

DOI: 10.31319/2519-2884.41.2022.14

УДК 621.3.049.77:62-838

М.С. Загребасв, інж. I категорії, mi hail19091997zagrebaev@gmail.com

М.С. Звонецький, аспірант, mzv2@ukr.net

С.В. Марченко, к.ф.-м.н., доцент, smarsv1979@gmail.com

О.М. С'янов, д.т.н, професор

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРНОГО ЗАРЯДНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ЛІТІЄВИХ АКУМУЛЯТОРІВ

У роботі представлено дослідження мікроконтролерного зарядного пристрою працюючого на основі CC-CV методу заряду літієвих акумуляторів. Метою даної роботи є експериментальне дослідження методів заряду літієвих акумуляторів портативної та великогабаритної техніки. В результаті було розроблено та підтверджено роботоспроможність схеми зарядного пристрою та алгоритму CC-CV для швидкого заряду літієвих акумуляторів. Використання методу CC-CV заряду дозволило збільшити вихідний струм заряду, а також зменшити необхідний час для відновлення енергетичних властивостей АКБ, при чому коливання струму зменшуються на 96 %, в порівнянні зі схемами які використовують методи лише постійної напруги.

Ключові слова: літієві акумуляторні батареї; MOSFET; швидкий заряд; широтно-імпульсна модуляція; мікроконтролерне керування.

The paper presents a study of a microcontroller charger operating on the basis of the CC-CV method of charging lithium batteries. The purpose of this work is an experimental study of methods of charging lithium batteries of portable and large-sized equipment. As a result, the functionality of the charger circuit and the CC-CV algorithm for fast charging of lithium batteries was developed and confirmed. The use of the CC-CV charge method made it possible to increase the output current of the charge, as well as reduce the time required to restore the energy properties of the battery, while current fluctuations are reduced by 96 %, compared to schemes that use only constant voltage methods.

Keywords: lithium batteries; MOSFET; fast charge; pulse width modulation; microcontroller control.

Постановка проблеми

У даний час серед джерел живлення різного роду техніки широкого поширення набули літієві акумуляторні батареї (АКБ). Літієві АКБ на сучасному етапі [1] розвитку застосовуються як в великогабаритній техніці (авіатехніка, вантажівки, автомобілі та ін.) так і в портативних приладах (безпілотні літальні апарати, мобільні телефони, іграшки) [2]. Відмінною особливістю літієвих акумуляторів є, велика ємність електроенергії, що зберігається при малих масогабаритних показниках [2], з такими перевагами як малий ступінь саморозряду (становить 4—5 % за перший місяць використання) [3]. Втрати ємності під час використання літієвих АКБ в три рази менші [3], ніж у нікель-кадмієвих акумуляторів, як при 20 °С, так і при 40 °С [3]. Ресурс сучасних літієвих АКБ складає 500—1000 циклів заряду-розряду [4], що іноді недостатньо за умови довгострокового (більше 8 годин за добу) використання, і призводить до швидкого розрядження АКБ [3] та зменшення циклів роботи в 2—3 рази. Літієві батареї мають стабільні показники роботи як при високих, так і при низьких температурах. Деякі з них можна заряджати струмом який дорівнює ємності АКБ (мА) при температурах від 0 до 45 °С. Більшість же літієвих батарей при низьких температурах — від 5 °С і нижче — краще заряджати малим струмом. При цьому слід уникати заряду при температурі замерзання, тоді на аноді відбувається осадження металевого літію [5]. Зберегти кількість циклів заряду-розряду літієвих АКБ можливо з використанням такого методу заряду, який би забезпечив найбільшу швидкість його заряду, збільшення кількості циклів заряду, та стабільність струму і напруги заряду які визначають ступінь зносу АКБ або її термін експлуатації [4].

При наявності вищезазначених переваг літєві акумулятори мають специфічний режим заряду [2], який полягає в точному дотриманні режимів заряджання постійним струмом (CC) та постійною напругою (CV), тобто CC-CV метод [3], і буде забезпечувати як швидкий заряд АКБ так і збереження властивостей носія енергії таких як, високий вихідний струм, щільність енергії, стабільність вихідних показників. Дотримання такого режиму заряджання, потребує подальшого дослідження зарядного пристрою, який забезпечує дотримання вищевказаних специфік для заряду літєвих акумуляторів.

Формулювання мети дослідження

Зарядні пристрої літєвих батарей працюють за принципом обмеження напруги заряду. Серед особливостей такого заряду виділяють такі параметри [4] як, збільшена в 3—4 рази напруга елемента літєвої батареї, менші допустимі відхилення напруги заряду (лінійність вольт-амперної характеристики) і відсутність необхідності компенсаційного заряду (струменевої підзарядки) після досягнення батареєю стану повного заряду. Розглянемо специфіку заряду на прикладі портативних літєвих акумуляторів з вихідною напругою 4,2 В, специфіка заряду яких (і з більшою вихідною напругою) полягає у використанні CC-CV методу, який представлено на рис. 1 [2].

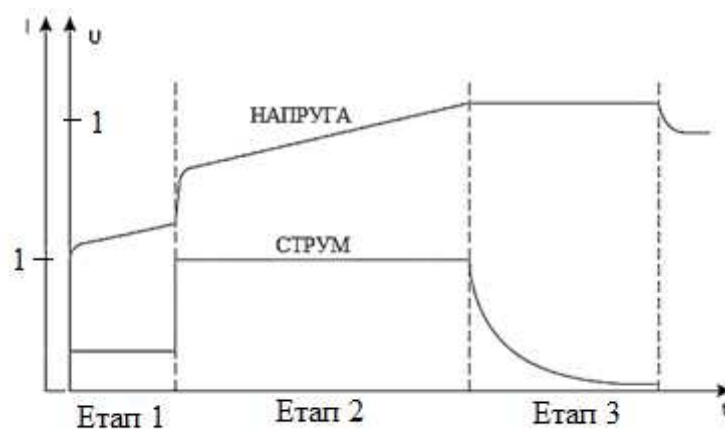


Рис. 1. Цикл заряду літєвих АКБ

Процес заряду розглядаємих портативних АКБ складається з трьох етапів [4]. Перший етап (рис. 1) — це коли акумулятор повністю розряджений (крапельна зарядка), величина напруги становить менше 2,7 В [3]. При цьому вхідна напруга заряду має перевищувати поточне значення на 60 мВ. Другий етап, заряджання постійним струмом (рис. 1), якщо напруга на акумуляторі вище 2,7 В [5]. І третій етап (рис. 1), це дозарядка постійною напругою, яка становить 4,2 В, а струм поступово падає до нуля. При цьому в процесі заряджання контролюється величина струму та напруги. Якщо в процесі роботи споживача енергії, напруга на акумуляторі впаде до 4,1 В, вмикається режим заряду постійним струмом, тобто — максимально можливим [5].

В процесі дослідження було проведено заряд літєвої АКБ з максимальною вихідною напругою до 4,2 В, і можливістю швидкого заряду напругою до 15В при струмі — 3,0 А [6]. На рис. 2 представлені залежності струму і напруги заряду літєвого АКБ в залежності від часу, з використанням блоку живлення в режимі CC-CV. З графіків (рис. 2) видно, що використання такого способу заряду є неефективним для літєвих АКБ, адже струм в процесі заряду має коливання значень в діапазоні 0,5 В, що негативно впливає на подальшу роботу АКБ.

На основі вищевикладеного матеріалу, метою даної роботи є дослідження зарядного пристрою для літєвих накопичувачів енергії портативних пристроїв, з вихідною напругою від 3 до 12 В, із забезпеченням мінімального коливання струму заряду АКБ, в режимі CC-CV.

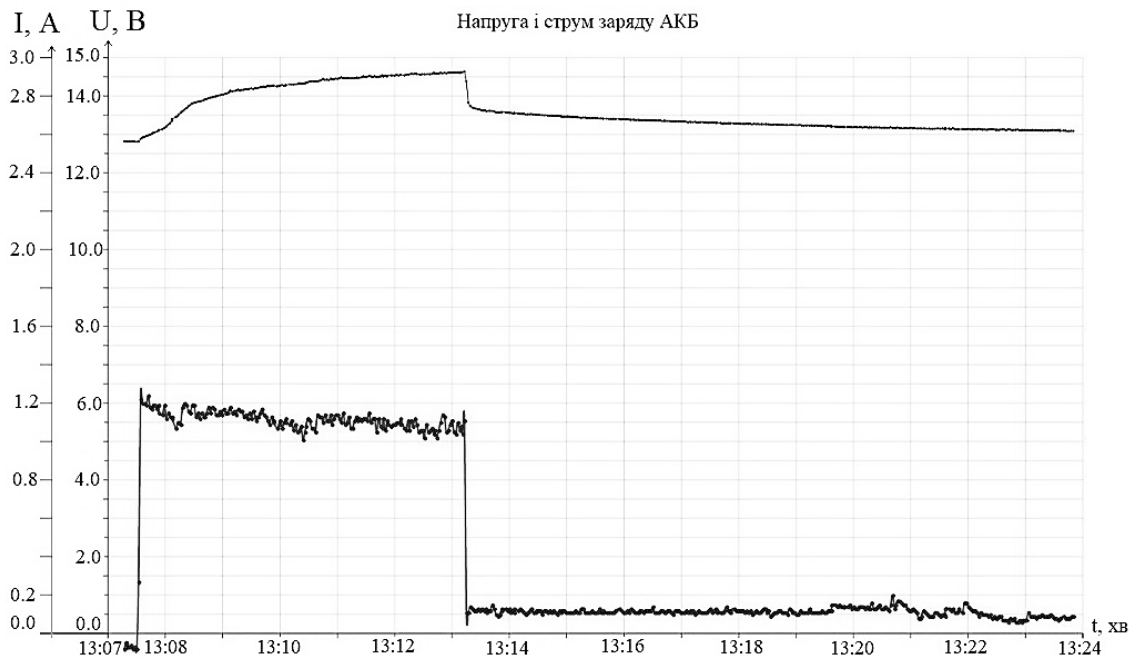


Рис. 2. Характеристики напруги і струму АКБ в залежності від часу заряду, в прискореному режимі

Виклад основного матеріалу

Представлений на рис. 3 алгоритм складено на основі циклу заряду літєвих АКБ (рис. 1), і реалізує заряд акумуляторів в режимі «постійний струм — постійна напруга» (CC-CV), до якого додано режим «мінімальний струм» (TC — Tiny Current), який використовує малий струм, щоб запустити акумулятор і відновити його роботу спроможність, якщо він був повністю розряджений.

На початку роботи алгоритму роботи зарядного пристрою в блоці 1 (рис. 3) визначається температура, яка повинна відповідати обхідному температурному режиму і якщо вона придатна, тоді визначається напруга на вихідних клеммах АКБ. Якщо температура непридатна, ЗП переходить в режим очікування (блок 2). Далі йде блок 3 — порівняння поточної напруги ($U_{\text{бат}}$) з даними щодо нижньої граничної напруги ($U_{\text{гр}}$) в пам'яті мікроконтролера (МК), значення якої повинне бути нижче поточної для початку швидкого заряду постійним струмом. Але якщо $U_{\text{бат}}$ буде дорівнювати $U_{\text{гр}}$ (блок 5), буде задіяний режим TC (блок 6). При досягненні напруги $U_{\text{бат}}$ вище $U_{\text{гр}}$, включається режим CC (блок 7), тобто заряд постійним струмом.

Режим CC вимагає підтримання постійного зарядного струму в межах $0,8 C — 1 C$, де C — номінальна ємність, яка визначається за формулою і є добутком величини постійного струму розряду акумулятора на час розряду:

$$C [A * год.] = I [A] \times T [год.]$$

При значенні напруги АКБ $80—85\%$ від номінальної, ЗП переходить в режим заряду CV (блок 10). В такому стані необхідно підтримувати постійну вхідну напругу, так щоб струм ЗП зменшувався. Коли мінімальний струм заряду стане меншим $0,03 C$, тобто 3% від максимального струму розряду, ЗП припиняє свою роботу та виводить інформацію про завершення заряду, час, показники ємності і напруги (блоки 11 та 12).

Для імітаційного моделювання роботи зарядного пристрою та налагодження програми МК, було складено електричну принципову схему в середовищі ISIS Proteus (рис. 4). Для перевірки даної схеми до моделі включено МК STM32F103, за допомогою якого проводиться формування ШІМ сигналу, частота якого дорівнює 62 кГц [6]. Далі вимірюється струм на виході, з заданням скважності ШІМ сигналу в межах 50% . За показниками на виході операційного підсилювача (рис. 4, U3B) в режимі вимірювання струму, можна визначити струм в колі АКБ амперметра.

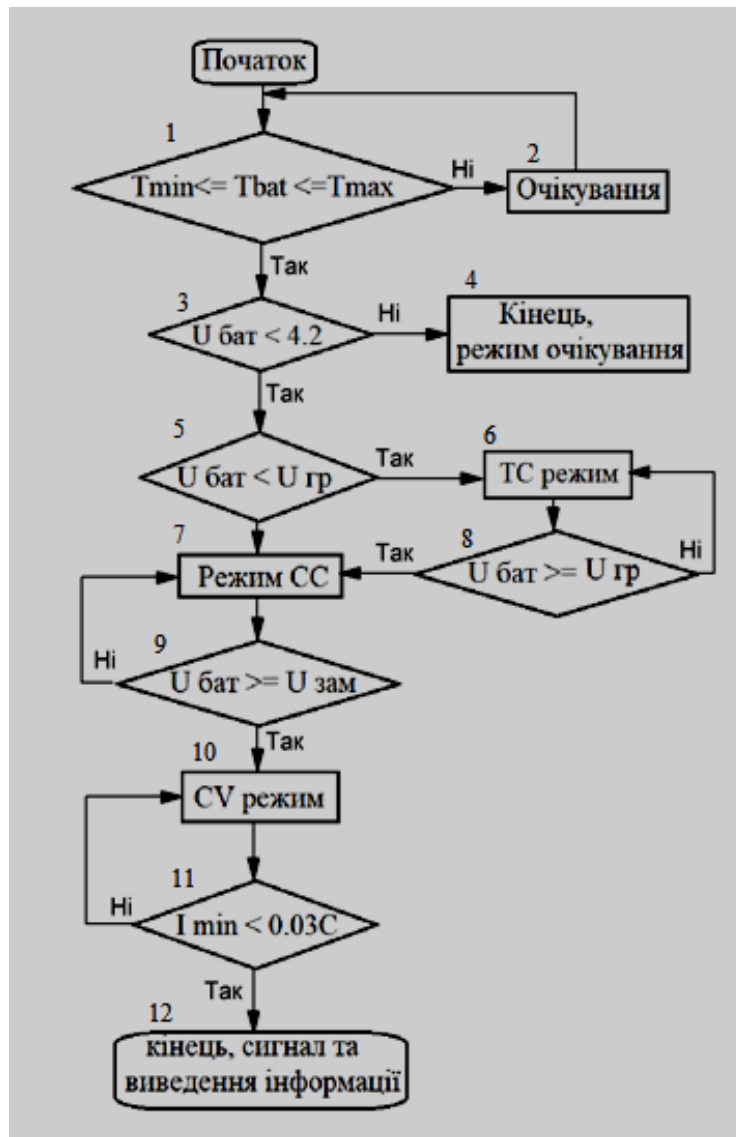


Рис. 3. Алгоритм роботи зарядного пристрою в режимі СС-CV

В даному дослідженні для вимірювання напруги заряду використовується перетворювач напруги (рис. 4, U3C) з використанням операційних підсилювачів (ОП), для отримання достатньо широкого діапазону значень для АЦП МК від нуля до VCC (від 0 В до 3.3 В), щоб використовувати всі розряди внутрішнього АЦП. Моделювання роботи дільника напруги проводиться в режимі реального часу з використанням вбудованих інструментів середовища, і знімаються показники вхідної і вихідної напруги схеми, щоб прослідкувати їх залежність одну від одної.

За результатами моделювання розробленої схеми та алгоритму можна зробити висновок, що дана схема забезпечує виконання необхідних режимів роботи досліджуваного зарядного пристрою і придатна для подальшої реалізації. Керуючим елементом ЗП обрано 32 бітний МК серії STM32F103C8, розташований на платформі BluePill — плата розробки для мікроконтролера ARM Cortex M3. Стабільний режим роботи МК забезпечується двома кристалічними осциляторами 8 МГц та 32768 Гц, і використовуючи вбудований помножувач частоти МК забезпечує підтримку робочої частоти яка дорівнює 72 МГц.

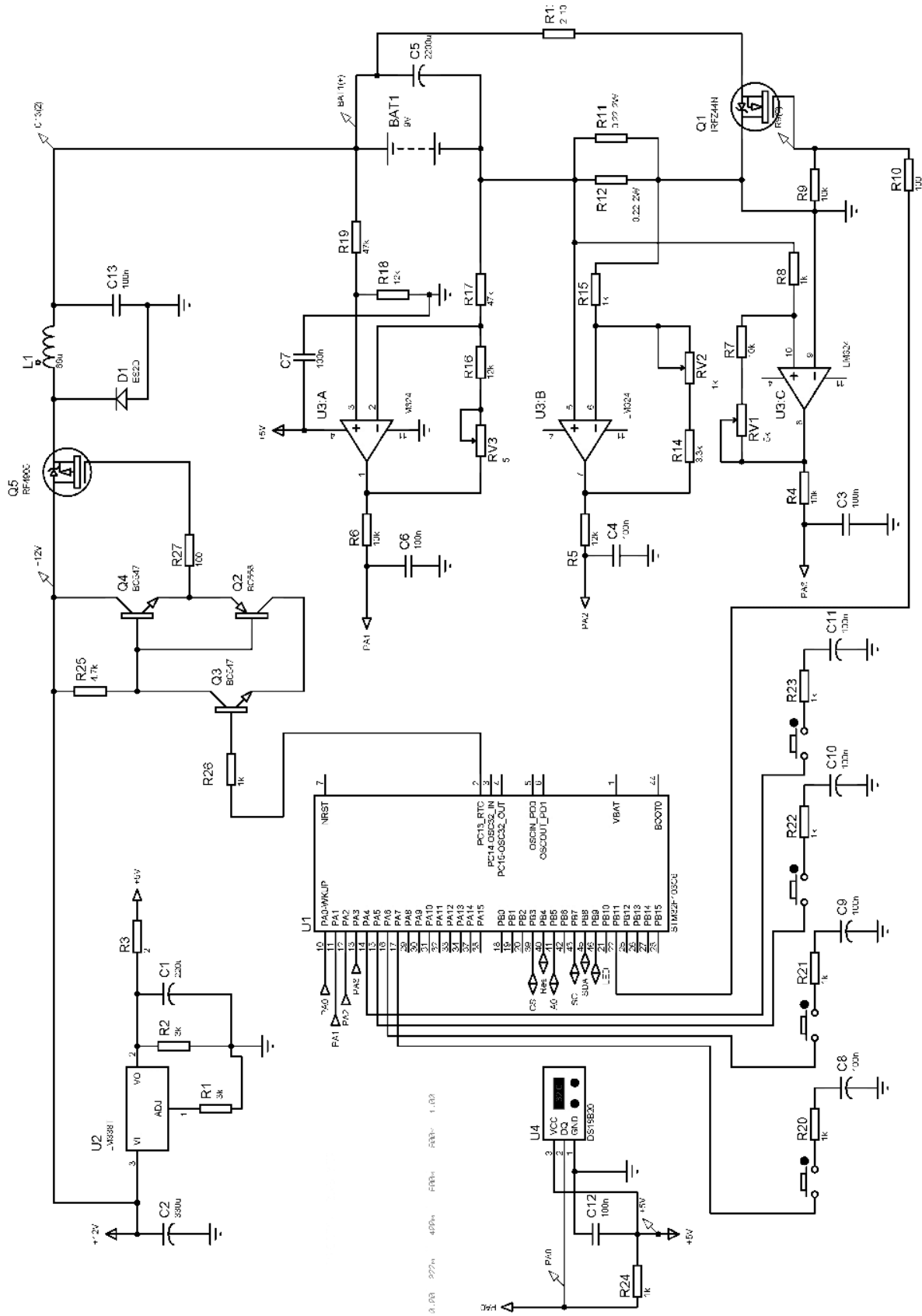


Рис. 4. Модель системи керування ЗП літєвих АКБ в середовищі ISIS Proteus

Для керування процесом заряду схеми зарядного пристрою було обрано МОП (MOSFET) транзистор IRF4905, який є р-канальним і призначений для роботи в регуляторах потужності. Основні параметри і характеристики IRF4905: максимальна розсіювана потужність (P_d) — 150 Вт; гранично допустима напруга стік-виток (U_{c-v}) — 55 В; максимальна затвор-виток (U_{z-v}) складає 10 В; максимально допустимий струм виток (I_v) — 64 А; максимальна температура каналу сягає 150 °С [9].

На рис. 5 приведена загальна електрична принципова схема досліджуваного пристрою заряду літєвих АКБ, складена на основі аналізу алгоритмів роботи ЗП та програми МК, які реалізують процес заряду за принципом швидкого CC-CV заряду, тобто спочатку постійним струмом, з підвищенням напруги, а потім постійною напругою зі зменшенням струму заряду до мінімального.

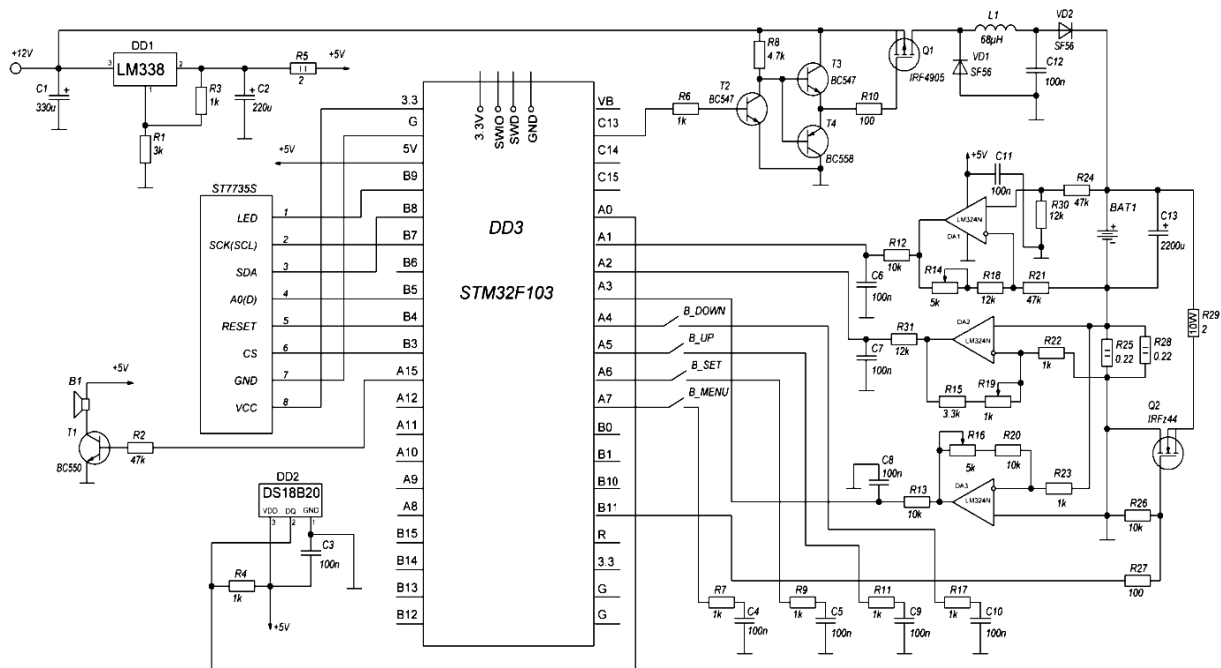


Рис. 5. Загальна принципова схема ЗП літєвих АКБ

Дана схема (рис. 5) складається з модулів керування зарядом (МК STM32F103) [11], керування напругою (транзистор IRF4905) [12], керування струмом (транзистор IRFz44), кола контролю низької напруги та струму заряду (ОП LM324 - DA1), кола контролю високого струму заряду (ОП LM324 - DA2) та розряду (ОП LM324 - DA3).

Практична реалізація пристрою заряду перезаряджуваних літєвих АКБ виконана у вигляді макету прототипу пристрою. На рис. 6 приведено характеристики струму та напруги в процесі заряду літєвого АКБ типу Samsung INR18650 [10], які підтверджують правильність обраного алгоритму роботи зарядного пристрою літєвих акумуляторів, на основі експериментально отриманих вихідних характеристик $U(t)$ та $I(t)$.

Висновки

У ході експериментального дослідження було підтверджено роботоспроможність розробленої схеми та алгоритму роботи зарядного пристрою літєвих акумуляторів. Вихідний струм, для використовуваного АКБ (Samsung INR18650), в режимі швидкого заряду складає 1,2 А і лінійно спадає до 1,1 А, при чому коливання струму зменшуються на 96 %, в порівнянні з струмом на рис. 2 даного дослідження.

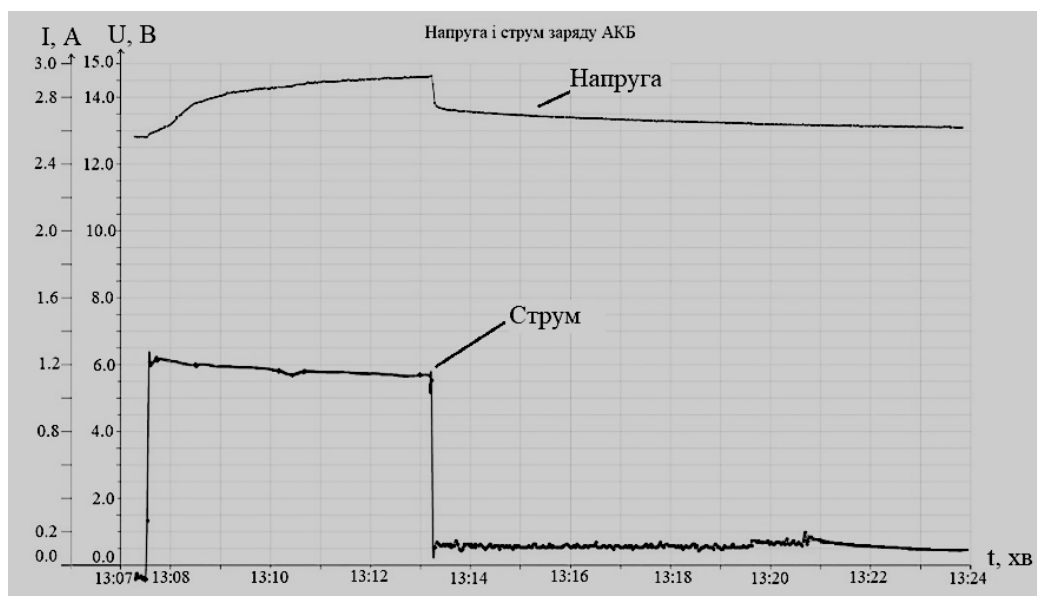


Рис. 6. Експериментальні характеристики $U(t)$ і $I(t)$

Список використаної літератури

1. Кошель М. Д Теоретичні основи електрохімічної енергетики: підруч. МОН України. Дніпропетровськ : УДХТУ, 2002. 430 с.
2. Pinson M. B., Bazant M. Z. Theory of SEI formation in rechargeable batteries: capacity fade, accelerated aging and lifetime prediction *Journal of the Electrochemical Society*. 2013. №.2. С. A243-A250.
3. Борисевич А. В. Моделирование литий-ионных аккумуляторов для систем управления батареями: обзор текущего состояния. *Современная техника и технологии*. 2014. №. 5. URL:<https://technology.snauka.ru/2014/05/3542>
4. Guo R. et al. Mechanism of the entire overdischarge process and overdischarge induced internal short circuit in lithium-ion batteries. *Scientific Reports*. 2016. Т. 6. URL:<https://www.nature.com/articles/srep30248>
5. Волківський В.Б. «Напівпровідникові перетворювачі з підвищеною ефективністю заряду акумуляторів імпульсними асиметричними струмами»: дис. ...канд. тех. наук: 05.09.12. Київ, 2007.163 с.
6. Таганова А. А., Бубнов Ю. И., Орлов С.Б. Герметичные химические источники тока: Элементы и аккумуляторы. Оборудование для испытаний и эксплуатации: Справочник. СПб.:ХИМИЗДАТ, 2005. 264 с.
7. Перетворювальна техніка: підручник. / Ю. П. Гончаров та ін. Харків: Фоліо, 2000. 360 с.
8. Снегірев В., А. Волківський В. Б. Дослідження впливу заряду асиметричним струмом на ємність акумуляторних батарей. *Електронна та Акустична Інженерія*. 2018. С. 51–55.
9. Infineon-IRF4905-DataSheet-v01_01-EN. URL:<https://www.infineon.com/dgdl/irf4905pbf.pdf?fileId=5546d462533600a4015355e329b1197e>.
10. Samsung INR18650, datasheet. URL: <http://dalincom.com/datasheet/SAMSUNG%20INR18650-25R.pdf>.
11. Вальпа О. Сучасне середовище розробки mikroC для програмування мікроконтролерів на мові високого рівня Сі. *Сучасна електроніка*. 2010. № 6. URL: https://diod.ucoz.ru/load/knigi_i_zhurnaly/zhurnaly/radioamator_6_ijun_2010/5-1-0-311.
12. Транзистори, частина друга (початок). URL:<https://radiodetali.com.ua/ua/articles/shodinkavosyuma-tranzistori-chastina-druga>.

RESEARCH OF A MICROCONTROLLER CHARGER FOR LITHIUM BATTERIES Zagrebayev M., Zvonetskiy M., Marchenko S., Syanov O.

Abstract

Lithium battery chargers work on the principle of limiting the charge voltage. Among the features of such a charge, the following parameters are distinguished, such as a 3—4 times increase in the voltage of the lithium battery cell, smaller allowable deviations of the charge voltage (linearity of the current-voltage characteristic) and the absence of the need for a compensatory charge (jet recharging) after the battery reaches a state of full charge. Let's consider the specifics of the charge on the example of portable lithium batteries with an output voltage of 4.2 V, the specifics of the charge of which (and with a higher output voltage) consists in the use of the CC-CV method.

To simulate the operation of the charger and debug the MK program, an electrical schematic diagram was compiled in the ISIS Proteus environment. To test this circuit, the model includes an STM32F103 MC, which is used to generate a PWM signal whose frequency is 62 kHz. Next, the output current is measured, with a setting of the PWM signal strength within 50 %. According to the indicators at the output of the operational amplifier in the current measurement mode, it is possible to determine the current in the ammeter battery circuit.

Based on the simulation results of the developed scheme and algorithm, it can be concluded that this scheme ensures the fulfillment of the necessary modes of operation of the investigated charging device and is suitable for further implementation. A 32-bit MC of the STM32F103C8 series, located on the BluePill platform — a development board for the ARM Cortex M3 microcontroller, was selected as the control element of the control unit. The stable operating mode of the MK is ensured by two crystal oscillators of 8 MHz and 32768 Hz, and using the built-in frequency multiplier, the MK provides support for the operating frequency equal to 72 MHz.

As a result, the functionality of the charger circuit and the SS-CV algorithm for fast charging of lithium batteries was developed and confirmed. The use of the CC-CV charge method made it possible to increase the output current of the charge, as well as reduce the time required to restore the energy properties of the battery, while current fluctuations are reduced by 96 %, compared to schemes that use only constant voltage methods.

References

- [1] Koshel M. D. (2002) *Teoretychni osnovy elektrokhimichnoi enerhetyky [Theoretical foundations of electrochemical energy]*. Dnipropetrovsk : UDKhTU [in Ukrainian].
- [2] Pinson M. B., Bazant M. Z. *Theory of SEI formation in rechargeable batteries: capacity fade, accelerated aging and lifetime prediction* //Journal of the Electrochemical Society. 2013. T. 160. №. 2. S. A243-A250. [in English].
- [3] A. V. Borysevych (2014) *Modelyrovani lytyi-ionnikh akkumulyatorov dlia system upravleniia batareiamy: obzor tekushcheho sostoiianiia [Modeling of lithium-ion batteries for the battery management system: an overview of the current state]* //Sovremennaia tekhnika y tekhnolohiy – Modern technique and technology, 5 [in Russian].
- [4] Guo R. et al. (2016) *Mechanism of the entire overdischarge process and overdischarge-induced internal short circuit in lithium-ion batteries* //Scientific Reports. T.6. [in English].
- [5] Volkivskiy V.B. (2007) *Napivprovidnykovi peretvoriuvachi z pidvyshchenoiu efektyvnistiu zariadu akumulyatoriv impulsnyimi asymetrychnymi strumamy [Semiconductor converters with increased efficiency of charging batteries with pulsed asymmetric currents]* Candidate's thesis, Kyiv: KPI [in Ukrainian].
- [6] Tahanova A. A., Bubnov Yu. Y., & Orlov S.B. (2005) *Hermetychnie khymycheskye ystochnyky toka: Elementy y akkumulyatorach. Oborudovanye dlia ispytanyi i ekspluatatsyy [Sealed chemical current sources: Elements and accumulators. Equipment for testing and operation]*. SPb.:KhYMYZDAT [in Russian].
- [7] Honcharov Yu. P., Budonnyi O. V., Morozov V. H., Panasenکو M. V., Romashko V. Ya., & Rudenko V. S. (2000) *Peretvoriuvalna tekhnika [Transforming technique]*. Kharkiv: Folio [in Ukrainian].

- [8] Snegirev V.A., & Volkivskiy V.B. (2018) Doslidzhennia vplyvu zariadu asymetrychnym strumom na yemnist akumulatornykh batarei [Study of the effect of charging with an asymmetric current on the battery capacity] *Elektronna ta Akustychna Inzheneriia – Electronic and Acoustic Engineering*, 1, 51–55 [in Ukrainian].
- [9] Infineon-IRF4905-DataSheet-v01_01-EN. (n.d.). *www.infineon.com*. Retrieved from <https://www.infineon.com/dgdl/irf4905pbf.pdf?fileId=5546d462533600a4015355e329b1197e>. [in English].
- [10] Samsung INR18650, datasheet. (n.d.). *dalincom.com*. Retrieved from <http://dalincom.com/datasheet/SAMSUNG%20INR18650-25R.pdf> [in English].
- [11] Valpa O. (2010) Suchasne seredovyshche rozrobky mikroC dlia prohrumuvannia mikrokontroleriv na movi vysokoho rivnia C [A modern development environment microC for microcontrollers for programming microcontrollers in the high-level C language]. *Suchasna elektronika Modern electronics*, 6, 34–42, Retrieved from https://diod.ucoz.ru/load/knigi_i_zhurnaly/zhurnaly/radioamator_6_ijun_2010/5-1-0-311. [in Ukrainian].
- [12] Tranzystory, chastyna druga (pochatok) [Transistors, part two (beginning)]. (n.d.). *radiodeta-li.com.ua*. Retrieved from <https://radiodeta-li.com.ua/ua/articles/shodinka-vosyma-tranzistori-chastina-druga> [in Ukrainian].