

что достигается за счет учета потерь мощности в стали двигателя и дополнительных потерь мощности $\Delta P_{e,d}^*$, затрачиваемых на передачу указанных потерь в стали через статорную обмотку двигателя.

Список литературы

1. Лисиенко В.Г. Хрестоматия энергосбережения: Справочное издание: 2-х книгах / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелочков, М.Г. Ладычев. – М.: Теплотехник, 2005. – кн.1. – 688с.; кн.2 – 768с.
2. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков. Под ред. И.Я. Браславского. – М.: изд.центр. «Академия», 2004. – 256с.
3. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными электродвигателями / А.А. Булгаков. – М.: Наука, 1966. – 298с.
4. Пивняк Г.Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Г.Г. Пивняк, А.В. Волков. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2006. – 470с.
5. Поляков В.Н. Экстремальное управление электрическими двигателями / В.Н. Поляков, Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. – 420с.
6. Сандлер А.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов. – М.: Энергия, 1974. – 328с.
7. Шрейнер Р.Т. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами / Р.Т. Шрейнер, Ю.А. Дмитренко. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 224с.
8. Петров Ю.П. Оптимальное управление электроприводом / Ю.П. Петров. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 187с.
9. Петров Ю.П. Оптимальное управление электроприводом с учетом ограничений по нагреву / Ю.П. Петров. – Л.: Энергия, 1971. – 144с.
10. Волков А.В. Энергосберегающее управление скоростью частотно-регулируемого асинхронного двигателя в пускотормозных режимах / А.В. Волков, А.А. Колесников // Электротехника. – 2013. – №5. – С.2–9.
11. Волков В.А. Расчет оптимальных тахограмм разгона и торможения частотнорегулируемого асинхронного двигателя / В.А. Волков // Электротехника та електроенергетика. – 2015. – №2. – С.55 – 64.
12. Волков В.А. Исследование квазиоптимального управления скоростью частотнорегулируемого асинхронного двигателя в пуско-тормозных режимах / В.А. Волков // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2017. – №3. – С.23 – 37.
13. Радин В.И. Электрические машины: асинхронные машины / В.И. Радин, Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович: Под ред. И.П. Копылова. – М.: Высш.шк., 1988. – 328с.
14. Дымососы и вентиляторы: каталог-справочник. – М.:НИИ Информтяжмаш, 1974. – 184с.
15. Андреева Е.А. Вариационное исчисление и методы оптимизации / Е.А. Андреева, В.М. Цирулева. – М.: Высш.шк., 2006. – 584с.
16. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1984. – 831 с.
17. Кальницкий Л.А. Специальный курс высшей математики / Л.А. Кальницкий, Д.А. Добротин, В.Ф. Жевержеев. – М.: Высш.шк., 1978. – 389с.
18. Чиликин М.Г. Теория автоматизированного электропривода. Учеб. пособие для вузов / М.Г. Чиликин, В.Н. Ключев, А.С. Сандлер. – М.: Энергия, 1973. – 616с.
19. Вентиляторный завод «УКРВЕНТСИСТЕМИ», Украина, 61044, г. Харьков, пр. Московский, 257 <http://ukrvent.com/vm17-html/> (10.01.2018)
20. Вентиляторный завод «УКРВЕНТСИСТЕМИ», Украина, 61044, г. Харьков, пр. Московский, 257 <http://ukrvent.com/dymdod31-5-html/> (10.01.2018)

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, доц. Тиховодом С.М.

УДК 622.625.28

О.В. Єліна, канд. фіз.-мат. наук, М.М. Мілих, Є.М. Сніжко, канд.-ти техн. наук
(Україна, Дніпро, Дніпровський національний університет ім.Олесь Гончара)

Ю.Б.Починок

(Україна, Дніпро, ТОВ НВП „МонТекс”)

МОНІТОРИНГ БАТАРЕЙ ВИСОКОЇ НАПРУГИ LI-ION АКУМУЛЯТОРІВ

Анотація. Розглянуто систему моніторингу батарей Li-Ion акумуляторів з використанням мереж MicroLan з інтерфейсом I-Wire, який об'єднує та дозволяє підключити до обладнання керування модулі вимірювання напруги, струму, температури та здійснювати пасивне балансування кожного окремого акумулятора батарей. Модулі захищені від високої напруги батареї гальванічною розв'язкою.

Ключові слова: Li-Ion акумулятор, система моніторингу, пасивна система балансування, вимірювання напруги, струму, температури батарей, гальванічна розв'язка, інтерфейс I-Wire.

Аннотація. Рассмотрена система мониторинга батарей Li-Ion аккумуляторов с использованием сети MicroLan с интерфейсом 1-Wire, который объединяет и обеспечивает подключение к оборудованию управления модулей измерения напряжения, тока, температуры и пассивной балансировки каждого отдельного аккумулятора батареи. Модули защищены от высокого напряжения батареи гальванической развязкой.

Ключевые слова: Li-Ion аккумулятор, система мониторинга, пассивная система балансировки, измерение напряжения, тока, температуры батарей, гальваническая развязка, интерфейс 1-Wire.

Abstract. The paper considers the system of monitoring of Li-Ion batteries using the MicroLan network with the 1-Wire interface, which combines and provides connection to the control equipment of modules for measuring the voltage, current, temperature and passive balancing of each separate battery. Modules are protected from high voltage battery is electrically isolated.

Keywords: Li-Ion battery, system of monitoring, passive balancing of each separate battery, measuring the voltage, current, temperature, galvanic isolation, 1-Wire interface.

Актуальність роботи. Батареї високої напруги на базі Li-Ion акумуляторів широко застосовуються в електротранспорті, пристроях безперебійного електроживлення. Використання таких батарей у гірничо-видобувній промисловості для електрифікації гірничних робіт підвищить їх ефективність завдяки великій енергетичній щільності, пікової потужності та великій кількості перезарядів (понад 3000) у порівнянні з іншими типами батарей.

Сьогодні для таких батарей та окремого використання виготовляються літій-іонні акумулятори (Li-Ion, в яких застосовано гелевий електроліт), літій-полімерні акумулятори (Li-Pol, в яких застосовано щільний полімер, насичений розчином літію [1]). Найбільш перспективними є літій-залізо-фосфатні акумулятори, в яких використовуються катоди на основі фосфатів LiFePO₄. Фосфати металів підгрупи заліза – представники нової групи електродних матеріалів літій-іонних джерел струму, в яких застосовується перезарядження, серед таких матеріалів найбільш перспективний LiFePO₄. Літій-залізо-фосфатні акумулятори мають більш високу питому ємність, потенціал заряду/розряду, термічну стійкість, постійну напругу розряду, практично, до повного розряду [2].

Використання накопичувачів енергії на основі літій-іонних акумуляторів усіх типів передбачає вирішення специфічних задач керування, які пов'язані з реалізацією спеціальних алгоритмів заряду та розряду для паралельно-последовних схем включення окремих елементів батарей з урахуванням того, що відбувається зміна в часі параметрів окремих елементів. Для вирішення цих задач необхідно проводити постійний контроль коефіцієнту зміни внутрішнього опору, величини напруги на кожному елементі батареї, температури елементів та за необхідності забезпечувати включення / відключення окремих елементів, щоб запобігати надзаряду, або надрозряду кожного акумулятора батареї [3].

Для забезпечення надійної, сталої та прогнозованої роботи накопичувачів енергії на базі літій-іонних акумуляторів потрібна автоматизована система моніторингу (Battery Monitoring System – BMS) і керування зарядженням / розрядженням, яка буде здійснювати накопичення інформації стосовно основних параметрів акумуляторів, що надасть можливість прогнозувати роботу батареї, дозволяє правильно планувати режими роботи та цикли заряду, а це підвищить терміни її експлуатації. Для експлуатації літій-іонних батарей необхідно застосовувати системи балансування, які зводять розбаланс напруги між окремими елементами батареї до мінімуму. Взагалі системи балансування можна поділити на пасивні та активні [4]. Пасивна система балансування буде зменшувати струм заряду того акумулятора батареї, напруга на якому зростає швидше. Активна система балансування перерозподіляє енергію в акумуляторній батареї і може працювати як при заряді, так і при розряді батареї. В цій роботі розглянуто побудову системи моніторингу з пасивним балансуванням.

Функції системи балансування. Процес зарядження батарей елементів літій-іонних акумуляторів розділяється на два основних етапи [3]. На першому етапі зарядження здійснюється постійним струмом при лінійно наростаючій напрузі на елементі до того, як напруга на елементі досягне рівня 4,1 – 4,2 В (3,2 В для LiFePO₄). На другому етапі зарядження здійснюється при постійній напрузі. Перший етап може тривати 40 хвилин або менше залежно від типу акумулятора, другий триває більш довгий період.

Струм зарядження акумуляторної батареї визначається величиною ємності C елементів, з яких вона складається, та дорівнює цій величині, наведеній в амперах. Струм заряду може змінюватись від $0.5C$ А до $2C$ А. Для літій-залізо-фосфатних елементів струм заряду може досягати 300 А – 1200 А. Формування постійного струму такої величини потребує створення системи спеціальних зарядних терміналів, які мають зворотній зв'язок зі системою моніторингу батареї. Таким чином, процес зарядження реалізується спільно зарядним терміналом (зовнішнім пристроєм відносно до акумуляторної батареї) та системою моніторингу (яка є складовою частиною батареї).

Загальною проблемою для будь – яких систем акумуляторних батарей з послідовним підключенням елементів є розкид параметрів окремих елементів або секцій, які складаються з паралельно включе-

них елементів. Для запобігання цього необхідно застосовувати вирівнювання параметрів секцій або елементів для проектування надійних батарей з більш розширеним терміном роботи та строком служби. Вирівнювання базується на вимірюванні рівня зарядженості кожної секції або елемента. При перегріві або при перезарядженні елемента може спостерігатися прискорене погіршення робочих характеристик.

Не існує двох ідентичних елементів або секцій акумуляторних батарей, завжди є деякі розходження у рівні заряду, швидкості саморозряду, ємності, повному опорі, температурному режимі. При складанні багато-секційних батарей виробники, як правило, проводять відбір елементів за однаковими або близькими значеннями напруги і рівнем заряду. Розходження у повному опорі, ємності та швидкості саморозряду можуть привести до розброду напруги між елементами. Оскільки зарядні пристрої визначають повний заряд по досягненню всіма секціями точки стабілізації напруги, то для окремих секцій або елементів їх напруги можуть розрізнитися, а для деяких перевищувати межу захисту від перенапруги [3].

Для запобігання цим процесам необхідно провадити вирівнювання напруг всіх повністю заряджених секцій або елементів акумуляторної батареї. Засоби вирівнювання поділяються на два типи: пасивний та активний. Пасивний спосіб вирівнювання параметрів (так званий засіб вирівнювання розрядних опорів) полягає в тому, що елементи, які потребують вирівнювання, розряджаються через обхідний ланцюг („байпас”), розсіюючи енергію (рис. 1).

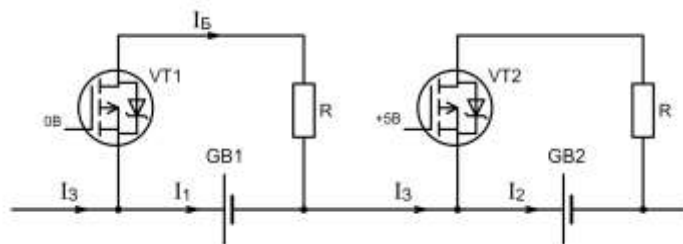


Рис.1 Схема ланцюгів пасивного вирівнювання

На схемі зображені ланцюги пасивного вирівнювання двох елементів батареї або секції з послідовним з'єднанням акумуляторів. Для акумулятора *GB1* обхідний ланцюг через відкритий MOSFET – транзистор *VT1* і резистор *R* забезпечує зменшення струму, що проходить через акумулятор, $I_1 = I_3 - I_B$ на величину струму, що проходить через „байпас”, I_B , для другого акумулятору транзистор *VT2* закритий і струм $I_2 = I_3$, тобто струму зарядження батареї або секції.

Пасивний метод призводить до втрат енергії у вигляді тепла і тому має менше переваг, але є більш простий тому використовується у більшості систем. Активний метод передбачає передачу надлишку енергії в секції з перезарядженням до інших секцій індуктивним або ємнісним методом, що не призводить до втрат енергії, але потребує більших витрат на додаткове обладнання.

При пасивному методі, якщо напруга окремої секції досягає порогу, зарядження припиняється та підключається „байпас”. Процес зарядження припиняється до того, як секція або елемент з більш високою напругою не досягне порогу відновлення, після чого вирівнювання припиняється.

Більш довершений алгоритм використовує стратегію вирівнювання параметрів виходячи з апроксимації швидкості зарядження секцій та замедлення більшої швидкості підключенням „байпас” не очікуючи моменту досягнення порогу. Такий алгоритм зменшує енергетичні витрати, але потребує більших обчислювальних потужностей процесору керування вирівнюванням.

Система має забезпечувати моніторинг батарей різноманітних схем з'єднання акумуляторів для досягнення необхідної напруги та струму батареї незалежно від потужності та розмірів секцій. Система моніторингу має визначати розряд струмом, який перевищує допустимий, та значення температури секцій, що вище норми, контролювати не перевищення допустимої напруги акумулятора та розряд, нижче допустимого, сигналізувати і відключати батарею при короткому замиканні. Можна встановити критичні параметри акумуляторів, що підлягають захисту (див. табл.1).

Таблиця 1

Тип акумулятору	Li-Ion	Li-Pol	LiFePO4
Максимальна напруга, В	4,4 В	4,2 В	3,7 В
Мінімальна напруга, В	3,0 В	3,0 В	2,2 В
Максимальна температура, °С	60	60	70

Сьогодні провідні фірми серійного виготовляють мікросхеми, які виконують функції зарядження та моніторингу батарей літій-іонних акумуляторів, мають різні показники та призначені для роботи з різним числом елементів батарей.

Наприклад, Analog Devices (США) випускають низку мікросхеми, одна з яких AD7280A містить всі функції направленої цільового моніторингу, що використовуються в гібридних електричних автомобільних батареях, і розрахована на керування до 6-ти послідовно з'єднаних елементів батареї. Ця мікросхема включає також динамічні функції, що можуть виявити, коли напруга на елементі перевищує верхній чи нижній ліміт, визначений користувачем, та виміряти напругу і температуру елементів батареї. Мікросхеми з аналогічною архітектурою випускаються іншими фірмами, в тому числі Texas Instruments на 16 елементів. Порівняльні функції та окремі параметри мікросхем для моніторингу наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Виробник	Analog Devices	Texas Instruments	STMicroelectronics	Maxim Integrated
Тип мікросхеми	AD7280A	bq76PL455A-Q	STC3115	DS2756
Число послідовно з'єднаних елементів	6	16	1	1
Вимірювання напруги	Виконується	Виконується	Виконується	Виконується
Вимірювання струму	Не виконується	Виконується	Не виконується	Виконується
Вимірювання температури	Із зовнішньою термопарою	Із зовнішнім датчиком	Не виконується	Виконується
Балансування	Виконується	Виконується	Виконується	Виконується
Інтерфейс	I2C	SPI	I2C	1-Wire

Розподілена система моніторингу з пасивним балансуванням Порівняльний аналіз елементної бази виявив, що застосування мікросхем, які розраховані на моніторинг декількох секцій, призводить до складних схем з'єднань вимірювальних ланцюгів, що знаходяться в умовах завад, викликаними змінами струму при включенні та виключенні навантаження. Тому найбільш доцільним є використання принципів побудови розподіленої системи збирання інформації та управління. Така система передбачає розташування модулю вимірювання та балансування безпосередньо на кожному елементі батареї або секції і з'єднання цих модулів з блоком керування за допомогою цифрового заводостійкого інтерфейса. Такі можливості надає мережа «MicroLAN» (Miniature Local Area Network), створена на базі інтерфейсу 1-Wire, який розроблений корпорацією Dallas Semiconductor (США) і сьогодні є зареєстрованим торговою маркою Maxim Integrated Product, Inc.

1-Wire – двонаправлена шина зв'язку для пристроїв з низькошвидкісною передачею даних (зазвичай 15,4 кбіт/с, максимум 125 кбіт/с в режимі перевантаження), в якій для цифрового обміну використовують однопровідну лінію зв'язку. Основою архітектури мереж MicroLan, є топологія загальної шини, коли кожен з пристроїв підключений безпосередньо до єдиної магістралі без каскадних з'єднань або відгалужень. При цьому використовується структура мережі з одним ведучим або майстром і численними веденими. В системі застосована мережа MicroLan з лініями зв'язку 1-Wire, що складаються з трьох основних проводів: DATA - шина даних, GND - поворотний або земляний дріт, EXT_POWER - зовнішнє живлення не лише обслуговуваних ведених пристроїв, але і зовнішніх відносно них ланцюгів датчиків.

Завдяки наявності у складі будь-якого пристрою, забезпеченого мережевою версією 1-Wire інтерфейсу, індивідуальної унікальної адреси (відсутність збігу адрес для приладів, що випускаються, гарантується фірмою-виробником), мережа MicroLan має практично необмежений адресний простір. При цьому кожен з таких приладів відразу готовий до використання у складі мереж MicroLan без яких-небудь додаткових апаратно-програмних модифікацій. Компоненти однопровідних мереж є самотактуємими напівпровідниковими пристроями, в основі обміну інформацією між якими лежить керування зміною тривалості часових інтервалів імпульсних сигналів у однопровідному середовищі та їх вимір. Передача сигналів для 1-Wire інтерфейсу асинхронна і напів дуплексна, та вся інформація, циркулююча в мережі, сприймається абонентами або як команди, або як дані. Команди мережі генеруються майстром і забезпечують різні варіанти пошуку й адресації.

Стандартна швидкість роботи мережі 15,4кбіт/с була вибрана, по-перше, з урахуванням забезпечення максимальної надійності передачі даних на великі відстані і, по-друге, з урахуванням швидкодії поширених типів мікроконтролерів, які в основному мають використовуватися при реалізації провідних пристроїв однопровідної шини. Ця величина швидкості обміну може бути зменшена до будь-якого можливого значення завдяки введенню примусової затримки між передачею окремих бітів даних. На рис. 2 наведено структурну схему системи моніторингу батареї акумуляторів або окремої секції батареї.

В модулях вимірювання і балансування використано мікросхеми DS2756 (Maxim Integrated) [6]. Мікросхема DS2756 забезпечує високоточне вимірювання напруги (10 розрядів, молодший розряд 4,88 мВ), струму (12 розрядів, молодший розряд 15,625мкВ/ R шунта), температури (10 розрядів, молодший розряд 0,125°C) та балансування одного елемента батареї. Модулі з'єднуються за інтерфейсом 1-Wire. Оскільки напруга на окремих секціях відрізняється одна від одної, то застосована гальванічна розв'язка (до 560 В амплітуди) інтерфейсу 1-Wire від вимірювача за допомогою елементів ADuM1250 згідно з технологією iCoupler (Analog Device) [7].

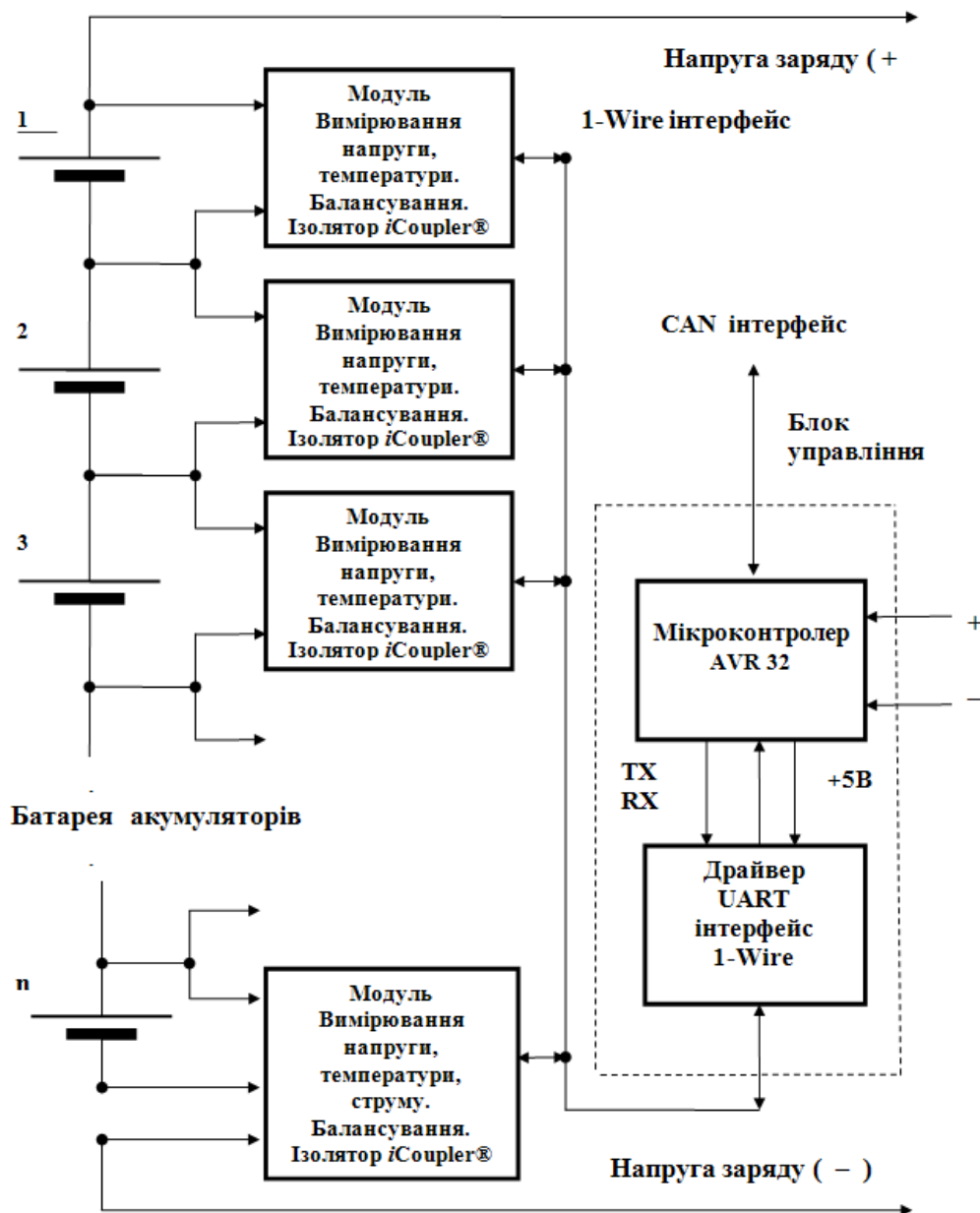


Рис. 2. Структурна схема системи моніторингу

Плати модулів встановлюються на кожному елементі батареї, мікросхема DS2756 безпосередньо контактує з поверхнею елемента для забезпечення вимірювання температури. Для елементів великих розмірів встановлюються додаткові датчики DS18B20 (Maxim Integrated) [8], для вимірювання температури окремих частин елемента батареї. Ці датчики підключаються до інтерфейсу 1-Wire, їх електроживлення здійснюється від лінії EXT_POWER інтерфейсу. При реалізації однопроводового інтерфейсу використовуються стандартні КМОП/ТТЛ логічні рівні сигналів.

Блок керування системою моніторингу побудований на 32-розрядному мікроконтролері в індустріальному виконанні з можливістю застосування в електротранспорті. Використано процесор сімейства AT32UC3C0512 архітектури AVR32 (Microchip) [9], який має широкий набір апаратних ресурсів, необхідних для побудови системи моніторингу. Апаратна підтримка стандарту CAN дає можливість інтегру-

вати систему в промислову мережу контролерів. До кожного з 5-ти інтерфейсів UART мікроконтролера за допомогою майстер-пристрою DS2480B (Maxim Integrated) [10] підключається окремий інтерфейс 1-Wire, що дозволяє отримати 5 секцій елементів батареї для послідовного, паралельного та послідовно-паралельного їх включення. Оскільки в мережах MicroLan кожен елемент підключений до інтерфейсу 1-Wire має свій унікальний MAC адрес, тому адреса мікросхеми DS2756 дозволяє привласнити кожному елементу батареї цей унікальний номер, ідентифікуючи його з метою заміни і калібрування системи вимірювання. Крім того, здійснюється налаштування параметрів драйверу під топологію мережі. Для забезпечення гальванічної розв'язки з ланцюгами TXD, RXD інтерфейсу UART мікроконтролера використовується мікросхема ADuM1250. Розв'язка ланцюгів живлення здійснюється за допомогою DC-DC перетворювача AIM/4s – 0505. Електрична схема модуля вимірювання та балансування наведена на рис. 3.

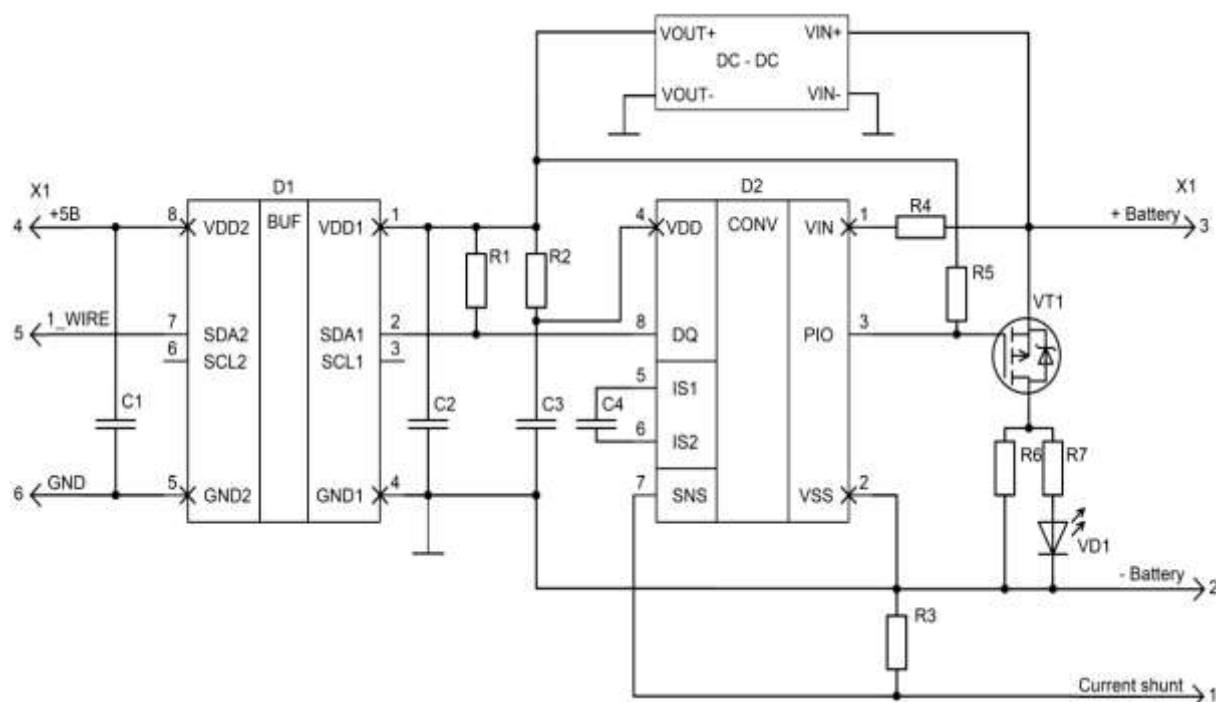


Рис. 3. Електрична схема модуля вимірювання та балансування

У схемі модуля елемент D1 є мікросхемою гальванічної розв'язки ADuM1250, D2 – DS2756. Вимірювання струму здійснюється за допомогою шунта R3 за величиною напруги на вході SNS D2, напруга на акумуляторі батареї вимірюється через резистор R4, встановлений на вході VIN. Відкритий MOSFET – транзистор VT1 разом з резистором R6 створює ланцюг „байпас”, якщо на затворі транзистору нульовий потенціал. При високому потенціалі на затворі транзистор VT1 закритий. Електроживлення DS2756 модуля та другої половини ADuM1250 здійснюється від акумуляторної батареї, до якої підключений модуль, через DC-DC перетворювач 0,9 – 5 В у 5 В.

При вимірюванні струму і напруги акумулятор приєднують до контактів 3 та 2 з'єднувача X1, а вхідні ланцюги для зарядження – до контактів 1 та 3 X1. При вимірюванні тільки напруги вхідні ланцюги для зарядження підключають до контактів 1 та 2 X1, тоді як контакти 1 та 2 замкнуті.

Програмне забезпечення системи моніторингу акумуляторної батареї функціонує під управлінням операційної системи реального часу RTOS і дозволяє:

- контролювати струм заряду/розряду, напругу і температуру всіх елементів батареї;
- коригувати процес заряду елементів батареї шляхом управління силовим вузлом „байпас”;
- накопичувати статистичні дані про стан всіх елементів в ході експлуатації батареї;
- формувати тестові режими при введенні в експлуатацію і ремонті батареї;
- організувати зв'язок із зовнішнім пристроєм по інтерфейсу CAN з метою управління, обміну даними,
- візуалізації процесу моніторингу;
- адаптувати параметри драйверів інтерфейсу мережі MicroLAN до топології конкретної мережі.

Конфігурація і статистичні дані системи моніторингу стану акумуляторної батареї зберігаються на SD карті і в будь-який момент доступні до зовнішнього керуючого пристрою.

Список літератури

1. Шембель О. М., Білогуров В. А. Основні характеристики сучасних хімічних джерел струму різних електрохімічних систем // Сучасна спеціальна техніка. Науково-практичний журнал. — № 2(17), 2009.
2. Силевич В,Ю. Основные типы тяговых аккумуляторных батарей, которые используются в легковом транспортном сегменте.// Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. — № 74, 2016 (с. 222– 226).
3. Рыкованов А. С., Румянцев А. М. Способы заряда Li-Ion аккумуляторов и батарей на их основе // Компоненты и технологии. 2012. № 11.
4. Рыкованов А.С. Активные и пассивные системы баланса Li-Ion аккумуляторных и батарей // Компоненты и технологии. 2014. № 3.
5. Рыкованов А. С. Системы баланса Li-Ion аккумуляторных батарей. // Силовая электроника. – № 1, 2009 (с.52-55).
6. DS2756,datasheet, www.maximintegrated.com.
7. ADuM1250,datasheet, www.analog.com.
8. DS18B20,datasheet, www.maximintegrated.com.
9. AT32UC3C0512 , datasheet, www.microchip.com.
10. DS2480, datasheet, www.maximintegrated.com.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Трубіциним М.Д.