

УДК 621.317.7

**Щербань А.П.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## СПОСІБ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРЯДНИХ ПРОЦЕСІВ У ДЖЕРЕЛАХ ЖИВЛЕННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

*У статті наведені основні тенденції в галузі контролю стану джерел живлення безпілотних повітряних суден (БПС). Окрім того, виділено ряд діагностичних завдань, вирішення яких забезпечує стабільну та ефективну роботу БПС. Розроблена методика проведення експерименту, та проведені експериментальні дослідження акумуляторної батареї для БПС із реальним навантаженням в умовах різних температур. На основі отриманих даних зроблені висновки про можливість оцінювання стану акумуляторної батареї в процесі її роботи. Також наведені рекомендації щодо розроблення методики контролю рівня заряду акумулятора на борту безпілотного літального апарата (БПЛА).*

**Ключові слова:** перезаряджуване автономне джерело струму, літій-полімерні акумулятори, розрядна характеристика, безпілотне повітряне судно, рівень заряду.

**Постановка проблеми.** Наразі використання безпілотного літального апарата (далі – БПЛА) набуває неймовірних масштабів. Вони з кожним днем стають дедалі більш затребуваними в усьому світі, про що свідчить зростання кількості БПЛА різних класів на авіаційних виставках світу. Така популярність цього класу літальних апаратів зумовлена низкою переваг перед пілотованою авіацією для вирішення широкого спектра завдань, головним з яких є відсутність екіпажу, відносно невелика вартість БПЛА, малі витрати на їх створення, виробництво й експлуатацію, великі тривалість і дальність польоту.

Живлення таких апаратів можливе за допомогою різних засобів – використання двигуна внутрішнього згоряння і, відповідно, палива, акумуляторних батарей, енергії сонця та інших засобів, які є на етапі розроблення. Серед перерахованих варіантів найбільш поширеним і виправданим наразі є використання перезаряджуваних автономних джерел електроенергії (далі – ПАДЕ). Розробники БПЛА віддають перевагу джерелам живлення на основі літію, а саме літій-полімерним акумуляторним батареям (далі – ЛПАБ), оскільки вони володіють досить високими питомими характеристиками.

Відсоток використання ПАДЕ значно збільшується з кожним роком. Усі сучасні пристрої, які належать до сфери високих технологій – при-

строї обчислювальної техніки, телекомунікацій, медичні портативні діагностичні та лікувально-профілактичні прилади, сучасні транспортні системи, – використовують ПАДЕ [1].

Одним з актуальних завдань за використання ПАДЕ на основі літію є завдання вимірювання/контролю рівня заряду/розряду цих джерел електроенергії. Для проведення діагностики акумуляторів і акумуляторних батарей сьогодні використовуються такі електричні характеристики, як напруга розімкнутого ланцюга і під навантаженням, внутрішній опір і реакція на специфічний тестовий сигнал, який дає змогу визначити значення складових повного опору. Ці характеристики отримують різними способами залежно від електрохімічної схеми ПАДЕ, і обробка результатів надалі відбувається також індивідуально [2; 3]. Якщо в сучасних обчислювальних пристроях, засобах комунікацій, медичних портативних приладах вирішення цього завдання не є проблематичним, то за використання ПАДЕ (а саме ЛПАБ) як джерела енергії БПЛА питання вимірювання/контролю розряду таких джерел нині є досить актуальним.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Поки що основна маса виробників БПЛА практикують так звані «польоти з фіксованим часом», тобто користувачу заздалегідь відомий час, протягом якого заряду акумулятора вистачає на якісне

виконання роботи, і під час планування вильоту враховують ці дані [4; 5]. Але для широкого використання та впровадження БПЛА незручно випробовувати батарею для того, щоб визначити тривалість польоту. Крім того, проблема виникає у випадках, коли погодні умови можуть різко змінитися – акумулятор в цьому випадку різко втрачає рівень заряду і БПЛА може не тільки не виконати поставлене завдання, але й зазнати краху. А це тягне за собою не тільки екологічні й економічні втрати, але і втрати важливої інформації в умовах використання БПЛА у військовий час. Інший бік цієї проблеми полягає в тому, що в разі надмірного розряду або постійного недорозряду акумулятор втрачає свої властивості та строк його служби значно скорочується [6].

Зважаючи на це, методи оперативної оцінки стану ПАДЕ ґрунтуються на характеристиках, отриманих опосередковано в результаті аналізу параметрів, які можна виміряти досить швидко. Значення вимірюваних параметрів дають змогу оцінити технічний стан і спрогнозувати значення резервної та номінальної ємності акумуляторної батареї.

Зрозуміло, що методи контролю та оцінки стану ПАДЕ повинні бути неруйнівними – без втрат енергії або за малої втрати. Найбільш бажана одномоментна діагностика протягом найкоротшого часу. Під час такої процедури в ПАДЕ в уніфікованому для цього стані можуть бути виміряні всі зазначені діагностичні параметри [7].

**Постановка завдання.** Для реалізації завдання оперативної діагностики акумуляторних батарей на борту БПЛА необхідно вирішити такі завдання:

– Експериментально підтвердити чи спростувати дані із зарядних-розрядних характеристик ПАДЕ, наведені у специфікаціях їхніх виробників.

– Експериментально визначити ступінь впливу найбільш вагомого (з точки зору хімічних процесів, що протікають у ЛПАБ) зовнішнього фак-

тора – температури на зміну даних розрядних характеристик.

– Оцінити можливість використання методу вимірювання напруги як опосередкованого параметра для контролю розряду ЛПАБ як найбільш простого в реалізації на борту БПЛА в потрібному контрольованому діапазоні.

**Виклад основного матеріалу.** На базі випробувальної лабораторії Державного підприємства «Орізон-Навігація», яке спеціалізується на розробленні та виготовленні бортового обладнання повітряних суден, було проведено експериментальні дослідження розрядних характеристик літій-полімерного акумулятора.

Коротко опишемо схему експерименту: до ЛПАБ підключали безколекторний електродвигун малої потужності, застосований на БПЛА класу «mini», який виконував роль корисного навантаження, та блоки управління. До блоків управління належать сервотестер і регулятор. Сервотестер дає змогу запускати двигун, генеруючи відповідний широтно-імпульсно модульований сигнал, і регулювати швидкість обертання двигуна, в такий спосіб імітуючи рівень навантаження на ЛПАБ. Регулятор приймає сигнал управляючої дії із сервотестера й безпосередньо змінює швидкість обертання двигуна.

Для оцінювання впливу різних температур на ЛПАБ схема експерименту розміщувалася в кліматичній камері. Від початку вмикання схеми експерименту відбувалася реєстрація значення напруги на клеммах ЛПАБ до моменту повної зупинки електродвигуна, тобто повного можливого розряду ЛПАБ за різних значень температури. Перед початком чергового циклу отримання даних розрядної характеристики за допомогою регулятора температури кліматичної камери встановлювалося потрібне значення температури, яке контролювалося за допомогою каліброваного термометра, встановленого в кліматичній камері. Період зчитування показань вихідної напруги на ЛПАБ – 1 хвилина. Фіксація даних розрядної

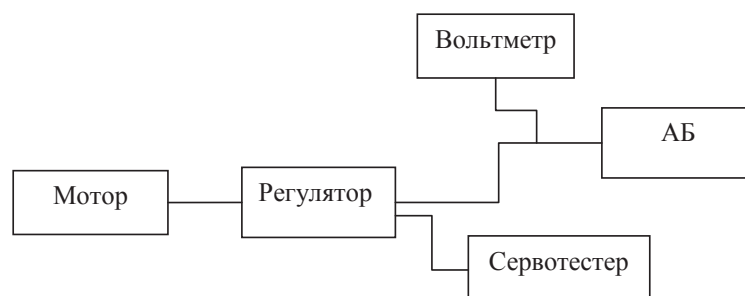


Рис. 1. Структурна схема макету для дослідження ЛПАБ

характеристики за кожної температури проводилася 10 разів для отримання масиву даних, придатних для оцінки. У такий спосіб було досліджено характер зміни напруги в разі розряду акумулятора в умовах температур, наближених до реальних умов під час польоту БПЛА.

**Методика проведення експерименту.**

Об'єктом випробувань була літій-полімерна акумуляторна батарея (Li-Po ПАДЕ) Zipru Compact ємністю 1500mAh.

Для забезпечення необхідного навантаження на ЛПАБ для коректного дослідження її поведінки під час проведення випробувань у ланцюгу макетної схеми (рис. 1) також використовуються:

- безколекторний мотор KINGKONG 2204-2300KV;
- регулятор для безколекторних двигунів HobbyKing 12A BlueSeries Speed Controller;
- сервотестер TL2638 CCPM.

Основною метою проведення випробувань ПАДЕ є аналіз впливу підвищеної (>45°C) та пониженої (<4°C) температури; аналіз вібрацій-

ного впливу різного рівня (із прискоренням 2g та на частотах 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz) на роботу ПАДЕ та її властивості зі збереження заряду.

Для реєстрації даних випробувань використовувалися:

- вольтметр В7-34А;
- осцилограф (Tektronix TDS2012С).

Температурні випробування макетної схеми з Li-Po ПАДЕ виконувалися в кліматичній камері (термокамері) МС-71 випробувальної лабораторії ДП «Орізон-Навігація». Вібраційні випробування виконувалися за допомогою вібростенду ST-80, який також розташований у цій лабораторії.

Для дослідження температурного впливу на роботу ЛПАБ контрольним параметром була обрана напруга, яка фіксувалася за допомогою вольтметра В7-34А. Початковою точкою температурних випробувань була нормальна температура +25°C.

Алгоритм дій під час виконання першого циклу температурних випробувань такий:

1. Вольтметр підключають у ланцюг між акумуляторною батареєю та регулятором.

Таблиця 1

**Результати фіксації вихідної напруги ЛПАБ за різних значень температури**

	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00
+50°C	12,49	11,32	11,06	10,81	10,77	10,65	10,41	9,38			
+49°C	12,46	11,33	11,06	10,81	10,75	10,63	10,33	9,38			
+48°C	12,52	11,32	11,11	10,93	10,80	10,68	10,48	9,41			
+47°C	12,50	11,32	11,09	10,89	10,77	10,65	10,31	9,41			
+46°C	12,49	11,29	11,07	10,88	10,76	10,63	10,21	9,41			
+45°C	12,50	11,26	11,05	10,88	10,75	10,60	10,14	9,43			
+40°C	12,50	11,15	11,01	10,80	10,70	10,55	10,00	9,38			
+35°C	12,50	11,08	10,91	10,76	10,64	10,44	9,42	9,42			
+30°C	12,50	11,01	10,88	10,74	10,61	10,39	9,43	9,40			
+25°C	12,50	10,95	10,82	10,70	10,57	10,36	9,41	9,40			
+20°C	12,48	10,88	10,77	10,68	10,57	10,37	9,42	9,40			
+15°C	12,50	10,87	10,65	10,58	10,38	10,11	9,40	9,37			
+10°C	12,49	10,86	10,59	10,48	10,29	9,94	9,39	9,37			
+5°C	12,50	10,60	10,50	10,39	10,21	9,82	9,38	9,36			
+4°C	12,49	10,67	10,53	10,36	10,21	10,01	9,46	9,40			
+3°C	12,50	10,66	10,54	10,40	10,24	10,06	9,53	9,35			
+2°C	12,48	10,63	10,51	10,42	10,28	10,07	9,60	9,34			
+1°C	12,49	10,71	10,53	10,44	10,25	10,06	9,56	9,35			
0°C	12,50	10,77	10,56	10,42	10,26	10,03	9,53	9,33			
-1°C	12,49	10,45	10,53	10,40	10,22	10,01	9,50	9,32			
-2°C	12,49	10,75	10,52	10,37	10,19	9,93	9,48	9,33			
-3°C	12,50	10,70	10,49	10,36	10,19	9,92	9,45	9,33			
-4°C	12,49	10,68	10,47	10,35	10,17	9,90	9,45	9,33			
-5°C	12,49	10,67	10,46	10,34	10,17	9,89	9,43	9,32	9,27		
-10°C	12,49	10,79	10,46	10,29	10,09	9,77	9,49	9,32	9,32		
-15°C	12,48	10,42	10,19	10,02	9,76	9,66	9,43	9,33	9,31	9,30	
-17°C	12,49	9,83	10,03	10,02	9,82	9,42	9,51	9,32	9,31	9,33	
-20°C	12,48	9,72	9,83	9,88	9,51	9,63	9,50	9,35	9,34	9,32	9,34

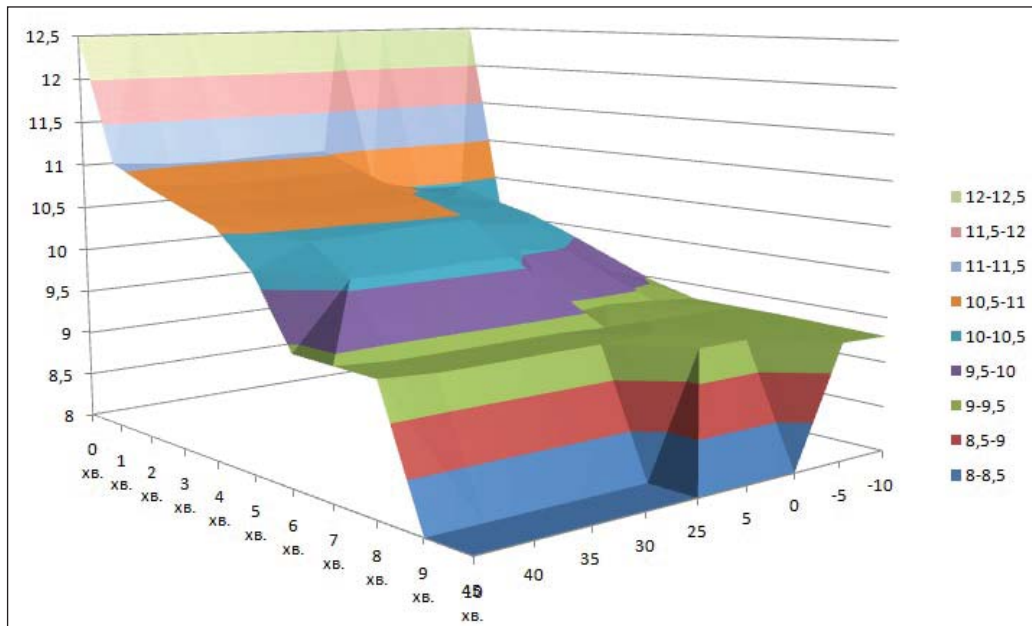


Рис. 2. Графічне зображення масиву розрядних характеристик ЛПАБ за різних значень температури

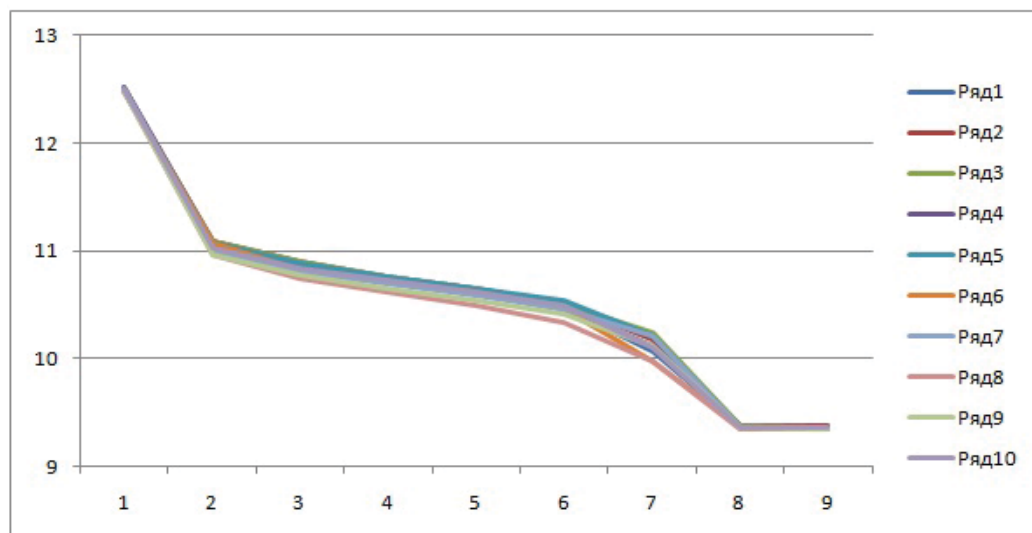


Рис. 3. Сімейство розрядних характеристик досліджуваної ЛПАБ за температури +25°C

Таблиця 2

Значення вихідної напруги ЛПАБ на досліджуваному проміжку часу за температури +25°C

	0 хв.	1 хв.	2 хв.	3 хв.	4 хв.	5 хв.	6 хв.	7 хв.	8 хв.
1	12,52	11,07	10,88	10,75	10,63	10,48	10,08	9,38	9,37
2	12,48	11,09	10,89	10,76	10,64	10,5	10,18	9,38	9,37
3	12,49	11,1	10,91	10,76	10,65	10,51	10,25	9,38	9,37
4	12,52	11,08	10,87	10,73	10,61	10,46	10,13	9,37	9,36
5	12,48	11,07	10,88	10,75	10,66	10,54	10,21	9,36	9,36
6	12,49	11,08	10,83	10,72	10,62	10,46	9,98	9,36	9,35
7	12,51	10,99	10,82	10,69	10,59	10,47	10,21	9,35	9,34
8	12,49	10,96	10,75	10,62	10,49	10,33	9,97	9,35	9,34
9	12,49	10,97	10,78	10,65	10,55	10,41	10,11	9,36	9,35
10	12,50	11,02	10,85	10,72	10,62	10,49	10,1	9,36	9,36

2. Встановлюють потрібну температуру в середині кліматичної камери.

3. Вмикають схему в роботу.

4. Реєструють показання вольтметра із заданим часовим кроком.

5. Після завершення першого циклу (падіння напруги в контрольованій точці, тобто розряджання акумулятора) ЛПАБ заряджають за допомогою спеціалізованого зарядного пристрою.

6. Після завершення заряду ЛПАБ алгоритм повторюють, починаючи з пункту 2.

Випробування виконували для значень температури від  $+30^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$  із кроком у  $5^{\circ}\text{C}$  та отримані дані фіксували у відповідних колонках табл. 1.

Далі випробування проводили в послідовності, зазначеній у пункті 1, за температури від  $+20^{\circ}\text{C}$  до  $-20^{\circ}\text{C}$  (у порядку спадання) із кроком у  $5^{\circ}\text{C}$  із фіксацією відповідних значень напруги.

Зазначена послідовність вимірювань проводилася по 10 разів у кожній точці температури, що дало змогу отримати сімейство розрядних характеристик літій-полімерного акумулятора під час навантаження й оцінити швидкість розряду Li-Po ПАДЕ за різних температур.

Наведена таблиця демонструє результати фіксації напруги в кожній точці часу протягом розряду акумулятора. Отримані результати дають можливість оцінювати швидкість розряду ЛПАБ за різних температур і надають поштовх для подальшого аналізу цих температурних впливів. Графічне зображення цих результатів наведено на рис. 2.

Для оцінювання правильності та прецизійності отриманих результатів (з точки зору метрологічного забезпечення) дослідження проводилося по 10 разів у кожній точці температури. Наведені

в табл. 2 результати відображають отриманий масив даних для температури  $+25^{\circ}\text{C}$ .

Графічне зображення отриманих результатів має вигляд, поданий на рис. 3.

**Висновки.** Результати виконаних експериментальних досліджень розряду Li-Po ПАДЕ дають змогу зробити ряд висновків. За результатами проведеного дослідження можна сказати, що з графіка на рис. 3 видно, що розрядна характеристика ПАДЕ має складний, нелінійний характер. Швидкість розряду ЛПАБ (складає приблизно  $4,2\text{ mV/s}$ ) на всьому контрольованому діапазоні дає можливість зробити позитивний висновок про можливість нескладної реалізації оцінювання розряду ПАДЕ за методом вимірювання напруги розряду. Суть методу може полягати в попередній оцінці розрядної характеристики ЛПАБ (з періодом у декілька місяців або більше, що буде залежати від інтенсивності використання БПЛА), занесенні цих даних у мікропроцесор БПЛА і подальшому порівнянні значень напруги в процесі роботи ЛПАБ на борту БПЛА із зафіксованими зразковими. За отриманими результатами можна зробити висновок про можливість продовження виконання завдання БПЛА або про необхідність його припинення та повернення «на базу».

Результати температурних випробувань (див. табл. 1) дають змогу стверджувати, що за короткочасної дії температур зовнішнього середовища, нижчих від  $-5^{\circ}\text{C}$ , не відбувається погіршення розрядних характеристик Li-Po ПАДЕ, крім того, після закінчення середнього часу розряду, отриманого за позитивних температур, за негативних температур розряд ПАДЕ не відбувається і вона продовжує віддавати заряд, тобто можна стверджувати що за низьких температур відбувається незначне збільшення часу розряду.

#### Список літератури:

1. Шелест М.Б., Гайда П.І. Основи будови та експлуатації акумуляторних батарей: навч. посібник. Суми, 2014. 210 с.
2. Смирнов О.П. Перспективы развития систем электропитания транспортных средств. Материалы доклада в техническом университете г. Варна (Болгария) на XIV научно-технической конференции с международным участием на тему: «Транспорт, экология – устойчивое развитие» (8–10 мая 2008 г, Варна). 2008. С. 295–301.
3. Solero L., Lidozzi A., Pomilio J. A. Design of multiple-input power converter for hybrid vehicles. IEEE Trans. Power Electron. Sep. 2005. Vol. 20. № 5. P. 1007–1016.
4. Дрон-почтальон Drone.UA и Новая Почта в галлерее инноваций HUB 4.0. URL: <http://drone.ua/delivery-drone/> (дата звернення: 15.05.2016).
5. Красномовец П. «Укрпочта» провела тестовую доставку посылки с помощью израильского дрона. AIN.ua. URL: <http://ain.ua/2016/06/01/652147/> (дата звернення: 01.06.2016).
6. Chen J.-J., Yang F.-C., Lai C.-C., Hwang Y.-S., Lee R.-G. A high efficiency multimode Li-ion battery charger with variable current source and controlling previous-stage supply voltage. IEEE Trans. Ind. Electron. Jul. 2009. Vol. 56. № 7. P. 2469–2478.

7. Lin C.-H., Hsieh C.-Y., Chen K.-H. A Li-ion battery charger with smooth control circuit and built-in resistance compensator for achieving stable and fast charging. IEEE Trans. Circuits Syst. I Reg. Papers. Feb. 2010. Vol. 57. № 2. P. 506–517.

8. Hwang Y.-S., Wang S.-C., Yang F.-C., Chen J.-J., Lee W.-T. New Li-ion battery charger based on charge-pump techniques. Proc. Int. Conf. Commun. Circuits Syst. Proceedings. Jun. 2006. Vol. 4. P. 2259–2262.

### **СПОСОБ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРЯДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИСТОЧНИКЕ ПИТАНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ**

*В статье приведены основные тенденции в области контроля состояния источников питания беспилотных воздушных судов (БПС). Кроме того, выделен ряд диагностических задач, решение которых обеспечивает стабильную и эффективную работу БПС. Разработана методика проведения эксперимента, и проведены экспериментальные исследования аккумуляторной батареи для БПС с реальной нагрузкой в условиях различных температур. На основе полученных данных сделаны выводы о возможности оценки состояния аккумуляторной батареи в процессе ее работы. Также приведены рекомендации по разработке методики контроля уровня заряда аккумулятора на борту беспилотного летательного аппарата (БПЛА).*

**Ключевые слова:** перезаряжаемый автономный источник тока, литий-полимерные аккумуляторы, разрядная характеристика, беспилотное воздушное судно, уровень заряда.

### **METHOD OF THE RESEARCH OF DISCHARGE PROCESSES IN POWER SUPPLIES OF UNMANNED AERIAL VEHICLES AND ANALYSIS OF RECEIVED RESULTS**

*The article presents the main trends in the control of the condition of power sources in unmanned aerial vehicles (UAV). In addition, a number of diagnostic tasks are identified, the solution of which ensures a stable and efficient operation of the UAV. The methodology of experimentation work was developed and experimental studies of a lithium-polymer battery with real load under conditions of different temperatures have been conducted. According to the results, were made conclusions about the possibility of assessing the battery's condition during its operation and the possibility of developing a technique for monitoring the battery charge level using in UAV.*

**Key words:** rechargeable autonomous current source, lithium-polymer batteries, discharge characteristic, unmanned aircraft, charge level.