

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ



SATBAYEV
UNIVERSITY

А. Бүркітбаев атындағы өндірістік автоматизация және цифрландыру
институты

«Робототехника және автоматиканың техникалық құралдары» кафедрасы

Ақылша Арай Асылханқызы

«Кең температуралық диапазоны бар автономды электрон құрылғысының қуат
көзі»

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

5B071600 – “Аспап жасау”

Алматы 2020

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ



SATBAYEV
UNIVERSITY

А. Бүркітбаев атындағы өндірістік автоматизация және цифрландыру
институты

«Робототехника және автоматиканың техникалық құралдары» кафедрасы

ҚОРҒАУҒА РҰҚСАТ
РТжАТҚ кафедра меңгерушісі
техника ғылым кандидаты



Қ.А. Ожикенов
« 23 » мамыр 2020 ж.

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

Тақырыбы: «Кең температуралық диапазоны бар автономды электрон
құрылғысының қуат көзі»

5B071600 – Аспап жасау мамандығы бойынша

Орындады

Ақылша Арай

Ғылыми жетекшісі
тех.ғылым магистрі,
лектор

Бигалиева Ж.С.

«23» мамыр 2020 ж.

Алматы 2020



SATBAYEV
UNIVERSITY

А. Бүркітбаев атындағы өндірістік автоматизация және цифрландыру институты

«Робототехника және автоматиканың техникалық құралдары» кафедрасы

5B071600 – Аспап жасау

БЕКІТЕМІН
РТжАТҚ кафедра меңгерушісі
техника ғылым кандидаты



Қ.А. Ожикенов
«23» қантар 2020 ж.

ТАПСЫРМА

дипломдық жұмысты орындауға

Білім алушыға Ақылша Арай Асылханқызы

Тақырыбы: Кең температуралық диапазоны бар автономды электрон құрылғысының қуат көзі

Университет ректорының бұйрығымен бекітілген №726-б «27» қантар 2020ж.

Аяқталған жұмысты тапсыру мерзімі «15» мамыр 2020 ж.

Дипломдық жұмысқа бастапқы мәліметтер: Бұл дипломдық жобада аккумуляторлық батареяны басқару жүйесі зерттелді.

Дипломдық жұмыста әзірленуге жататын мәселелер тізімі: Дипломдық жұмыста BMS (Battery Monitoring System) шолуын, заряд теңдестіру жүйесінің әр түрлі түрлерін салыстыруды қамтиды. Аккумуляторлық батареяның математикалық моделі, сондай-ақ BMS моделі әзірленді.

Графикалық материалдың тізбегі (міндетті сызбаларды дәл көрсете отырып):
9 слайд


Ұсынылатын негізгі әдебиеттер: 20 әдебиеттер тізімі

КЕСТЕ
дипломдық жобаны дайындау

Бөлімдер атауы, әзірленетін сұрақтар тізбесі	Ғылыми жетекшіге ұсыну мерзімдері	Ескертпелер
Теориялық бөлім	22.01 – 15.02.2020 ж.	Орындалды
Есептеу бөлімі	22.01 – 15.02.2020 ж.	Орындалды

Аяқталған дипломдық жобаға және оған қытысты бөлімдерінің кеңесшілері мен қалып бақылаушының

ҚОЛТАҢБАЛАРЫ

Бөлімдердің атауы	Ғылыми жетекшілер, кеңесшілер, (аты-жөні, тегі, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қол
Қалып бақылаушы	Ж.С.Бигалиева, техника ғылымдары магистрі, лектор	23.05.2020 ж.	

Ғылыми жетекшісі  Бигалиева Ж.С.

Күні «23» мамыр 2020 ж.

Тапсырманы білім алушы орындауға қабылдады _____ Ақылша А.А.

Күні «24» мамыр 2020 ж.

АНДАТПА

Бұл дипломдық жұмыста аккумуляторлық батареяны басқару жүйесі зерттелді. Дипломдық жұмыста BMS (Battery Monitoring System) шолуын, заряд теңдестіру жүйесінің әр түрлі түрлерін салыстыруды қамтиды. Аккумуляторлық батареяның математикалық моделі, сондай-ақ BMS моделі әзірленді. Сонымен қатар, аккумуляторлық батареяның заряд-разрядының уақытша диаграммалары және зарядты теңгеру жүйесі тұрғызылды. BMS контроллері үшін аккумуляторлық батарея мен элементтік база таңдалынды.

АННОТАЦИЯ

В данном дипломном работе исследована система управления аккумуляторной батареей. Дипломная работа включает обзор существующих BMS (Battery Monitoring System), сравнение различных типов систем балансировки заряда. Разработана математическая модель аккумуляторной батареи, а также модель BMS. Кроме того, построены временные диаграммы заряда-разряда аккумуляторной батареи и системы балансировки заряда. Произведен выбор аккумуляторной батареи и элементной базы для BMS контроллера.

.

ABSTRACT

In this thesis, the battery management system was studied. The thesis includes an overview of the BMS (Battery Monitoring System), a comparison of different types of charge balancing systems. A mathematical model of the battery, as well as the BMS model was developed. In addition, time diagrams of the charge-discharge of the battery and a charge balancing system were built. A rechargeable battery and an element base were selected for the BMS controller.

МАЗМҰНЫ

Кіріспе 8

1 Негізгі бөлім 9

1.1. Батарея ұяшықтарының зарядын тегістеу және теңестіру 9

1.2. Өзін-өзі теңестіру 10

1.3. Ұқсас теңгергіштер 11

2 Батареялардың математикалық үлгісін зерттеу 12

2.1. Батареялардың түрлерін таңдау 12

2.2. Литий-темір-фосфатты аккумулятор ($LiFePO_4$, LFP) 14

2.3. Аккумуляторлық батареялардан ұяшықтарды таңдау 14

2.4. Батареялардың математикалық үлгісі 16

2.5. $LiFePO_4$ ұяшықтарының зарядталу үрдісін үлгілеу 24

2.6. Батареяның математикалық үлгісі .25

3 Аккумуляторлық батареяның теңдестірілу жүйесінің математикалық үлгісі 27

3.1. Аккумуляторлық ұяшықтарға бақылау жүргізуге арналған теңдестірілген жабдықтың үлгісі 27

3.2. Аккумуляторлық батареяны бақылауға арналған теңдестіргіш құрылғының үлгісі 28

4 Құрылымдық бөлім 30

4.1. Элементтік базаны таңдау 30

5 Аккумуляторлық батареяның зарядталу деңгейін индикациялау сұлбасы 33

5.1. Сұлбаны таңдау 33

Қорытынды

Пайдаланған әдебиеттер тізімі

КІРІСПЕ

Қазіргі уақытта аккумулятор батареяларының көптеген түрлері пайда болып жатыр, олар үшін неғұрлым жетілдірілген басқару жүйесі талап етіледі, сондықтан аккумулятор батареяларының ұяшықтарының өнімділігі мен қолдану мерзімін ұзарту үшін BMS (*Battery Monitoring System*) батарея зарядын бақылау жүйесін пайдалану қажет.

Дипломдық жобаның мақсаты аккумулятор батареяларын басқару жүйесін әзірлеу болып табылады. Сериялық шығарылатын батарея зарядын бақылау жүйесімен танысу. Қайта зарядталуды бақылаудың аналогтық, сандық жүйелерін, сондай-ақ батарея зарядын бақылаудың толық жүйесін қарастыру. Бірнеше түрлік сұлбаларға салыстырмалы талдау жүргізу. Жүйе моделін *Matlab-Simulink-me* әзірлеу.

1 Негізгі бөлім

1.1 Батарея ұяшықтарының зарядын тегістеу және теңестіру

Көп ұяшықты батареяларда, кейбір элементтердің айтарлықтай көптеген саны қолданылғандықтан, біз бір ұяшықты батареялардан қарағанда жоғары бас тарту ықтималдығын күте аламыз. Ұяшықтар көп болған сайын, соғұрлым істен шығу ықтималдығы және пайдалану қасиеттері нашар.

Электр көлігі немесе гибридтелген электр көлігі үшін пайдаланылатын батареялар, 200-300 вольт немесе одан да көп кернеуге қол жеткізу үшін тізбектелген ұяшықтардың ұзын тізбегінен жасалған және олар неғұрлым осал болып келеді. Мәселені жою үшін қажетті сыйымдылыққа немесе қуатқа жету үшін батареяның параллель жиынтығы қолданылады. n элементтерден жасалған батарея үшін, істен шығу ықтималдығы бір ұяшықты батареяға қарағанда n есе көп болады.

Барлық ұяшықтар мүлдем бірдей жасалуы мүмкін емес. Ұяшықтар арасындағы өзара іс-қимыл жасау мүмкіндігінен бас тарту ықтималдығы жоғарырақ. Өндірістік шашыраңқылық, әртүрлі температуралық коэффициенттер және жеке ұяшықтардың ескіруінің әртүрлі сипаттамалары бар болғандықтан, тізбектегі жеке ұяшық шамадан тыс жүктелуі мүмкін, бұл ұяшықтың уақытынан бұрын істен шығуына әкеледі. Егер осы тізбекте аздаған сыйымдылығы бар әлсіз ұяшық болса, зарядтау циклы кезінде ол толық зарядқа жетеді және басқа ұяшықтар номиналды сыйымдылыққа дейін зарядталады. Нәтижесінде температура мен қысым өседі және ұяшықтың зақымдануына әкелуі мүмкін. Әрбір зарядтау-разрядтық циклімен әлсіз ұяшық батарея істен шыққанша әлсіз болады. Разряд кезінде әлсіз ұяшық разрядтың ең үлкен тереңдігіне ие болады және қалғандардан артық істен шығу үрдісі болады.

Сондай-ақ, әлсіз ұяшықтың кернеуі басқалардан бұрын толығымен үзілген кезде инвертацияланады, бұл ұяшықтың ерте істен шығуына әкеледі. Бұл проблеманы жою және ұяшықтар арасындағы жүктемені теңестіру үшін теңгерудің әртүрлі әдістері бар.

1.2 Өзін-өзі теңдестіру

Теңгерілмеген ескіру барлық ұяшықтар бір уақытта бір кернеуде болған кезде параллельді тізбектерге қосылған сәттен бастап өздігінен теңесуге ұмтылатын параллельді жалғау кезіндегі мәселелердің ең азы болып табылады және заряд сыртқы кернеуде болмаған кезде ұяшықтар арасында ағып кетуі мүмкін. Бұл жағдайда параллель тізбектегі ұяшықтардың бірінде қысқа тұйықталу жағдайында мәселе туындауы мүмкін, бұл батареяның істен шығуына әкеледі және проблеманы одан сайын нашарлатады.

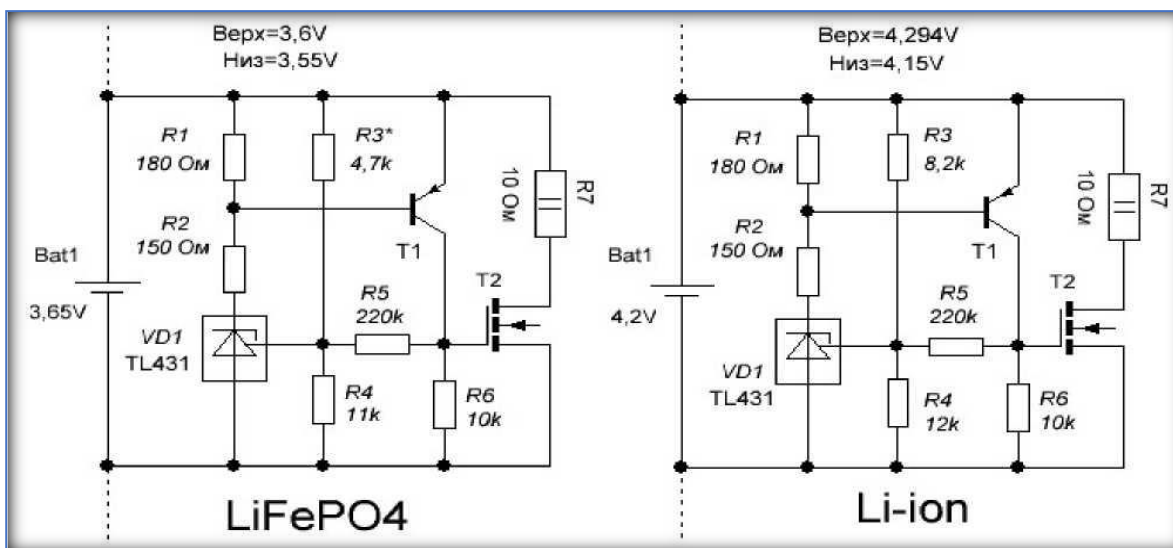
Ұяшықтар арасындағы айырмашылыққа байланысты орын алатын мәселелер, ұяшықтар жылдам зарядтардың (микроциклдердің) объектісі болған кезде ұлғаяды, бұл гибридті электр көлік құралдарында болады .

Литий батареялары микроциклдерге көбірек төзімді болғанымен, олар жеке ұяшықтар арасындағы айырмашылықтардың проблемаларына төзімділігі аз. Батареяны құрастыру үшін қандай әдіс пайдаланылса да көпұяшықты батареяның істен шығу ықтималдығы немесе қызмет ету мерзімі, бір ұяшықтың ұқсас сипаттамаларына қарағанда әрқашан нашар болады.

Ұяшық істен шыққан кезде, бүкіл батарея үлкен шығындарға әкеліп соқтырады. Бір ұяшықты ауыстыру мәселені шешпейді, өйткені жаңа ұяшық тізбектегі «ескі» ұяшықтан өзгеше болады және алдымызда кезікен мәселе тағы да қайталанары.

1.3 Ұқсас теңгергіштер

Ұқсас теңдестіргіштерде кернеуді бақылау қызметі әдетте тіректік кернеумен жабдықталған компаратор орындайды. Ең жиі кездесетін ауқымды деңгейде таралған отандық шағын сұлба ол *TL431*, болып табылады, бұнда мынадай сұлба бейнесін көруге болады.



1.1 Сурет – *LiFePo4* және *Li-ion* аккумуляторларына арналған ұқсас теңгерімдердің қағидалық сұлбасы

Осы сұлба мына тәртіппен жұмыс жасайды, яғни R3, R4 бөлгішпен бақыланатын электродтың шегі анықталады 2,5 В көрсеткішіне дейін жетеді, *TL431* – ашылады, сонымен бірге бұл кезде *T1* транзисторы да ашылады. Сонымен бірге, коллектордың қоры жоғарылап, осы кернеудің жартысы *R5* резисторы арқылы *TL431*. Басқару электродының тізбегіне түседі. Бұл ретте, шағын сұлба тасқын

тәріздес қанығуға кіреді. Бұл сұлба айқын гистерезисті алады - 3,6 В кезінде қосылады, ал сөнуі - 3,55 В деңгейінде жүзеге асады.

Бұл ретте күш кілтінің қақпағында өте тік бағытта басқарушы импульс қалыптасады және күш кілтінің белсенді режимге түсуі – жүрмейді. Теңгерудің ең жоғары тоғының шамасы $R7$ резисторының көмегі арқылы, сонымен бірге аккумуляторға берілген кернеу есебінен де анықталады. Электродта қуат күші 2,5 В деңгейне жеткен кезде, $TL431$ – ашылады, сонымен бірге бұл уақытта $T1$, транзисторы да ашылады. Сондай ақ, коллектордың қоры да жоғарылайды және бұл $R5$ резисторы арқылы кернеу $TL431$ басқару электродының тізбегіне түседі. Бұл ретте шағын сұлба тасқын тәріздес қанығуға кіреді. Бұл сұлба айқын гистерезисті алады - 3,6 В кезінде қосылады, ал сөнуі - 3,55 В деңгейінде жүзеге асады.

Бұл ретте күш кілтінің қақпағында өте тік бағытта басқарушы импульс қалыптасады және күш кілтінің белсенді режимге түсуі – жүрмейді. Теңгерудің ең жоғары тоғының шамасы $R7$ резисторының көмегі арқылы, сонымен бірге аккумуляторға берілген кернеу есебінен де анықталады.

2 Батареялардың математикалық үлгісі зерттеу

Бұл тарауда батареялар мен оның ұяшықтарының функционалдық үлгісін қарастыру жүреді. Сонымен бірге батареяларды зарядтау, қуатының таусылуы тәрізді көрсеткіштері бойынша жалпы сипаттамалар беріледі.

2.1 Батареялардың түрлерін таңдау

Әлемде электр энергиясын сақтаудың көптеген көздері бар. Көбірек қолданыстағы түрі: Литий-ионды (*Li-ion*).

Литий-иондық түріне тағы да төрт түрін жатқызуға болады:

- Кобальт-литий
- Литий-марганец
- Литий-темір-фосфатты
- Литий полимерлік

Электр энергиясын жинақтау саласындағы көптеген технологиялар дами отырып, танымалдылыққа ие болады, алайда электр энергиясын жинақтау бойынша литий-иондық технологиясы қазіргі уақытта электр көлік құралдарының (электромобильдер) қазіргі буыны үшін келешегі бар болып табылады

Литий - ионды (*Li-ion*) аккумуляторлық батареялардың қорғасын-қышқылды аккумуляторлық батареялардан айырмашылығы жақсы күтімді талап етеді және зарядтауға да қойылатын талаптары жоғары болып келеді. Жай ғана желіге қосылудан гөрі зарядтауды әлдеқайда көп талап етеді. Белгілі бір сәтте, тіпті батареяны бәсеңдетудің өзі қайтымсыз зақымдалуға әкеп соғады. Бұл жеке ұяшықтар деңгейінде жекелеген ұяшықтардың әртүрлі деңгейінді зарядтау мен қуатының біту жағдайларының өте күрделі стратегиясын даярлауға әкеп соқты.

Литий 3 атом нөміріне ие – ол металлдардың ішіндегі ең жеңілі болып табылады. Оның аккумуляторлар үшін үлкен артықшылығының бар болуына байланысты үлкен электрохимиялық басымдылыққа ие және салмақ бірлігіне үлкен энергияның үлестік қасиеті бар. Өкінішке орай барлығы жақсы емес. Литийдің артықшылық қасиеттерінен басқа, оның да кемшіліктері бар, атап айтқанда тұрақсыз болуы, жарлығыштық қауіпінің болуы, ауа немесе сумен жанасқан кезде тез өртенетін қасиеттері бар. Қауіпсіз материалдарды қолдану бойынша зерттеу жұмыстары бұрында жүргізілгендігін атап өте кету қажет. Батареяны таңдау үшін, біз бірнеше шарттарды ұстануымыз қажет, себебі электр көлігінде батареяларды пайдалану режимі болғандықтан бұл басқа жағдайлардан өзгеше болып келеді:

Меншікті сыйымдылығының жоғары болуы (көлік құралының салмағы өте жоғары);

- Зарядталу-разрядты циклының саны (құны жағынан өте қымбат тұратын батарея бірнеше жылдан кейін пайдаға аспай жарамсыз болып қалады);
- Батареяның зарядталу уақыты (зарядталу уақыты көлікке жағармай

құюмен салыстырғанда аса маңызды емес);

- Разрядтық көрсеткішінде тоқтың жоғары болуы (егер ток деңгейі төмен болса, онда жоғарғы қуаттылықты қамтамасыз етуге кепілдік бермейді).

Тағы да бір жайтты ескере кету қажет, яғни батарея температураға тұрақты және төзімді болуы қажет, осыған байланысты бізге кобальт литий, литий марганецті, полимерлік литий батареялары сәйкес келмейді.

Осы жоғарыда аталған бірнеше талаптардың негізінде бізге ең жарамды болып табылатыны: ол литий- темір-фосфатты батарея екендігін анықтадық.

2.2 Литий-темір-фосфатты аккумуляторы ($LiFePO_4$, LFP)

Басқа литий ионды аккумуляторлармен салыстырғандағы басым артықшылықтары:

- Жұмыс істеу мерзімі ұзақ;
- Улылығы аз;
- Температураға төзімді және жарылу қаупі жоқ;
- Кернеудің тұрақты түрде бітуі ;
- Жоғары шың биігіндегі ток;
- Энергия тығыздығының баяу төмендеуі ;
- Арзандығы.

Басқа литий-ионды аккумуляторлармен салыстырғандағы кемшіліктері :

1. Меншікті салмақ сыймдылығы аз;
2. Ұяшықтардың кернеуінің төмен және аз деңгейде болуы.

LiFePO₄ аккумуляторының толық сипаттамасы

Толық зарядталған элементтің кернеуі: $ULi-Fe$ элементі 3.65В тұрады. Осы технологияның ерекшеліктеріне байланысты бұл элементтер қайта зарядтала қоймайды (тіпті олар қызып кетпейді, ал жарлығыштық қаупінің болуы литий кобальтиы $Li-ion$, $Li-pol$ элементтерінің негізінде болуы мүмкін), дегенменде 3.9В жоғары және 4.2В дейінгі бірнеше зарядтары бар элементтерді өндіргіштер ұсынбайды.

Тоғы азайған элементтің кернеуі

Бұнда өндіргіштердің ұсыныстары біршама расталмайды, себебі кейбіреулері элементтерді 2,5В зарядтауды ұсынса, ал енді біреулер 2,0В дейін ғана зарядтауға кеңес береді. Бірақ кез келген жағдайда аккумуляторлардың барлық түрлерін пайдалану тәжірибесі бойынша мынаны анықтадық, атап айтқанда разрядтың деңгейі неғұрлым терең болса, соғұрлым бұл аккумулятор көп циклдерге төзе алады, ал соңғы 0,5В, сәйкес келетін энергия саны оның сыйымдылығына байланысты бірнеше пайызды ғана құрауы мүмкін.

Орташа нүктенің кернеуі: бұл технологияның элементтері әртүрлі өндірушілерге байланысты ерекшеліктері мен айырмашылықтары болады яғни бұл көрсеткіштер 3.2В - 3.3В аралығында ауытқиды. Бұл разряд қисығы негізінде есептелетін кернеу мен аккумулятордың габариттік

сыйымдылығындылыққа көбейтеді. Мысалы, егер сізде сыйымдылығы 1.1Ач элемент болса, және оның орташа нүктесінің кернеуі 3.3В тең болса, онда оның габариттік сыйымдылығы $3.3 \cdot 1.1 = 3.65 \text{Wh}$ тең болады. (көбісі орташа нүктенің кернеуін зарядталған элементтің кернеуімен шатастырып жатады)

2.3 Аккумуляторлық батареялардан ұяшықтарды таңдау

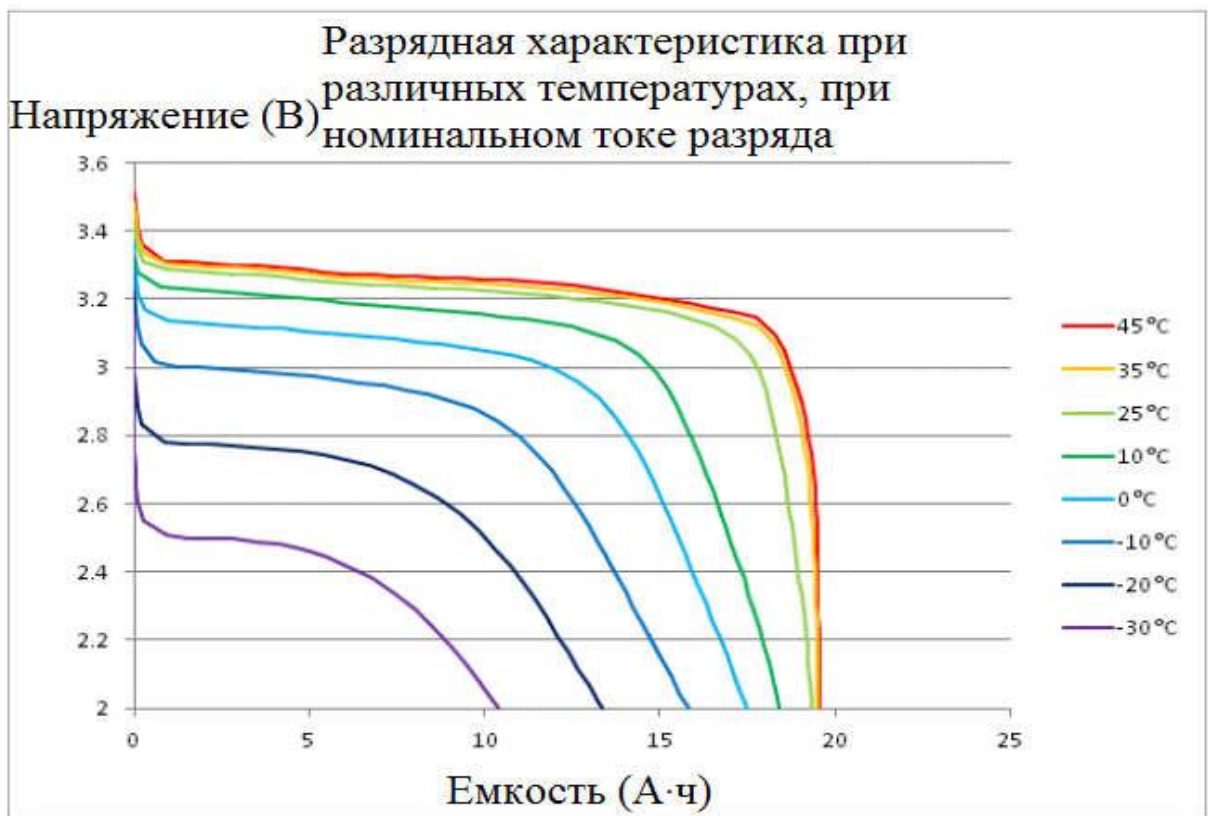
LiFePO₄ алпауыт өндірушілерінің бірі ол әрине *A123 Systems* компаниясы болып табылады. Олар осы литийлік аккумуляторларға ұқсас жаңа бір түрін шығарды. Литий темір фосфатты аккумулятордың тарихы бірнеше ондаған жылдарды есептейді. Перспективалы материалды алғаш рет пайдалануда литийлі аккумуляторлық батареялар үшін катодты материал ретінде катодты материал ретінде қолдану жөнінде 1996 жылы Техасс университетінің зерттеушісі Джон Гуденаф сипаттады.

Салыстырмалы түрде құнының төмен болуы, усыздығы, құрамында табиғи темірдің болуымен қатар, температураға едәуір төзімділігі мен қауіпсіздігінің болуы есебінен сонымен бірге, литий-темірлі-фосфатты аккумуляторлар әлемдік мойындауға ие болды. Электр өткізгіштігінің төмен болуы мәселесі алюминий, марганец немесе титан өткізуші шар материалдарының *LiFePO₄* бөлшектерін жабумен шешілді. Литий-темір-фосфатты аккумуляторлар технологиясы өнеркәсіптік өндіріске негізін арта отырып, профессор Цзян Йе-Минмен және Массачусетс технологиялық институтының өзге де қызметкерлерінің тарапынан жетілдірілді. Қазіргі уақытта жоғарғы сапалы *LiFePO₄* материалы өндірістік тәсілдің бірімен дайындалады: жақсы қуатты сипаттамасы бар немесе үш фазалы сипаттамасы бар сұйық фазалы өнімді алуға мүмкіндік береді.

Компания өнімдері каталогынан бізге ұяшықтарының номиналды кернеуі 3,3 В болатын 20 Ач сыйымдылығы бар батарея қолайлы болып табылады.

Төменде ұяшықтардың негізгі сипаттамалары келтірілген:

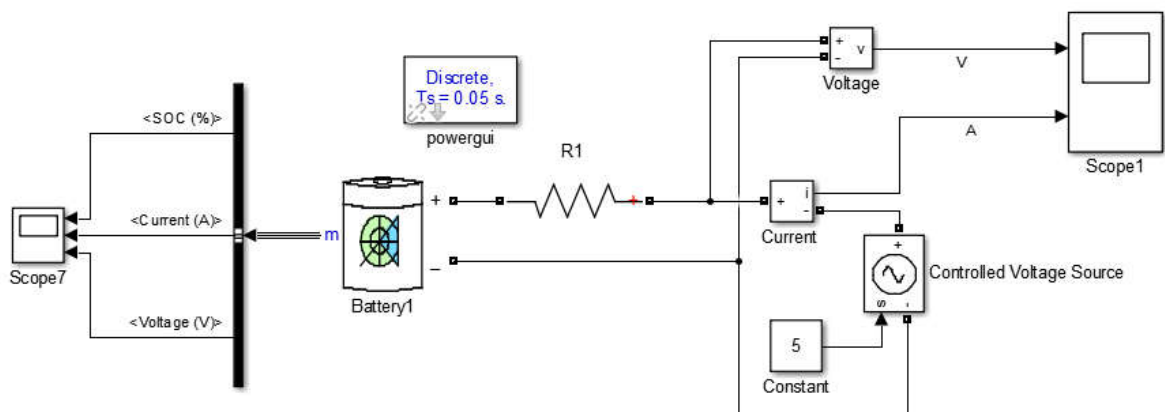
- 1) Ұяшықтың номиналды кернеулігі 3,3 В.
- 2) Ұяшықтадың максималды кернеулігі 3,6 В.
- 3) Ұяшықтардың минималды кернеулігі 2 В.
- 4) Номиналды ымдылығы 20 Ач.
- 5) Максималды сыйымдылығы 20,37 Ач.
- 6) Номиналды кернеу кезіндегі сыйымдылығы 18 Ач.
- 7) Ішкі қарсылық күші < 2 мОм.
- 8) Номиналды разрядты тоқ 19,37 А.
- 9) Экспоненциалды кернеулігі 3,35 В.
- 10) Экспоненциальды сыйымдылығы 1 А·ч.



Сурет 2.1 – Номиналды разрядты тоқ кезіндегі разрядтық сипаттамасы

Суретте көрсетілген разрядтық сипаттың әр түрлі температура кезінде -10°C дейін батареяны пайдалануға болатыны және кернеудің қатты шөгуін алмауға болатынын, батарея сыйымдылығының қуаты 20% - ға жететіні, бұл қысқы пайдалану жағдайларында дербес электр көлігі үшін өзекті болып табылады.

2.4 Батареялардың математикалық үлгісі

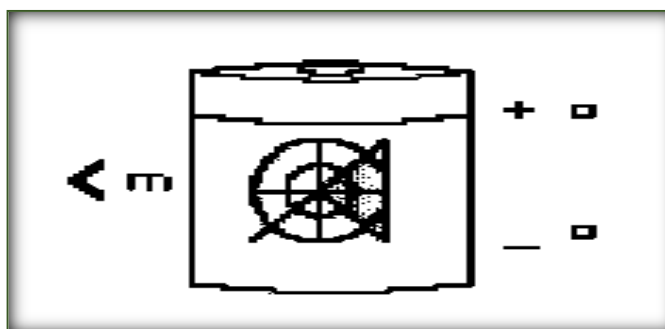


Сурет 2.2 - *Matlab-Simulink* ұяшықтарының математикалық үлгі сұлбасы

Суретте аккумулятор батареясының ұяшық зарядының нағыз мінсіз көзі бейнеленген. *ControlledVoltageSource* блогы аккумуляторлық ұяшыққа тұрақты кернеу береді, тұрақты кернеудің тамаша зарядтау құрылғысы ретінде әрекет етеді. Біздің жағдайда зарядтау үшін LiFePo4 ұяшық жеткілікті 5 константаға беруге, шығу қуаттайтын құрылғы 5В амплитудасы бар кернеу пайда болады. R1 Резистор - үлгі қарсылық сымдар арасындағы ҚҰ және аккумулятор ұясын алмастырады. Score1 элементі датчик арқылы берілетін қысым көзін көрсетед және тоқ датчигі арқылы батарея зарядының қуатын көрсетеді.

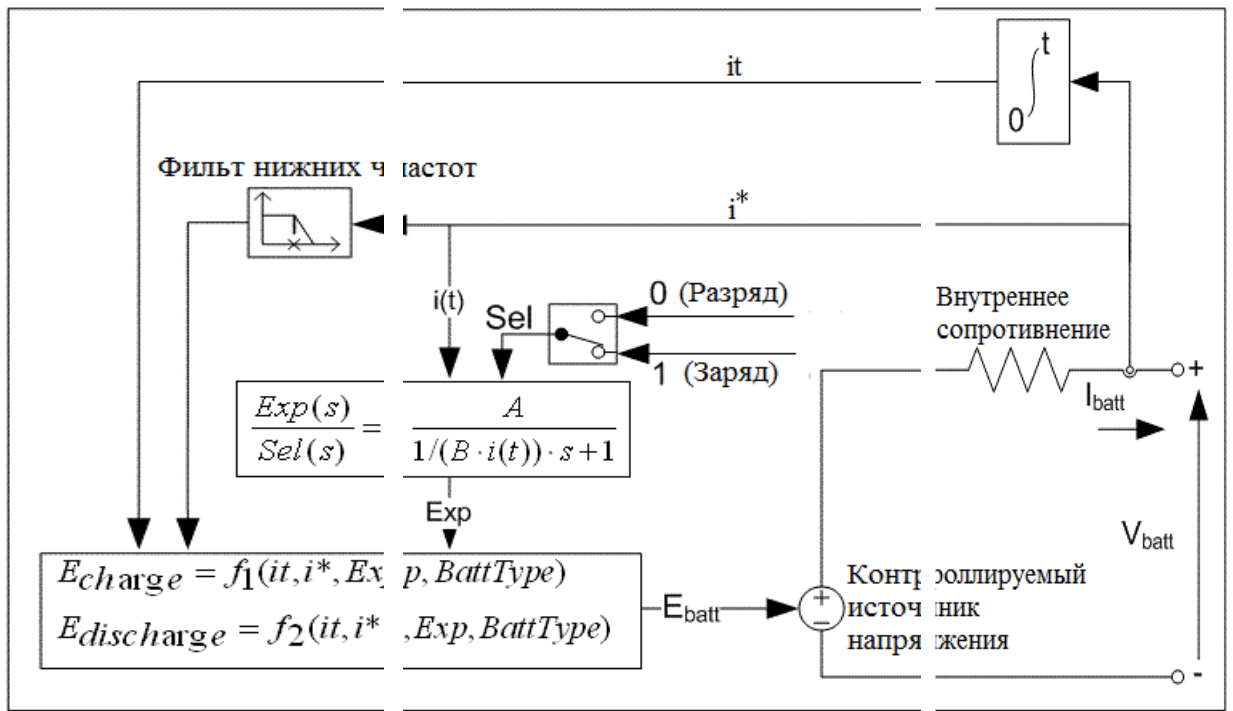
Score7 осциллографынан мынаны көруге болады:

- $\text{SOC} \%$ ұяшығының сыйымдылығын
- зарядтың тоқты (*CurrentA*);



Сурет 2.3 - LiFePo4 ұяшығының математикалық үлгісінің сұлбалық бейнесі

2.4 суретінде бейнеленген *Battery* элементі аккумуляторлық батареялардың ең танымал түрлерін ұсыну үшін жалпы динамикалық үлгіні іске асырады. Батарея блогы аккумуляторлық батареялардың ең танымал түрлерін ұсыну үшін, жалпы динамикалық үлгі іске асырады.



Сурет 2.4 – ұяшықтардың эквивалентті сұлбасы

Қорғасынды –қышқылды үлгісі:
Разрядтық сипаттамасы ($i^* > 0$)

$$f_1(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K * \frac{Q}{Q-it} * i^* - K * \frac{Q}{Q-it} * it + Laplace - 1\left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} * 0\right). \quad (2.1)$$

Қуаттың сипаттамасы:

$$f_2(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K * \frac{Q}{it+0.1*Q} * i^* - K * \frac{Q}{Q-it} * it + Laplace - 1\left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} * \frac{1}{s}\right). \quad (2.2)$$

Литий ионының үлгісі: разрядтық сипаттамасы: ($i^* > 0$)

$$f_1(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K * \frac{Q}{Q-it} * i^* - K * \frac{Q}{Q-it} * it + Laplace - 1\left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} * 0\right). \quad (2.3)$$

зарядтау сипаттамасы: Q

$$f_2(it, i^*, i) = E_0 - K * \frac{Q}{|it|+0.1*Q} * i^* - K * \frac{Q}{Q-it} * it + A * exp(-B * it). \quad (2.4)$$

E_{batt} -бейсызық кернеу, В;

E_0 - бастапқы кернеу, В;

$Exp(s)$ - экспоненциалды динамика аймағы, В;

$Sel(s)$ - батарея режимі;

E_{batt} -бейсызық кернеу, В;

E_0 - бастапқы кернеу, В;

$\text{Exp}(s)$ - экспоненциалды динамика аймағы, В;
 $\text{Sel}(s)$ - батарея режимі;
 $\text{SEL}(s)$ - 0 батарея разряды кезінде;
 $\text{SEL}(s)$ - 1 батареяны зарядтау кезінде;
 K - тұрақты Поляризация, (Ач)-1 немесе поляризациялық кедергі, Ом;
 I^* - төмен жиілікті ток, А;
 I -батарея тогы, а; зарядтау сипаттамасы: ($i^* < 0$)
 it -сыйымдылық, Ач; Q_{-}
 Q -батареяның максималды сыйымдылығы, А; $^{1it1} + ^{0.1\Delta Q}$
 мұнда E_{Batt} -бейсызық кернеу, В;
 E_0 - бастапқы кернеу, В;
 $\text{Exp}(s)$ - экспоненциалды динамика аймағы, В;
 $\text{Sel}(s)$ - батарея режимі;
 $\text{SEL}(s)$ - 0 батарея разряды кезінде;
 $\text{SEL}(s)$ - 1 батареяны зарядтау кезінде;
 K - тұрақты Поляризация, (Ач)-1 немесе поляризациялық кедергі, Ом;
 I^* - төмен жиілікті ток, А;
 I -батарея тогы, а; it -сыйымдылық, Ач;
 Q -батареяның максималды сыйымдылығы, А;



Сурет 2.5 – Түрлік разрядтық сипаттамасы

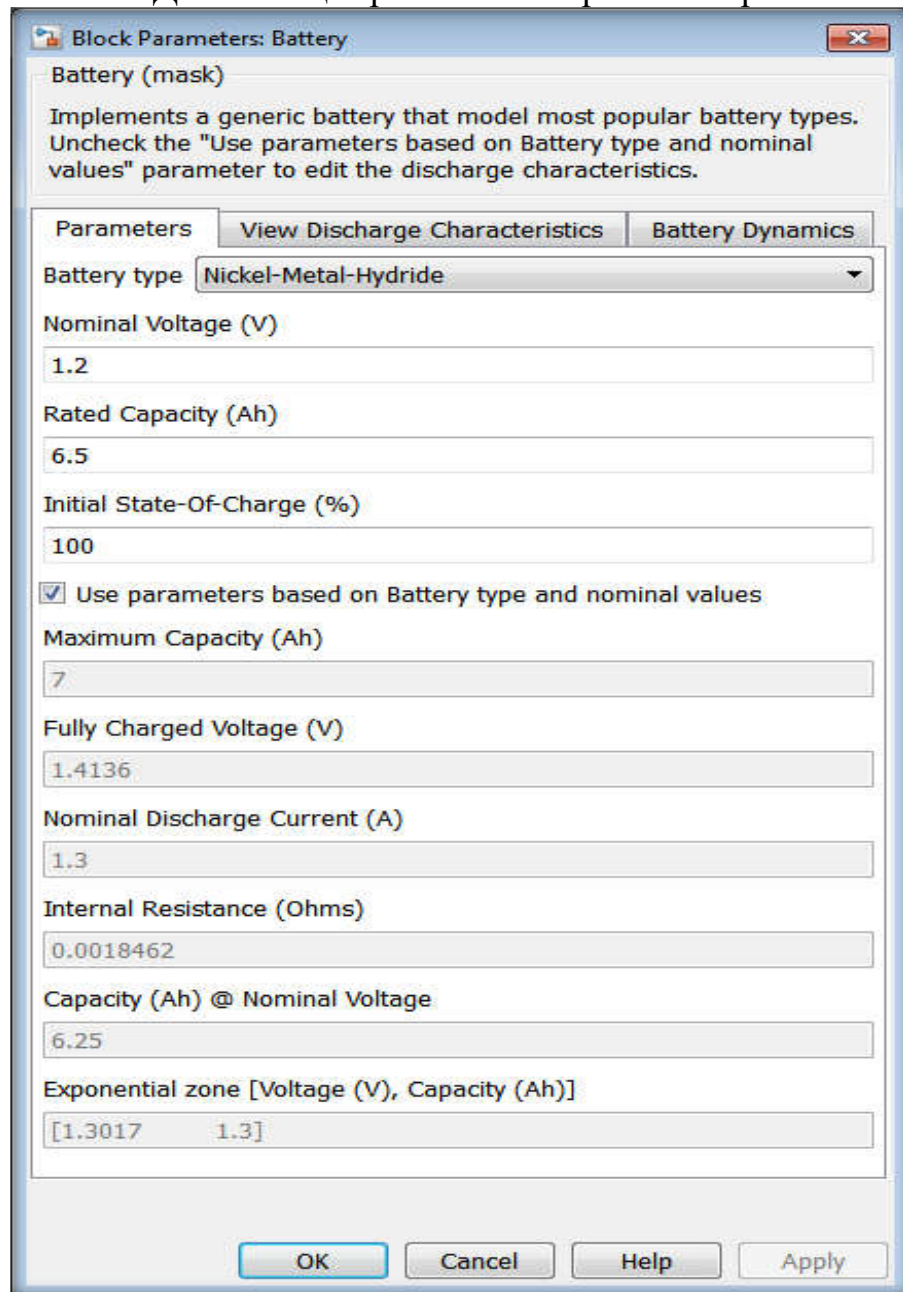
Эквивалентті схема параметрлері оның разряд сипаттамалары негізінде батареяның нақты түрін көрсету үшін өзгертілуі мүмкін. Түрлік разрядта көрсетілгендей бұның қисығы үш секциядан тұрады:

Бірінші секция батарея зарядталған кезде кернеудің экспоненциалды төмендеуі болып табылады. Батарея түріне байланысты, бұл аймақ, кең немесе аз.

Екінші секция батареяның номиналды кернеуінен төмен кернеуге дейін батареядан жұмсалуды мүмкін заряд болып табылады.

Үшінші бөлік-бұл кернеу тез түскен кездегі батареяның толық разрядын көрсетеді. Батарея тогы теріс болғанда, батарея зарядының сипаттамасына сәйкес зарядталады.

Диалогтық терезе және көрсеткіштері



Сурет 2.6 – Диалог терезесін қарау

Параметрлер қосымшасы ұяшық параметрлерін өзгеруін қамтамасыз етеді:

1) Батарея түрі батареяның төрт түрі үшін алдын ала белгіленген зарядты жинайды:

- Қорғасынды-қышқылды;
- Литий-ионды;
- Никель-кадмийлық;
- Никель-металл-гидридті.

2) Номиналды кернеу разряд сипаттамаларының сызықтық аймағының соңын көрсетеді, В;

3) Батареяның номиналды сыйымдылығы Ач –ампер-сағаттарда өлшенеді.;

4) Зарядтың бастапқы жағдайы, %;

5) Батарея зарядының бастапқы күйі (SOC). 100% толық зарядталған батареяны көрсетеді және 0% бос батареяны көрсетеді. Бұл параметр модельдеудің бастапқы шарты ретінде қолданылады және разряд қисығына әсер етпейді (*Plot* опциясын қолдану кезінде);

6) Батарея Түрі мәндерінің негізінде параметрлерді пайдаланады;

7)Таңдалған батарея түріне, номиналды кернеу мен номиналды сыйымдылыққа байланысты диалог терезесінің жазбаларындағы тиісті параметрлерді жүктейді;

8)Алдын ала белгіленген үлгі пайдаланылса, толық параметрлері өзгертілмейді. Егер разряд қисығын өзгерткіңіз келсе, әдеттегі параметрлерді жүктеу үшін батарея түрін таңдаңыз, содан кейін құсбелгіні алып тастаңыз, егжей-тегжейлі параметрлерге қол жеткізу үшін батарея түрі мен номиналдық мәндерге байланысты параметрлерді пайдаланады;

9)Максималды теориялық сыйымдылық (Q), батареяның максималды кернеуі пайда болған кезде. Бұл мән, әдетте, номиналды сыйымдылықтың 105% мәніне тең;

10. Берілген разряд тогы үшін зарядталған батареяның толық кернеуі. Толық зарядталған батарея-бұл жүктемесіз кернеу емес, яғни В көрсетеді;

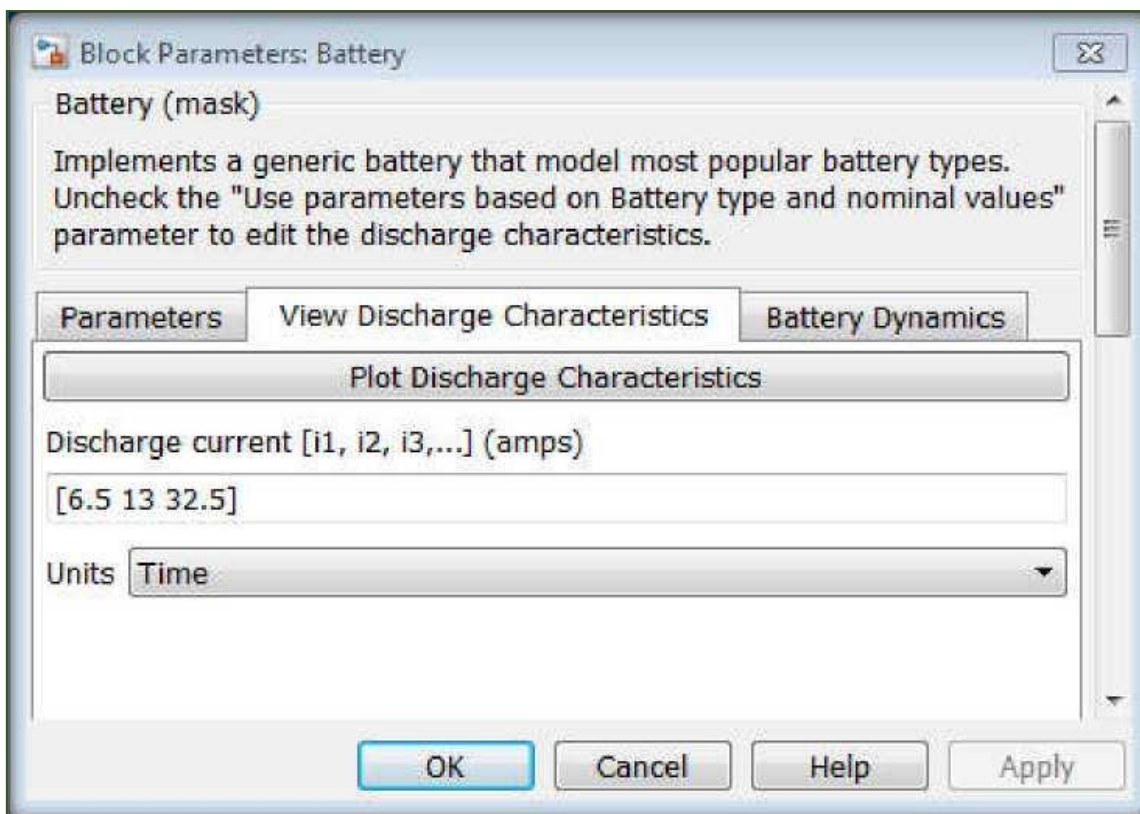
11. Разряд қисығы өлшенген номиналды разряд тогы. Мысалы, 1.5 А ч NiMH батареясы үшін номиналды сыйымдылықтың 20% құрайды: $(0,2 * 1,5 \text{ А} \cdot \text{ч} / 1\text{ч} = 0.3 \text{ А})$, А;

12. Ішкі қарсылық. Егер алдын ала орнатылған үлгі қолданылса, онда жалпы мән жүктеледі, бұл номиналды қуаттың 1% (номиналды кернеу ■ батареяның номиналды сыйымдылығы) сәйкес келеді. Кедергі циклдардың зарядты және разрядты кезінде тұрақты болуы тиіс және Ток амплитудасына байланысты өзгермейді, Ом;

13. Номиналды кернеу кезіндегі сыйымдылық. Өткізу қабілеті (QmA) кернеу номиналды мәннен төмен түспегенше батареядан алынады. Бұл мән E_{cr} және Q_{max} арасында болуы тиіс және сағ- пен белгіленеді;

14. Экспоненциалды аймақ [кернеу (В), сыйымдылық (а сағ)]. Кернеу (U_{exp}) және сыйымдылық (Q_{exp}) экспоненциалды аймақ соңына сәйкес келеді. Кернеу V_{MOW} және толық арасында болуы керек. Сыйымдылығы 0 және Q_{nom} арасында болуы керек.

Разряд сипаттамаларын қарау.



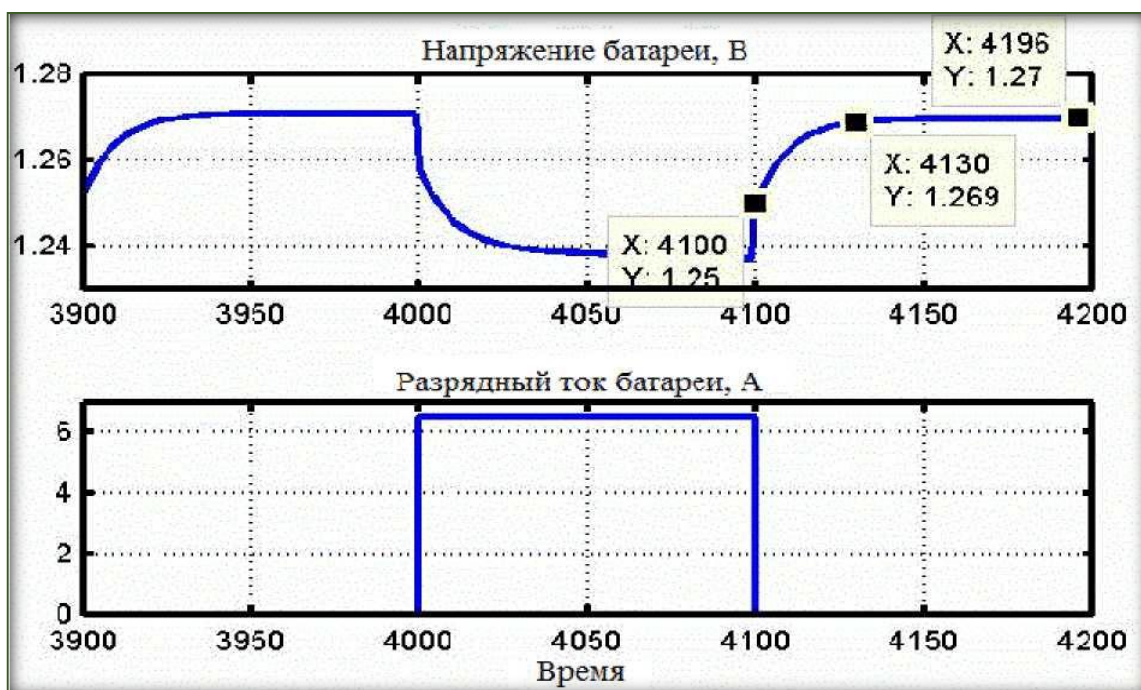
Сурет 2.7 - Зарядтау сипаттамасының диалог құру терезесі. Разряд сипаттамасының аумағы.

Екі сызбадан тұратын пішінді құру үшін мына сипаттамаларға тән болуы қажет:

Бірінші сызбада разрядтың қисық сызығы бар, (бұл номиналды разряд тоғы кезінде) ал екінші сызбада берілген тоқ кезіндегі разрядтың қисық сызығын бейнелейді. Разрядты тоқтың көрсеткіші әртүрлі мәндерді тапсыруға мүмкіндік бере алады. Бұл тоқтардың разрядтық сипаттамалары сызбаның екінші бөлігінде берілген,

Өлшеу бірлігі. X осі бойынша көру үшін Ампер сағатын немесе уақытын таңдап алу керек.

Алмасу үрдісінің уақыты (соңғы мәнінен 95%).

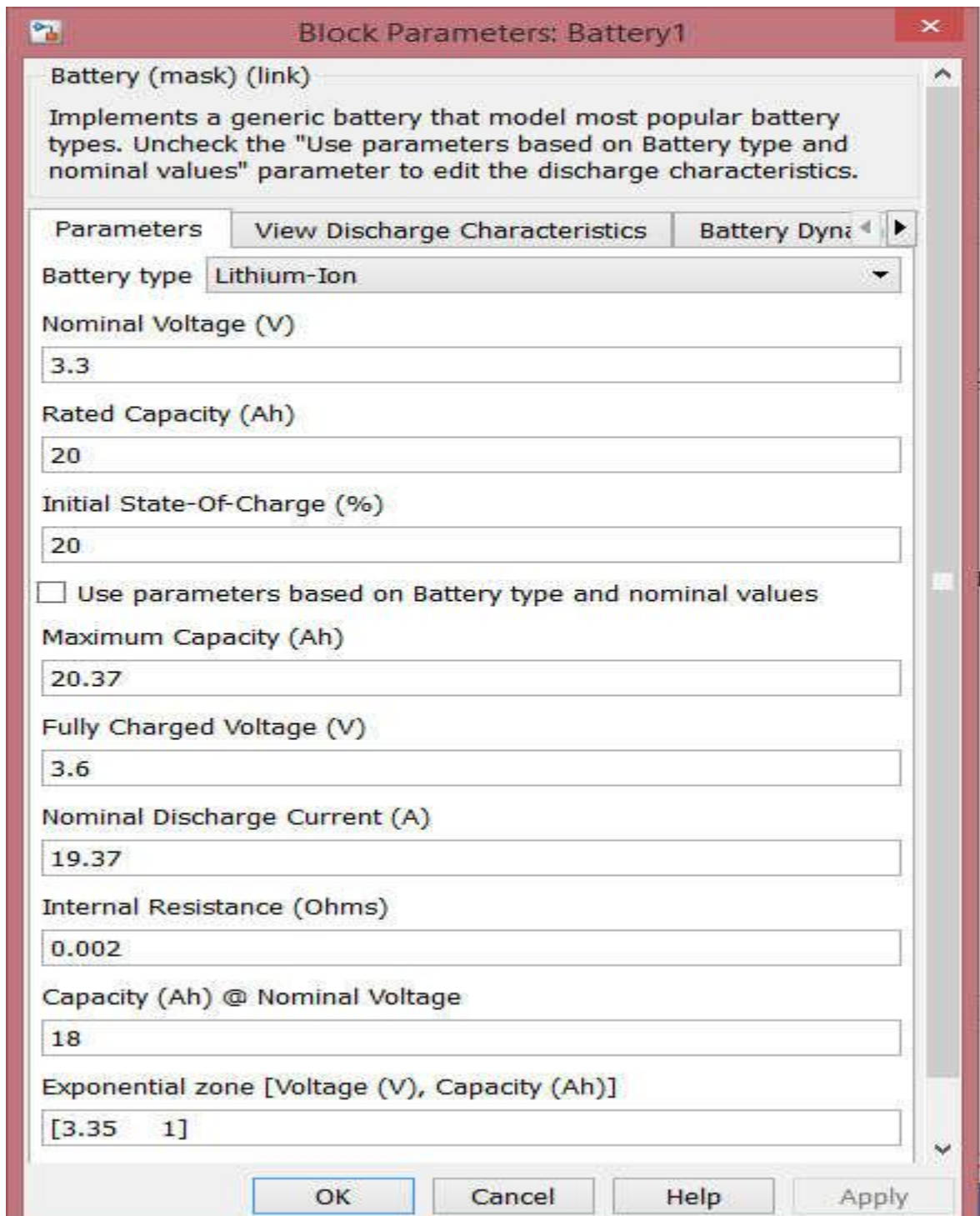


Сурет 2.8 – Батареяның уақытша диаграммасы

Бұл мысалда уақыттың тұрақты 30 секундтық көрсеткіші бейнеленген. $LiFePO_4$ ұяшықтарына диалогтық терезенің көрсеткіштерін енгіземіз. Берілген сипаттаманы алу үшін бізге кілттік көрсеткіштер қажет. Осыған байланысты төменде көрсеткіштерді келтіреміз:

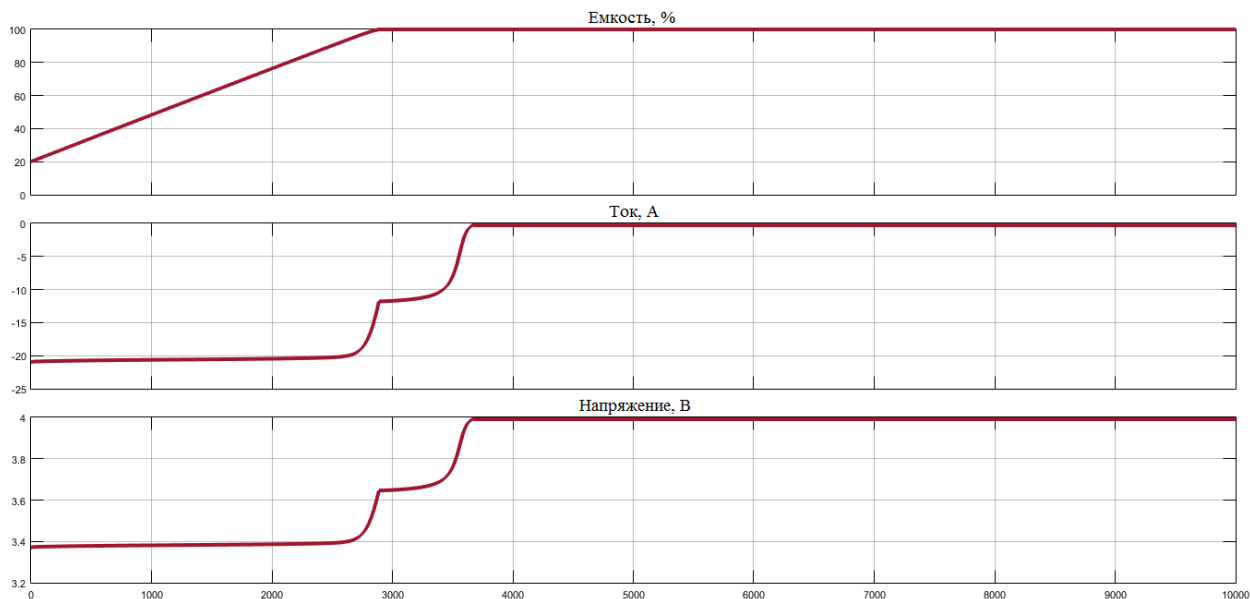
- 1) Номиналды кернеуі 3,3 В;
- 2) Номиналды сыйымдылық 20 А сағ;
- 3) Максималды сыйымдылық 20,37 А сағ – батареяның разрядтық сипаттамасы бойынша анықталады
- 4) Толық зарядталған ұяшықтың кернеуі 3,6 В;
- 5) Батарея разрядының номиналды тоғы 19,37 В;
- 6) Ұяшықтың ішкі кернеуі 0,001 Ом;

Номиналды кернеу 18 А сағ болатын сыйымдылық зарядтық-разряд кестесі бойынша анықталады, біздің жағдайда 3.3 В құрайды. Экспоненциалды кернеу аумағы 3,35 В және 1 А сағ жалпы сипатынан алынып тасталады.



Сурет 2.9 - LiFePo4 ұяшықтарының белгіленген көрсеткіштері

2.5 LiFePo4 ұяшықтарының зарядталу үрдісін үлгілеу



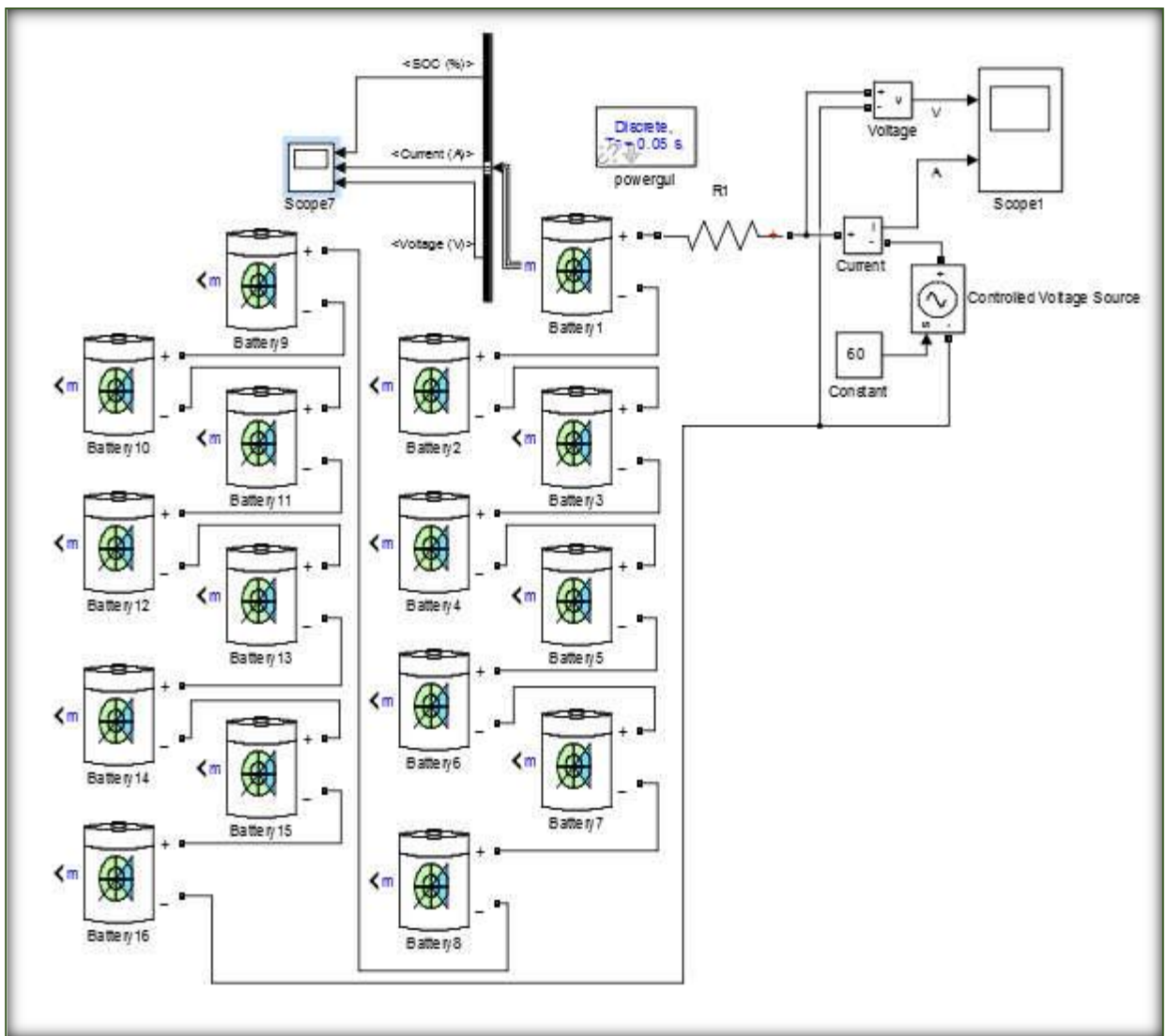
Сурет 2.10 - LiFePo4 ұяшықты қуаттау үрдісін үлгілеу

Жоғарыда көрсетілген суретте аккумуляторлық батареяның қуаттану үрдісі бейнеленген. Оның қуаты 4 В кернеуінде 1С-ке жақын токпен өтеді. Суреттен көргеніміздей ұяшықтардың толық қуаттануына кеткен уақыт мөлшері 20Ач сыйымдылығы бойынша 2900 секунд немесе 48 минутты құрайды.

Егер, қуаттау үрдісін тоқтатпаса онда ұяшықтардың кернеуі кернеу көзіне дейін ұлғаяды. Бірақ бұл бізге тәжірибеде үлгі ретінде көрсету барысында ұяшық істен шығып жұмыс істемейді, не болмаса өздігінен тұтанып, өртке әкеліп, нәтижесінде автоматты көлік құралының жойылуына әкелетіндігін көруге болады. Бұндай жағдайлар үшін ұяшықтардың кернелуіне бақылау қажет және бұл жөнінде біз келесі тарауда қарастырмақпыз.

2.6 Батареяның математикалық үлгісі

Жоғарғы өрісті КПД мен түрлену кезінде аз деңгейде жойылуын қамтамасыз ету үшін қазіргі заманауи талаптарға сәйкес келетін инверторлар ең аз дегенде 48 В қажет. Бұндай кернеуді алу үшін сатылы тізбек арқылы 16 ұяшықты жалғап қосу қажет.

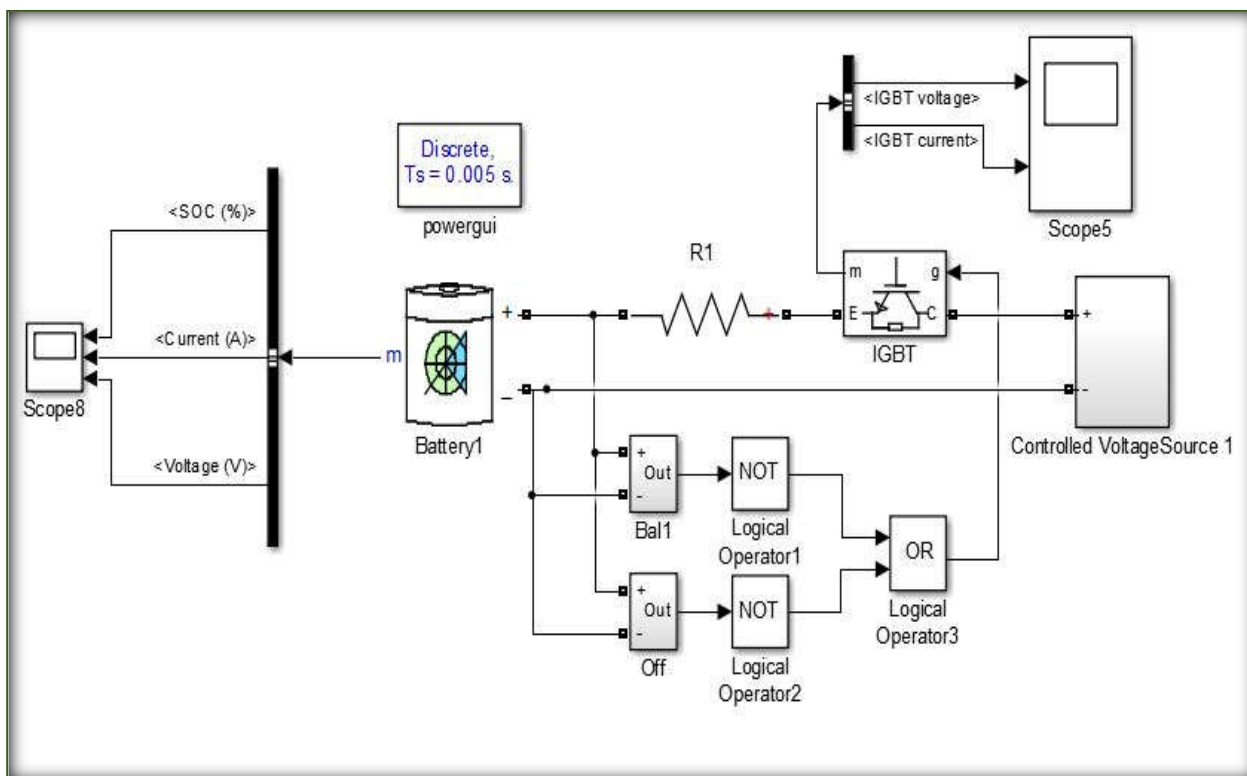


Сурет 2.11 тізбекті өзара жалғанған ұшықтардан тұратын батареяның математикалық үлгісінің сызбасы

Қуаттау үрдісін қамтамасыз ету үшін бақыланатын кернеу көзінің кірісіне 60-қа тең константаның сигналы беріледі.

3 Аккумуляторлық батареяның теңдестірілу жүйесінің математикалық үлгісі

3.1. Аккумуляторлық ұяшықтарға бақылау жүргізуге арналған теңдестірілген жабдықтың үлгісі

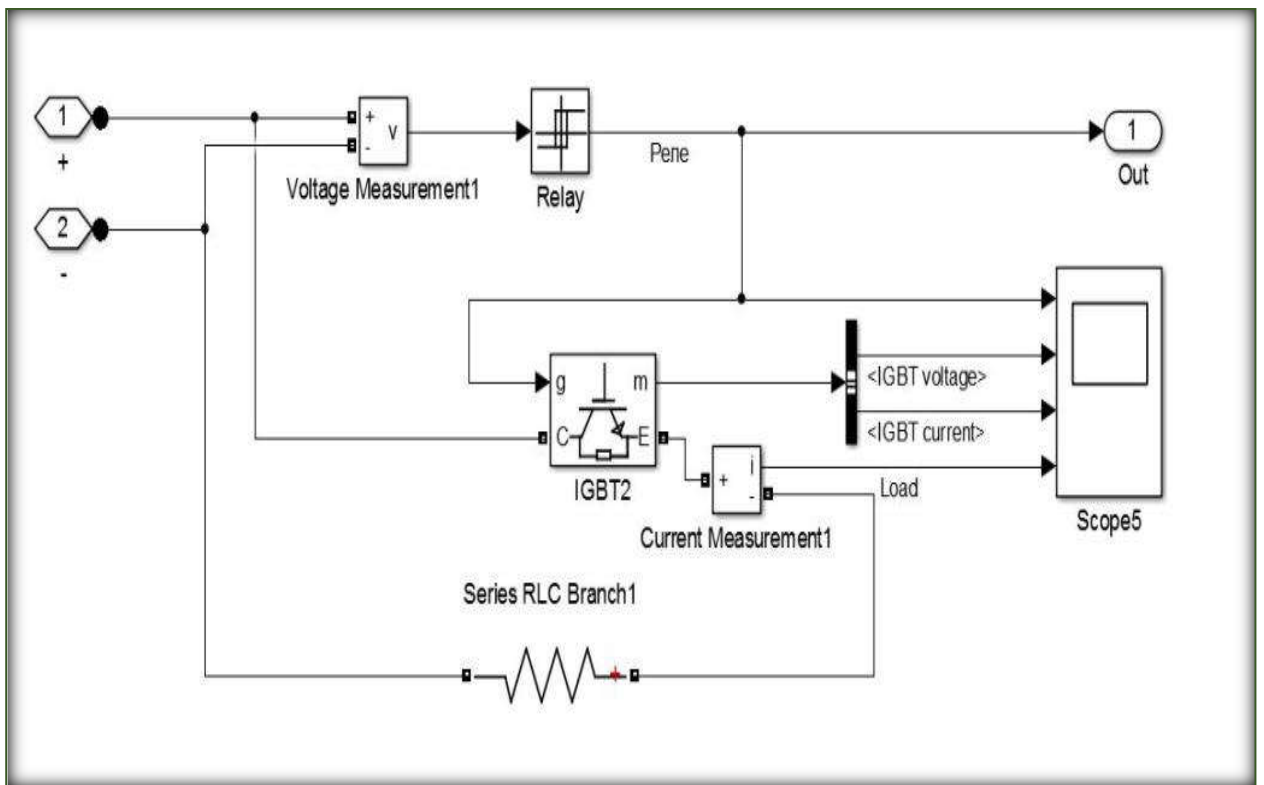


Сурет 3.1- Теңгергіші бар ұяшықты зарядтың математикалық үлгісі мен зарядты тоқтату жүйесінің сызбасы

IGBT элементі транзистордың математикалық үлгісін көрсетеді, бұның көмегімен зарядталу үрдісін реттеп және бақылап отыруға болады сондай ақ батареяны қуаттау үрдісі аяқтала салған бойда ақ қуат көзінен сөндіруге болады.

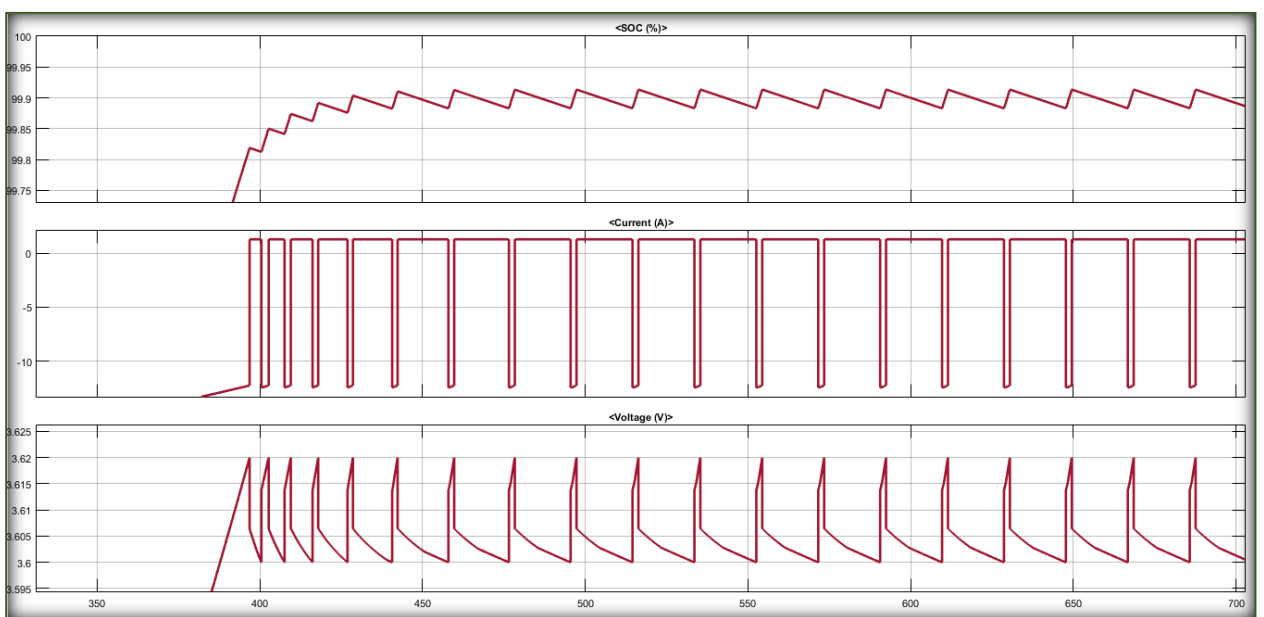
NOT элементі дабыл инверсиясын өткізеді.

OR элементі логикалық, дәлірек айтқанда ойлау операцияларын жүзеге асыру үшін немесе теңдестіргіш дабылдарымен сондай ақ тоқтату немесе тежегіш сигналдарын орындауға тағайындалған.



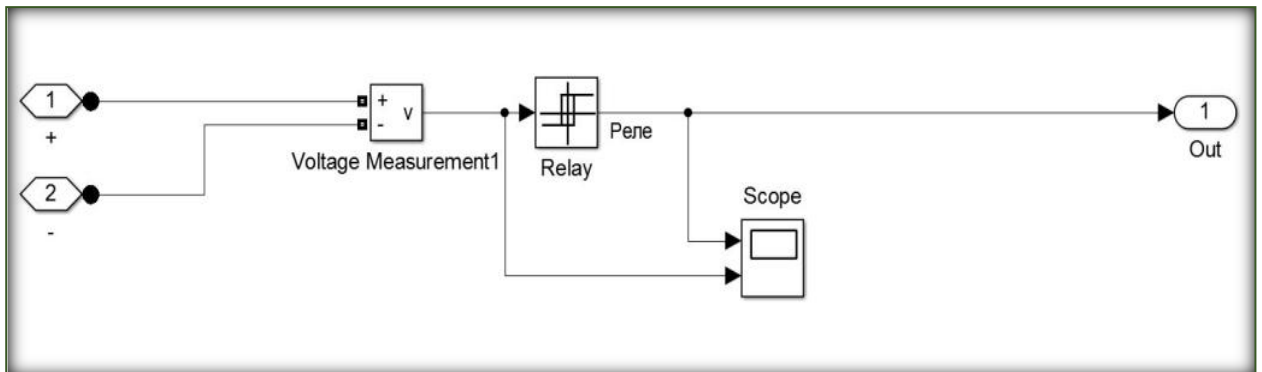
Сурет 3.2- Белсенді емес теңдестіргішті жүзеге асыратын математикалық үлгі

Relay логикалық тежегіші гистерезисті релесі бар үлгі болып табылады. Ұяшықтарға қосылған кернеу хабаршысынан берілген дабыл реле кірісіне келіп түседі. Кернеу 3,62 тең көрсеткішіне қол жеткізілген кезде реле 0 деңгейінен 1-ге ауысады. Реле кернеуі төмендеген кезде 3.6 көрсеткішінен кері қарай 0-ге тең болады. Жұмыстың нәтижесі төменде көрсетілген уақытша диаграммада айқын көрсетілген.



Сурет 3.3 – Ұяшықтардың теңгерімдік жүйесінің математикалық үлгісі

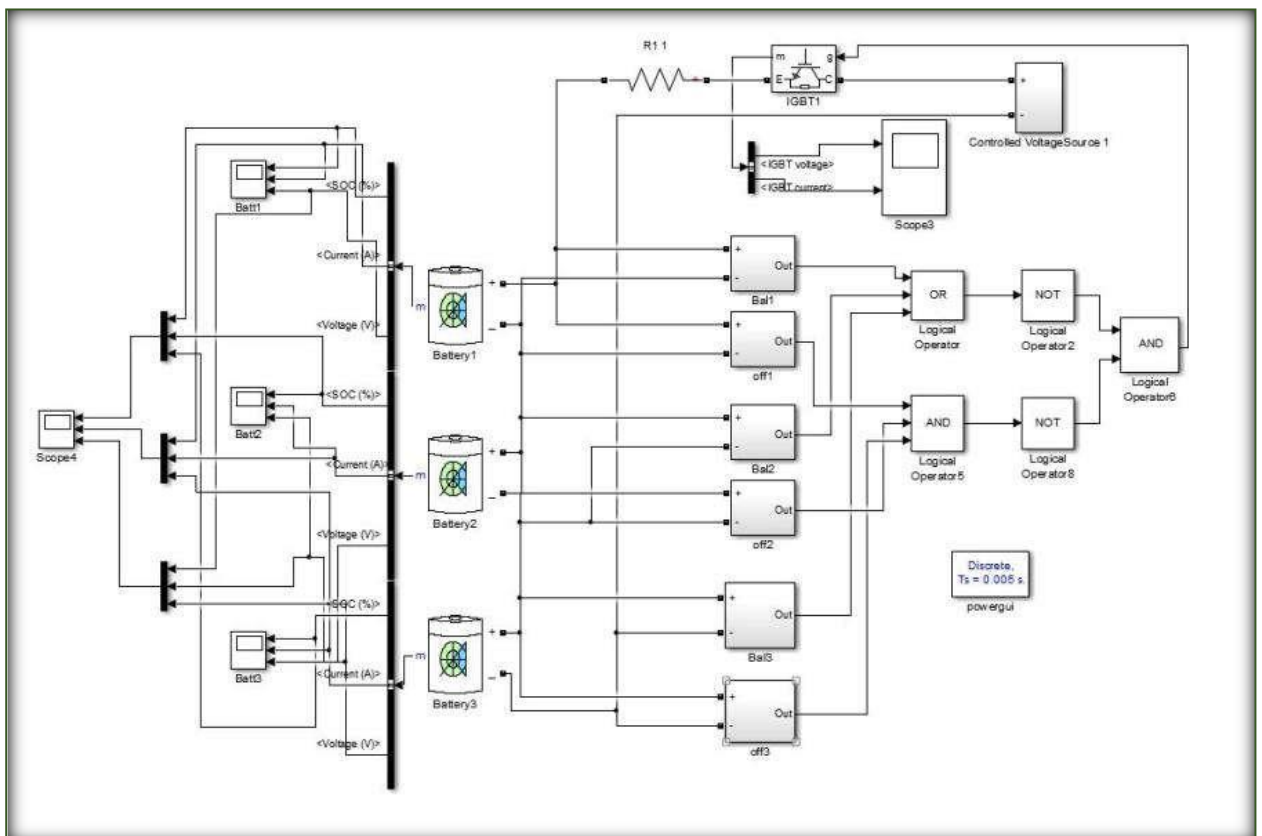
Суретте LiFePo4 ұяшықтарының теңдестіру жүйесі бойынша осцилограмма жұмысы көрсетілген. Сызбада көрсетілгендей кернеудің көрсеткіші 3.62 деңгейінен аспайды. Осыған байланысты батарея қайта қуаттанудан сақтанған.



Сурет 3.4 – Зарядтың тоқтау жүйесінің математикалық үлгісі

Суретте *LiFePo4* ұяшықтарының теңдестіргіш жүйесінің осцилограммасы көрсетілген, сызбада көрсетілгендей кернеу 3.62 аспайды. Яғни, бұл дегеніміз батарея қайта қуаттанудан өте жоғары деңгейде қорғалған. Суретте аккумуляторлық батареяның тоқтатылу жүйесінің құрылымы көрсетілген.

3.2 Аккумуляторлық батареяны бақылауға арналған теңдестіргіш құрылғының үлгісі



Сурет 3.5- Зарядтың тоқтау жүйесімен бірге батареяның теңдестіргіш жүйесінің математикалық сұлбасы

Алдыңғы сұлбада көрсетілгендей тағы да бұған 15 ұяшықтар қосылды, олар өзара бір бірімен жалғанған. Сызбаның дұрыс жұмыс істеуі үшін теңдестіргіштердің шығысына *LogicalOperator OR* блогы жалғанған, бұл логикалық қызметті немесе жиынтықтау қызметін орындайды. Егер, қандай да бір ұяшықта теңдестірілу үрдісі басталатын болса, онда батарея зарядының тізбегі уақытша тоқтатылады.

Осы сипаттамаларды аяқтай келе мынадай қорытындылар жасалынды:

- *LiFePo4* ұяшықтары үшін теңдестіргіш баптауы жүргізілді. Жүйе кернеуі 3,62 ден жоғары көрсеткішке жеткізбей зарядтайды;
- 16 ұяшықтардан тұратын аккумуляторлық батарея үшін теңдестіру баптауы жүргізілді, нәтижесінде жүйенің басқа да ұяшықтар санына таралатындығы мүмкін екендігі анықталды;
- Жұмыстың барысында бізге ұяшықтарды зарядтау кезінде бақылау жүргізу жүйесін даярлауға мүмкіндік алдық.

5 Құрылымдық бөлім

5.1 Элементтік базаны таңдау

Кернеуді бақылау қызметінің өзін тіректік кернеумен жабдықталған кез-келген компраматор орындай алады. Алайда компраматорды бізге қолдану тиімсіз болып табылады. Біздің шағын кестеміз бар, ол *TL431* көрсеткішімен сипатталады.

TL431 шағын кестесі –дегеніміз бұл берілген температуралық тұрақтандыруы бар үш бұрыштық реттегіші бар шунт-көліктік, кәсіптік және әскери қолданыс аясында температуралық ауқымы үшін тамаша болып табылады. Шығыс кернеуі V_{ref} көрсеткішінен кез-келген мәнмен берілуі мүмкін (шамамен алғанда 2,5 В) 36 В дейінгі екі сыртқы резисторлар көмегімен жүзеге асырылады. Бұл чиптердің типтік импедансы 0,2 Вт құрайды. Өте тік сипаты бар белсенді шығыс сұлбасы бұл чиптерді *Zenner* (стабилитрон) диодының керемет алмастырғышы ретінде көп рет қолдануға жарамды деп есептеледі, атап айтқанда қуат көзін комутациялайтын және қайта түрлендіретін тақтадағы реттегіштерді алуға болады.

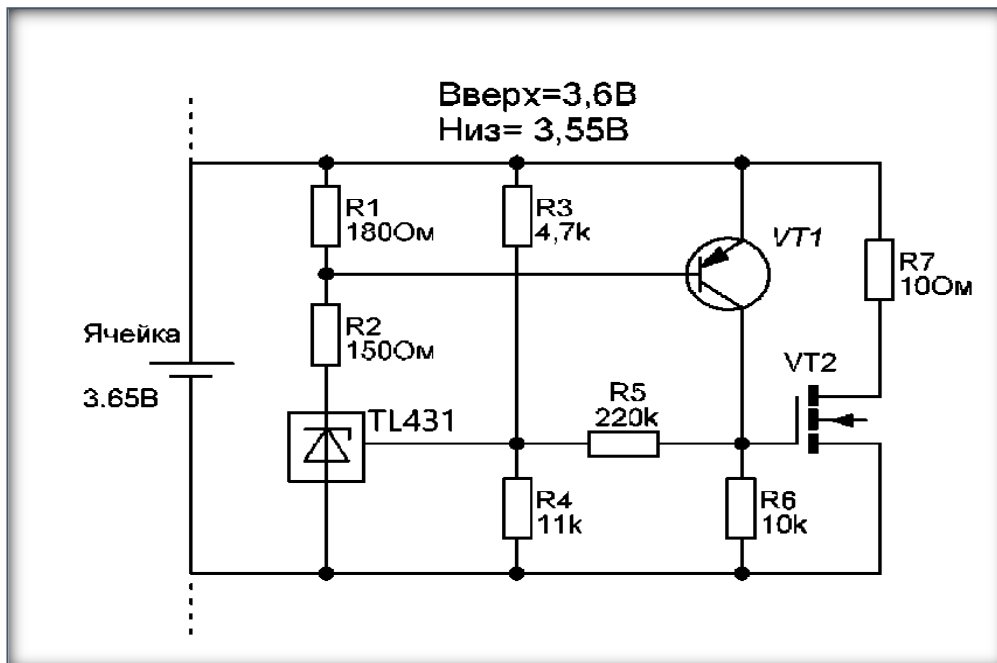
Тіректік кернеумен салыстыруды жақсы жүзеге асырады, алайда күшті кілтке бір реттік бұйрықты бере алмайды. Бұның орнына табалдырыққа жақындаған уақытта біртіндеп қуатты кілтті белсенді жартылай ашық тәртіпке алмастырады, кілт қатты қыза бастайды, ал сұлба жұмыс істемейді. Міне дәл осы, яғни атап айтқанда *TL431* толыққанды қолдануға мүмкіндік бермеген мәселені шештік деп айта аламын. Шмит триггері тәрізді жұмыс істеуі үшін *TL431* өзгерту қажет. Әрине, нәтижесінде мінсіз теңгерім, дәлірек алғанда өте нақты, қарапайым, қуаттық кілтке нақты бұйрық бере алатын теңгерім құрылды.

TL431 Шмитт триггеріне өзгерту р-п-р транзисторы *T1* мен резистор *R5* қолдану арқылы жүзеге асырылады. Бұл сұлба былайша жұмыс істеу қажет-*R3, R4* бөлгіштері арқылы бақыланатын кернеу табалдырығы анықталады. Басқару электродында кернеу 2,5 В жеткен кезде *TL431* – ашылады, бұл кезде *T1* транзисторы да ашылады.

Бұл кезде коллектордың потенциалы жоғарылайды және осы кернеудің жарты бөлігі *R5* резисторы арқылы кернеу басқарушы *TL431* электродына түседі. Сондай ақ *TL431* тасқын тәріздес қанықтыра бастайды. Сұлба анық айқындалған гистерезиске айналады, яғни іске қосылуы 3,62 В кезінде жүрсе, ал сөндірілуі - 3,6 В кезінде жүзеге асырылады. Бұл ретте қуатты кілттің бекітпесінде өте тік шебтері бар басқарушы импульс қалыптасады және қуатты кілттің белсенді режимге түсуі-алынып тасталады. Шынайы кестеде теңгерімді резисторлы тоқ 0,365 А кезінде күш кілтінің ағыс-көзі ауысуында кернеудің төмендеуі тек 56 м В құрайды. Бұндай кезде кілттің өзі барлық уақытта салқын болып қала береді. Әрине осылай талап етіледі. Бұл сұлбаны кез келген кернеуді басқару үшін оңай әрі тез баптауға болады. Теңгерімнің максималды тоғының шамасы *R7* резисторы арқылы жүзеге асады сонымен бірге,

аккумулятор секциясындағы кернеу арқылы да орындалады.

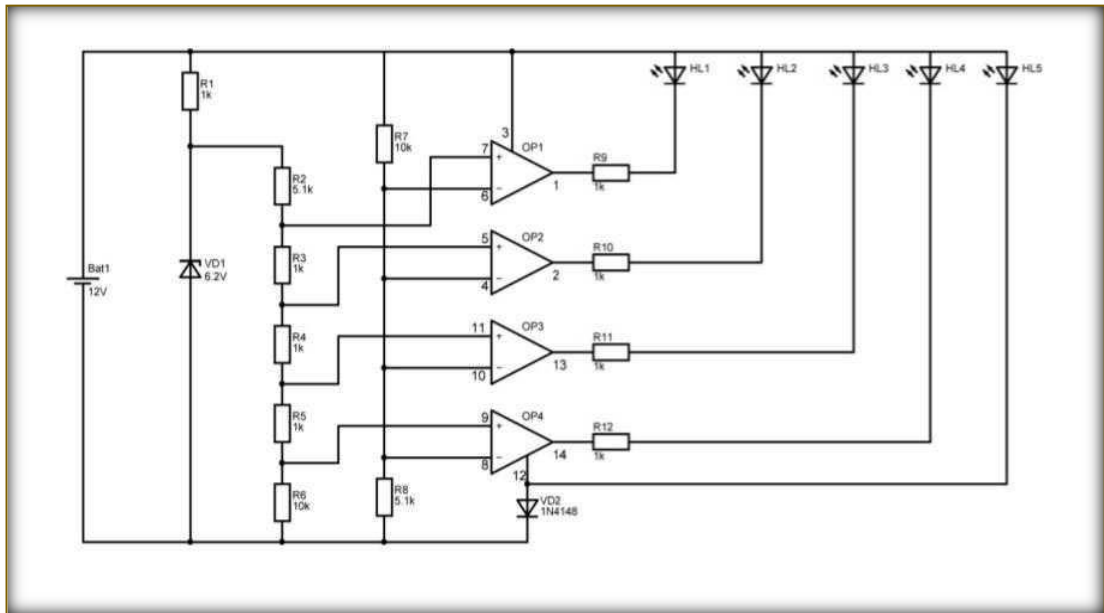
Төменде *LiFePo4* үшін пассивті теңгерімнің қағидалық сұлбасы келтірілген



Сурет 4.1 – Қағидалық сұлба

5.1 Сұлбаны таңдау

Аккумуляторлық батареяларды пайдалану үрдісі барысында оның зарядталу деңгейіне бақылау қажеттілігі туындайды. Осы мақсаттағы көптеген сұлбалар бар, бірақ бізді оның құнының төмендігі мен қолданудың қарапайымдылығы қызығушылықты туындатады, сонымен бірге оны таратудың оңайлығы мен дәлдігі, $LiFePO_4$ аккумуляторымен жұмыс істеу мүмкіндігі де қажет.



Сурет 5.1 – Аккумуляторлық батареяның қуаттану дәрежесінің индикацияның қағидалық сұлбасы

Осы сұлбада VD1 стабилитрон тірек кернеуінің негізгі көзі болып табылады, сонымен бірге R2-R6 зарядтау дәрежесін анықтауға арналған кернеу бөлгіштері, R7-R8 кернеу бөлгіштері, OP1-OP4 компараторлары (R7-R8 және R2-R6 бөлгішінен кернеу мәнін салыстырады), R9-R12 тоқты шектеуші резисторлар, қуаттылық деңгейін анықтауға арналған HL1-HL5 жарық диодтары VD2 сұлбасының дұрыс емес полярлығын қорғайды. Осы сұлбаны төрт тіркелген компараторлары бар LM339 шағын сұлбасының негізінде жүзеге асыруға болады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Техникалық тапсырманың деректеріне сүйене отырып, аяқталған біліктілік жобасын орындау нәтижесінде, аккумуляторлық батареяны басқару жүйесінің математикалық үлгісі құрылды. Автономды электр көлігі құралдарын қоректендіру көзі ретінде пайдаланылатын аккумуляторлық ұяшықтардың ең оңтайлы түрі, LiFePo_4 болып табылады. Жеткілікті дәрежедегі салмағы бар көлемді көрсеткіштеріне қарамастан олар пайдалану барысында қауіпсіз болып табылады және қолдану қоры ауқымды болып келеді.

Аккумуляторлық батареяны басқарудың тағайындалған жүйесі жеке ұяшықтарды қайта зарядтау тәртібін болдырмауы себепті, аккумуляторлық батареяның жұмыс қорын едәуір ұзартуға мүмкіндік береді. Қағидалық арнайы электрлік сұлбасы тағайындалды, элементтер тізімі құрастырылды. Даярланған бақылау алгоритмдері аппараттық жағдайда түрлік элементтік негізде жүзеге асырылуы мүмкін, бұл шет елдік осыған ұқсас тауарлармен бәсекелестікті туындатуға мүмкіндік береді.

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Гельман, М.В. Преобразовательная техника: Учебное пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. - Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. - 425 с.
2. Митин, Г.П. Условные обозначения в отечественных и зарубежных электрических схемах. - М.: Изумруд, 2003. - 224 с.
3. Чип и Дип: микросхемы - <http://www.chipdip.ru/catalog/sensors/>.
4. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. 1-е издание, 2007 - 288 с.
5. *LiFePo4* ячейка аккумуляторной батареи. - <http://www.a123systems.com/>.
6. Индикация АКБ. - <http://ledjournal.info/shemy/indikator.html>.
7. Зарядка аккумуляторов батарей. — <http://www.mobipower.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=233>.
8. Элементы информационной электроники систем управления вентилями преобразователями: монография / М.М. Дудкин, Л.И. Цытович.
9. Способы и схемы балансировки АКБ. — http://radioskot.ru/publ/zu/zarjadka_neskolkih_akkumuljatorov/8-1-0-909.
10. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналогово-цифровых электронных устройств 2-е изд., испр. - М.: Издательский дом «Додэка- XXI», 2007. - 528 с.
11. А.К.Ковальчук, Д.Б.Кулаков, С.Е.Семёнов: “Управление исполнительными системами двуногих шагающих роботов”. Бауман атындағы Мәскеу мемлекеттік техникалық университет 2007 ж. 160б.
12. <https://studbooks.net/2119191/>
13. Д.Н. Попов: “Механика гидро- и пневмосистем”, 2-шығарылым. Бауман атындағы Мәскеу мемлекеттік техникалық университет, 2002ж. – 320б
14. Д.Н.Попов: “Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем”, Машина жасау, 1987ж.464б
15. Д.Н. Попов: “Механика гидро- и пневмосистем”2-шығарылым. Бауман атындағы Мәскеу мемлекеттік техникалық университет. 2002ж. – 320 б
16. <http://stroy-technics.ru/article/apparatura-upravleniya-gidroprivodami-avtomobilnogo-krana>
17. https://sitekid.ru/izobreteniya_i_tehnika/roboty/ekzoskelety.html
18. <https://b-ok.org/book/2849022/d35913>
19. <http://www.hydro-pnevmo.ru/topic.php?ID=41>
20. <http://www.hydronik.ru/stati/principy-raboty-gidrocilindra>