от свинцовых аккумуляторов, совершенно другой характер зависимости числа циклов зарядки от глубины разряда имеют литий-железофосфатные аккумуляторные батареи (LiFePO4). Например, график, представленный в статье на сайте «Harvey Power»[2], выглядит следующим образом (рис. 4). Очевидно, что аппроксимация рассмотренными выше способами не даст хорошего результата.

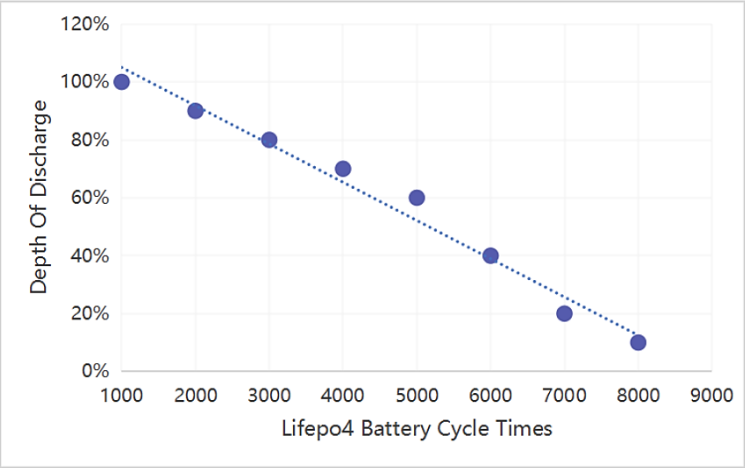

Рисунок 4. *Зависимость количества циклов заряда батареи от глубины ее разряда*[2]

Если на графике (рис. 4) поменять местами оси и построить кривую. Применяя сглаживание сплайнами, то график приобретает вид, представленный на рисунке 5.

Известно, что практически любую экспериментальную зависимость можно аппроксимировать с помощью степенного многочлена (например, ряда Тейлора) [5]. Однако в этом случае вложить какой-то физический смысл в каждую составляющую аппроксимирующей зависимости будет практически невозможно.

График, представленный на рисунке 6, позволяет сравнить между собой различные типы аккумуляторных батарей с точки зрения срока их службы. Литий-железофосфатные аккумуляторы в этом случае явно лидируют. На графиках, представленных на рисунках 5 и 6, можно увидеть общую закономерность для литий-железофосфатных (LiFePO4) аккумуляторных батарей: при глубине разряда в интервале от 0 до порядка 20÷30 % количество циклов заряда разряда уменьшается гораздо быстрее, чем в интервале от 20÷30 % до порядка 60÷90 %. После достижения глубины разряда 60÷90 % дальнейшее её увеличение приводит к более

[2] Глубина разряда батареи Lifepo4: наилучшая полезная емкость для увеличения срока службы батареи. [Электронный ресурс]. URL: https://harveypoweress.com/ru/lifepo4-battery-depth-of-discharge/ (дата обращения: 20.09.2025).

ускоренному уменьшению числа циклов заряда-разряда. Таким образом, наиболее подходящая глубина разряда батареи при учете правильного баланса между долговечностью и практичностью находится в интервале от 20÷30 % до 60÷90 %, в зависимости от конкретного применения аккумуляторной батареи литий-железофосфатного типа ($LiFePO_4$).

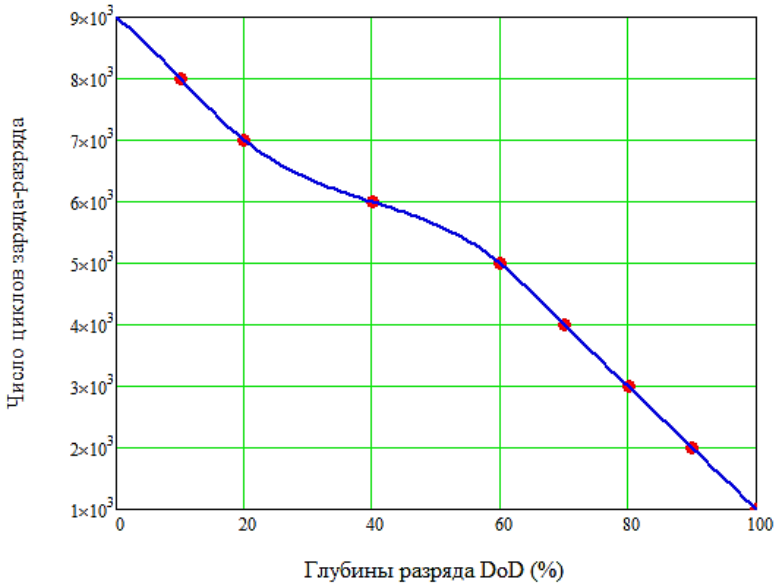

Рисунок 5. *Зависимость количества циклов заряда батареи от глубины ее разряда (выполнен соавтором А.М. Кирилловым)*

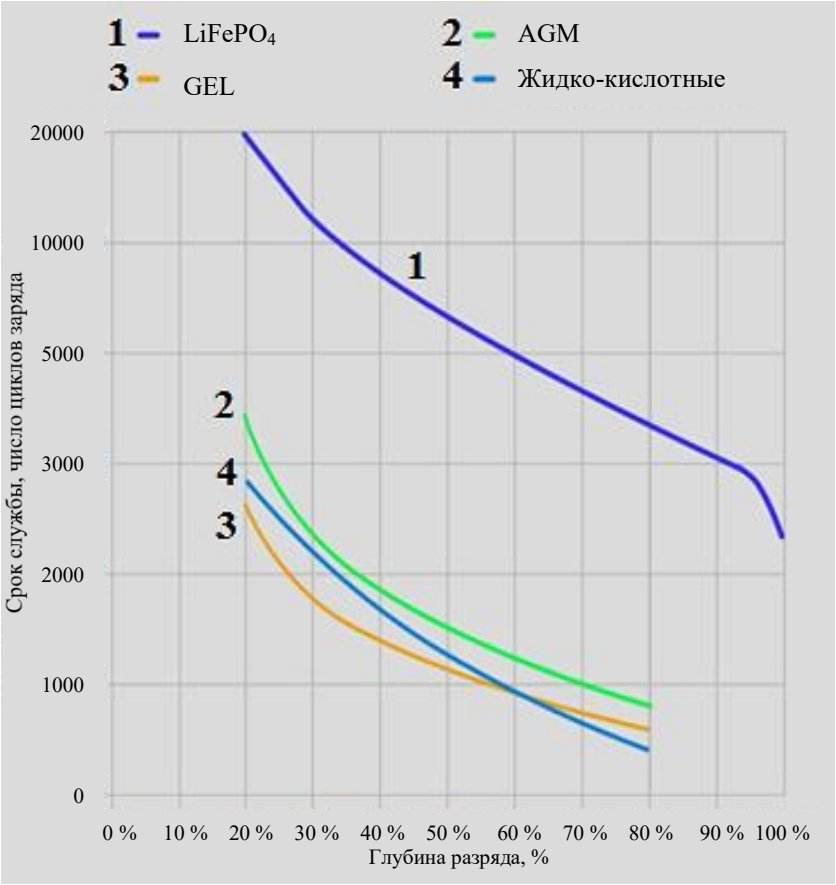

Рисунок 6. *Зависимость количества циклов заряда батареи от глубины ее разряда для разных типов аккумуляторов (выполнен соавтором А.М. Кирилловым)*

Если «обратить» графики на рисунках 4–6, т. е. изобразить зависимость не от глубины разряда, а, наоборот, от остаточного заряда (рис. 7), то можно увидеть их удивительное сходство с диаграммой «напряжение-деформация» (рис. 8).[3] Такая диаграмма, имеющая место в таких дисциплинах как: сопротивление материалов, теория упругости, теория пластичности, теория ползучести и др., показывает, как зависят возникающие в твердом теле механические напряжения (σ) от величины его относительной деформации (ε).

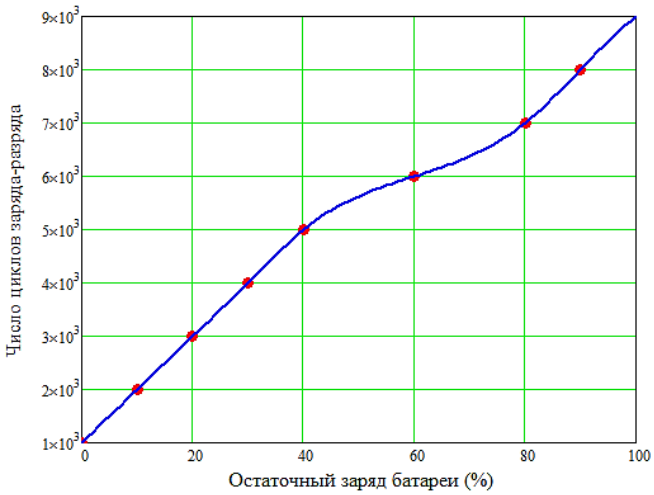

Рисунок 7. *Зависимость количества циклов заряда батареи от величины остаточного заряда батареи (выполнен соавтором А.М. Кирилловым)*

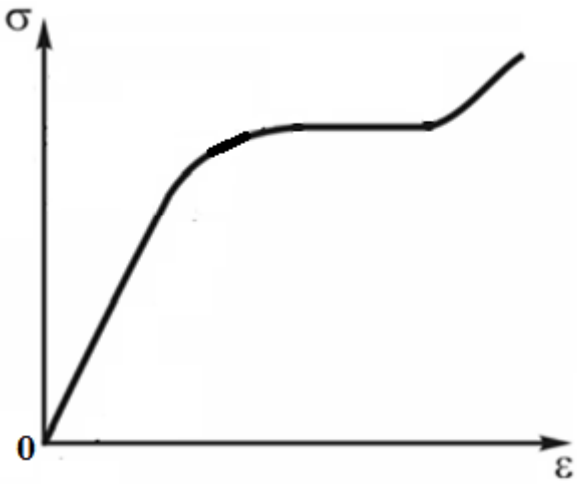

Рисунок 8. *Диаграмма растяжения-сжатия (зависимость нормального напряжения от относительной деформации) (выполнен соавтором А.М. Кирилловым)*

Такое сходство очень «далеких друг от друга» (в физическом смысле) процессов можно пояснить следующим образом. Деформация твердого тела ε — это, в некотором смысле, величина, показывающая насколько твердое тело «удалено» от состояния равновесия, а механическое напряжение σ — величина, отражающая «реакцию» твердого тела на деформацию. Диаграмма на рисунке 8 графически иллюстрирует эту зависимость. Аналогично, заряд АКБ, как сложной электрохимико-физической системы, — это показатель ее «удаленности» от состояния равновесия. Чем выше заряд, тем более «удалена» эта система от

[3] Радин В.П., Самогин Ю.Н., Чирков В.П. Теоретические основы сопротивления материалов (конспект лекций) // Справочник. Инженерный журнал. — 2015. — № 7(220). — С. 39–46. — DOI 10.14489/hb.2015.07. — EDN UCMLSL.

состояния равновесия (рис. 7). А число циклов заряда-разряда АКБ — это показатель ее реакции на выведение системы из равновесия.

Приведенная аналогия, конечно, на первый взгляд кажется «спекулятивно натянутой». Однако, такого рода предположения и аналогии являются предпосылкой для более серьезного и глубокого анализа. Рассмотрение таких разных по своей природе явлений лежит в плоскостях теорий надежности технических систем [6], нелинейных динамических систем [7] и неравновесных термодинамических систем [8].

Заключение

В результате проведенного исследования основным выводом практической значимости с точки зрения длительности срока службы является целесообразность применения для БПЛА литий-железофосфатных аккумуляторов. Они позволяют проводить больше циклов заряда, что является существенным для БПЛА при их постоянном (не эпизодическом) использовании. Например, при патрулировании больших территорий с целью выявления очагов возгораний.

С научно-теоретической точки зрения основными результаты работы:

1. Для свинцово-кислотных аккумуляторов наибольшую точность при обработке экспериментальных данных дает степенная интерполяция;
2. Наиболее подходящая глубина разряда литий-железофосфатных батарей при оптимальном балансе между долговечностью и практичностью находится в интервале от 20÷30 % до 60÷90 %;
3. Отмеченное сходство протекания механических и физико-электрохимических процессов может позволить в перспективе расширить общенаучные представления о надежности технических систем в целом.

Несомненно, что внедрение новых технологий во все сферы народного хозяйства, является ключом к устойчивому развитию страны в целом, обеспечивая различные виды ее суверенитета, так и развитию регионов. При этом наиболее ценными являются междисциплинарные исследования и разработки на стыках наук — химии, биологии, физики, инженерии и других. Взаимосвязь же всех инструментов поддержки, в том числе науки и инновационных технологий, является необходимым минимум для обеспечения устойчивости внедрения научных результатов в прикладную и инновационную сферу [9]. Для Краснодарского края с его обширными сельскохозяйственными угодьями в его равнинной части и лесами в труднодоступных районах Кавказских гор применение более широкое внедрение беспилотных технологий (БПЛА) по линии министерства по чрезвычайным ситуациям (МЧС) является особенно актуальным. Например, согласно исследованиям, выполненным в работе [10], показано, что экономические факторы, включая среднедушевой валовый региональный продукт (ВРП) на душу населения и прибыль с с/х-продуктов в Краснодарском крае, имеют сильную взаимосвязь с урожайностью. Соответственно любые изменения в урожайности будут сильно отражаться на экономике региона. И применение БПЛА в сельском-хозяйстве и в МЧС будет способствовать увеличению урожайности и минимизации потерь от различных чрезвычайных ситуаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гонта С.Н., Иванов Н.А., Малкова Ю.А. Кустарные методы противодействия FPV-дронам камикадзе (по опыту специальной военной операции) // Национальная безопасность. — 2025. № 1. — С. 103–117. — DOI 10.7256/2454-0668.2025.1.70805. — EDN ABQBWD.
2. Чебоксаров А.Н. Исследование влияния температуры и глубины разряда на работу свинцово-кислотных аккумуляторов // Технико-технологические проблемы сервиса. — 2024. № 3(69). — С. 8–10. — EDN OCHAWA.
3. Сиротский М.С., Пугачев А.А. Математическое моделирование срока службы свинцово-кислотных аккумуляторных батарей для источников бесперебойного питания // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. — 2024. № 1(23). — С. 81–88. — DOI 10.30987/2658-6436-2024-1-81-88. — EDN IMGKHR.
4. Карамов Д.Н., Муфтахов И.Р., Потапов В.В., Сыромятников А.А., Шушпанов И.Н. Универсальная модель срока службы аккумуляторных батарей в автономных фотоэлектрических системах // Информационные и математические технологии в науке и управлении. — 2022. — № 2(26). — С. 85–96. — DOI 10.38028/ESI.2022.26.2.008. — EDN DHJECD.
5. Кириллов А.М., Сухарев Ф.И., Иваненко Н.А., Семенов С.Ю. Сейсмоизолирующие опоры Курзанова-Семенова: теория и эксперимент // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16, № 4. — EDN IOHUNT.
6. Кириллов А.М., Завьялов М.А. Синергетический подход к моделированию физического износа инженерно-технических систем // Вестник МГСУ. — 2015. — № 5. — С. 93–102. — EDN TSIMPH.
7. Макаров П.В. Нагружаемый материал как нелинейная динамическая система. Проблемы моделирования // Физическая мезомеханика. — 2005. — Т. 8, № 6. — С. 39–56. — EDN IUCZFJ.
8. Олемской А.И., Коплык И.В. Теория пространственно-временной эволюции неравновесной термодинамической системы // Успехи физических наук. — 1995. — Т. 165, № 10. — С. 1105–1144.
9. Штуц Р.В., Клименко Г.А., Журавлева Е.В. Научно-технологический потенциал в обеспечении устойчивого социально-экономического развития регионов России // Социально-экономическое пространство регионов. — 2023. № 17(4). — С. 260–268.
10. Литвинова Т.И., Рябчикова Ю.О., Грибок Н.Н. Взаимосвязь климата и экономики Краснодарского края: регрессионный анализ и адаптация // Социально-экономическое пространство регионов. — 2023. № 17(4). — С. 235–242.

Kirillov Andrey Mikhailovich
Sochi State University, Sochi, Russia
E-mail: kirill806@gmail.com
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=38847
WoS: https://www.webofscience.com/wos/author/rid/D-1235-2016
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=7102546144
Google Scholar: https://scholar.google.ru/citations?user=qM3HDIUAAAAJ

Dogadaylo Mikhail Nikolaevich
Sochi State University, Sochi, Russia

Belyakova Ekaterina Vladimirovna
Sochi State University, Sochi, Russia
E-mail: bev.03@yandex.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=865553

Drone batteries: lifespan modeling

Abstract. The applications of unmanned aerial vehicles (UAVs) are currently broad and diverse, ranging from agriculture and emergency response to military combat use. There are numerous types and styles of UAVs, depending on their conditions of use and functional purpose. A common challenge in all cases is the power supply for the suspended equipment and electric motors of electric UAVs. The latter significantly limits flight time and range. Therefore, research into increasing the energy efficiency of UAV technics is relevant. This paper proposes mathematical and physical models of battery life. The use of such models will enable the selection of optimal operating modes for batteries to extend their service life. The number of battery charge cycles, which is considered in relation to the battery's depth of discharge, is chosen as a battery life characteristic. Two types of batteries are considered: lead-acid and lithium-iron phosphate. It was concluded that the most appropriate battery depth of discharge, taking into account the correct balance between durability and practicality, ranges from 20–30 % to 60–90 %, depending on the specific application of the lithium iron phosphate battery. Furthermore, the analysis also provided insights into general issues of technical system reliability.

Keywords: unmanned aerial vehicle; UAV; drone; emergency; rechargeable battery; reliability of technical systems; number of charge cycles; depth of discharge; lead-acid battery; lithium iron phosphate battery