



**ӘУЕ КӨЛІГІ ЖӘНЕ ТЕХНОЛОГИЯЛАР
ВОЗДУШНЫЙ ТРАНСПОРТ И ТЕХНОЛОГИИ
AIR TRANSPORT AND TECHNOLOGY**

ӘОЖ 629.78

ГТАХА 89.25.21

https://doi.org/10.53364/24138614_2026_42_3_3

А.Б. Саурбекова^{1*}, Ә.С. Ғұсман¹

¹Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,
Алматы, Қазақстан

*E-mail: a.saurbekova@aves.kz

**ТӨМЕН ЖЕР ОРБИТАЛАРЫНДА ШАҒЫН ҒАРЫШ АППАРАТТАРЫН
БАСҚАРУДЫҢ ПАЙДАЛЫ ЖҮКТЕМЕСІН ЖӘНЕ БОРТТЫҚ КЕШЕНІН
ЭНЕРГИЯ ТҰТЫНУДЫ ОҢТАЙЛАНДЫРУДЫҢ ЗАМАНАУИ ТӘСІЛДЕРІ**

***Аңдатпа.** Шағын ғарыш аппараттары, әсіресе CubeSat тәрізді наноспутниктер, шектеулі өлшемдері мен қуат көздерінің аздығына байланысты энергия балансын сақтау мәселесіне жиі тап болады. Мұндай аппараттардың негізгі артықшылығы – олардың салыстырмалы түрде төмен құны, жылдам әзірленуі және ғылыми зерттеулер мен технологиялық сынақтарды жүзеге асыруға қолайлы болуы. Алайда олардың шағын көлемі мен массасы энергиямен қамтамасыз ету жүйесіне қатаң шектеулер қояды. Осыған байланысты энергияны тиімді пайдалану шағын спутниктерді жобалау мен пайдалану кезінде негізгі инженерлік міндеттердің бірі болып саналады.*

Бұл мақалада төменгі Жер орбитасында қызмет ететін шағын спутниктердің пайдалы жүктемесі мен борттық басқару кешенінің энергия тұтынуын төмендету бойынша заманауи тәсілдер талданады. Алдымен шағын ғарыш аппараттарының құрылымдық ерекшеліктері, олардың негізгі жүйелері және энергетикалық балансы қарастырылады. Сонымен қатар энергия тұтыну құрылымына әсер ететін негізгі факторлар, соның ішінде орбиталық жағдайлар, күн панельдерінің тиімділігі және аккумуляторлық жүйелердің сипаттамалары талданады.

Одан кейін пайдалы жүктемелердің, мысалы, оптикалық камералардың, радиобайланыс модульдерінің және түрлі ғылыми сенсорлардың энергиясын үнемдеу әдістері сипатталады. Бұл әдістерге деректерді өңдеудің тиімді алгоритмдерін қолдану, құрылғыларды кезеңдік белсендіру, төмен қуатты режимдерді пайдалану және энергия үнемдейтін электрондық компоненттерді енгізу жатады.

Сондай-ақ борттық басқару жүйелерінің энергия тиімді архитектуралары, микроконтроллерлер мен арнайы процессорларды қолдану мүмкіндіктері қарастырылады. Энергиямен қамтамасыз ету жүйелеріндегі соңғы технологиялық жаңалықтар, интеллектуалды энергия басқару алгоритмдері және қуатты динамикалық бөлу тәсілдері талқыланады. Нақты CubeSat жобаларының деректеріне сүйене отырып, энергияны оңтайландырудың тәжірибелік мысалдары келтіріледі. Сонымен қатар салыстырмалы кестелер арқылы әртүрлі техникалық шешімдердің сипаттамалары талданып, болашақта шағын спутниктердің энергия тиімділігін арттыру бағыттары бойынша ұсыныстар жасалады.

***Түйін сөздер:** шағын ғарыш аппараттары, CubeSat, энергия тұтынуын оңтайландыру, пайдалы жүктеме, борттық басқару жүйесі, электр қуат жүйесі, энергия тиімділігі, төменгі Жер орбитасы.*

Кіріспе.

CubeSat санатындағы наноспутниктер ғарышты зерттеу мен жерді зондтау салаларында кең қолданыс табуда. Дегенмен, олардың шағын корпусы мен шектеулі беткі ауданы орбитада жеткілікті электр энергиясын өндіруге және сақтауға күрделі шектеулер қояды. Шағын аппараттардың арзан, жылдам дайындалуы және жаппай ұшырылуы мүмкіндігі көптеген ғылыми, коммерциялық және әскери миссияларды қызықтырады. Бірақ дәл осы артықшылықтар аясында энергиямен қамтамасыз ету басты шектеуші факторлардың бірі болып қалып отыр – шағын спутник бортында миссия талаптарын орындау үшін жеткілікті қуатты өндіру және сақтау басты қиындық саналады. Мысалы, CubeSat платформасына талап етілетін күрделі жүктемелерді (оптикалық лидар, жоғары өнімді байланыс жүйелері, т.б.) орналастырғанда, электр қуатын тұтыну ең өзекті мәселе ретінде туындайды.

Бұл шолуда алдымен шағын спутниктің типтік құрылымы мен энергия балансына тоқталып, одан әрі пайдалы жүктемелер мен борттық жүйелердің энергия тұтынуын төмендету тәсілдері қарастырылады. Энергиямен қамтамасыз ету жүйелеріндегі қазіргі заманғы шешімдер (мысалы, ең шекті қуат нүктесін қадағалау, жаңа жоғары тиімді күн батареялары, GaN-транзисторлы түрлендіргіштер және т.б.) және интеллектуалды басқару әдістері сипатталады. Нақты жобалардан алынған мәліметтер негізінде мысалдар келтіріліп, соңында зерттеу нәтижелері қорытындыланып, болашақ бағыттарға ұсыныстар беріледі.

Зерттеу материалдары мен әдістері.

Шағын ғарыш аппараттарының (ША), атап айтқанда CubeSat платформаларының энергетикалық тиімділігін зерттеу үшін жүйелік талдау және математикалық модельдеу әдістері қолданылды. Зерттеудің негізгі нысаны ретінде 3U форматындағы наноспутник алынды, өйткені бұл конфигурация энергия өндіру мен пайдалы жүктеменің көлемі арасындағы оңтайлы тепе-теңдікті қамтамасыз етеді.

Спутниктің құрылымдық моделі және жүйелері

Зерттеу барысында ША-ның жалпы құрылымы келесі негізгі ішкі жүйелерден тұратын модель ретінде қарастырылды:

- Пайдалы жүктеме: оптикалық камера және ғылыми сенсорлар;
- Борттық есептеуіш кешені (OBC): ARM Cortex-M негізіндегі энергия тиімді микроконтроллер;
- Электр қуат жүйесі (EPS): Күн панельдері, MPPT контроллері және Li-ion аккумуляторлар блогы [1].

Спутниктің ішкі архитектурасы мен компоненттерінің орналасуы SolidWorks ортасында жобаланды (1-суретті қараңыз). Бұл модель аппараттың массалық-инерциялық сипаттамаларын және күн панельдерінің тиімді ауданын дәл анықтауға мүмкіндік берді.



Сурет 1 – Шағын ғарыш аппаратының жалпы құрылымы

Энергетикалық баланстың математикалық моделі.

Энергетикалық баланс – спутник жұмысының маңызды бөлігі. Орбитадағы орташа генерация (Орташа орбиталық қуат, ОАР) спутник тұтынатын орташа қуаттан асуы немесе тең болуы тиіс. CubeSat форм-факторының қуат мүмкіндіктері шектеулі:

Кесте 1 – CubeSat платформаларының энергетикалық сипаттамаларын салыстыру

Параметр	1U CubeSat	3U CubeSat	6U CubeSat
Өлшемі	10 × 10 × 10 см	30 × 10 × 10 см	шамамен 10 × 20 × 30 см
Күн панелінің бір жағының ауданы	≈100 см ²	1U-ға қарағанда 3–4 есе үлкен	Ашылатын панельдермен айтарлықтай үлкен
Фотоэлемент тиімділігі	25–30% (GaAs көпқабатты)	25–30%	25–30%
Бір панельден максимал қуат	≈2 Вт	≈7–8 Вт	бірнеше панель арқылы ондаған ватт
Орбиталық орташа қуат (ОАР)	≈1.9–2.3 Вт	бірнеше ватт (1U-дан әлдеқайда жоғары)	Жер маңында ≈35 Вт
Марс орбитасындағы қуат	—	—	≈17 Вт
Пайдалы жүктеме мүмкіндігі	Тек қарапайым датчиктер	Күрделірек ғылыми жабдықтар	Жоғары энергия қажет ететін миссиялар
Қуатты арттыру әдістері	Тұрақты панельдер	Үлкен панель ауданы	Ашылатын күн қанаттары
Энергия сақтау	Литий-ион аккумуляторлар	Литий-ион аккумуляторлар	Литий-ион аккумуляторлар

Төменгі Жер орбитасындағы (LEO) ША жұмысын модельдеу үшін келесі есептеу әдістемесі қолданылды. Орбитаның толық периоды (T_{orbit}) 94 минутқа тең деп алынды, оның ішінде күн сәулесі түсетін фаза (T_{sun}) 60 минутты, ал Жердің көлеңкесіндегі фаза ($T_{eclipse}$) 34 минутты құрайды.

Орташа орбиталық қуатты (P_{avg}) анықтау үшін кеңейтілген формула қолданылды:

$$P_{avg} = \frac{P_{sa} \cdot T_{sun} \cdot \eta_{sol} \cdot \eta_{reg}}{T_{orbit}}$$

мұндағы:

P_{sa} – күн панельдерінің максималды қуаты;

$T_{sun} \cdot \eta_{sol}$ – орбитаның күн түсетін бөлігіндегі уақыт;

η_{sol} – зарядтау контроллерінің ПӘК-і (MPPT);

η_{reg} – кернеу реттегіштерінің ПӘК-і;

T_{orbit} – толық орбиталық период.

Бұл модель энергияны тұтынудың динамикалық профильдерін құруға және пайдалы жүктеменің жұмыс режимдерін оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Қуат тұтыну бюджеті. Спутниктің әрбір ішкі жүйесі тұтынатын қуаттың нақты балансын есептеу – жобалау кезеңінің маңызды бөлігі. Орбитадағы жұмыс кезінде жүйелер әр уақытта әртүрлі режимде болуы мүмкін, сондықтан жобалаушылар қуат бюджеті деп аталатын кесте жасайды – онда әр операциялық режимде (қалыпты ұшу, байланыс сеансы,

ғылыми дерек жинау, төтенше жағдай және т.б.) әрбір ішкі жүйенің қуат тұтынуы және жұмысының мерзімі (күндіз/түнде, пайыздық duty cycle) ескеріледі. Мысалы, 2U форматты SOC-і наноспутнигінің есептік қуат бюджетінің үзіндісі төменде келтірілген. Бұл аппараттың негізгі тұтынушылары – байланыс радиокұралы, реакциялық доңғалақтар блогы (ADCS атқарушылары) және борттық компьютер екені көрінеді; олардың әрқайсысы өз шыңдық қуатына ие, бірақ орбитада орташа алғанда төмендеу үлесін ғана қолданады (себебі үнемі қосулы емес немесе үнемі толық жүктемеде емес) [2].

Кесте 2 – 2U CubeSat (SOC-і миссиясы) қуат бюджетінің үлгісі

Ішкі жүйе	Орбиталық орташа қуаты (мВт)
Байланыс жүйесі (радио)	652
Бағдарлау жүйесі	600
Борттық компьютер (OBC)	398
Датчиктер (күн, магнитометр т.б.)	104
Батарея қыздырғышы және т.б.	425
Түрлендіру тиімділігінің жоғалуы	308
Барлық жүктеменің суммасы	~2487
Орбита бойынша өндіру (орташа)	~3182

Орбитадағы орташа генерация ~3,18 Вт, ал орташа тұтыну ~2,4 Вт құрайды, демек 28% артық маржа бар екені есептелген. Бұл маржа батареяны толық қуаттап, болжанбаған қосымша тұтыну пайда болса өтеуге қажет қор ретінде қалдырылады. Қуат бюджеті спутник миссиясының әр сатысында қайта қаралып, нақтыланып отырады және борттық құралдарды қосу-кесу кестесі де осы есептерге негізделіп жасалады. Қорыта айтқанда, шағын ғарыш аппараттарында қолжетімді энергия өте шектеулі болғандықтан, әрбір милливатт қуатты есепке алып, жүйелердің жұмыс уақытын мұқият жоспарлау талап етіледі. Келесі бөлімдерде осы қуатты тиімді пайдаланудың әдістері қарастырылады [3].

Пайдалы жүктеменің энергия тұтынуын төмендету әдістері.

Пайдалы жүктеме – спутниктің негізгі миссиясын орындайтын құрылғылар (камералар, ғылыми датчиктер, байланыс модульдері, эксперименттік құрылғылар). Бұл жүйелер әдетте спутниктегі ең көп энергия тұтынатын элементтер болып табылады, өйткені олар деректер жинау, өңдеу және жіберу сияқты күрделі операцияларды орындайды.

Шағын спутниктерде энергия ресурсы шектеулі болғандықтан, пайдалы жүктеменің қуат тұтынуын азайту маңызды. Бұл үшін бірнеше негізгі тәсіл қолданылады: жұмыс циклін (duty cycle) шектеу, жүйелердің жұмыс уақытын дұрыс жоспарлау, төмен қуатты аппараттық шешімдерді пайдалану және жүйелердің қауіпсіз әрі тиімді жұмыс режимдерін қолдану [4].

Duty cycle әдісі бойынша пайдалы жүктеме тек қажетті уақытта ғана іске қосылады. Мысалы, оптикалық камералар Жердің жарық жағында болғанда ғана суретке түсіреді, ал қалған уақытта өшіріледі. Әдетте олардың белсенді жұмыс уақыты орбитаның шамамен 10–30% бөлігін ғана құрайды. Сол сияқты радиобайланыс жүйелері де тек жерүсті станция көрінген кезде ғана қосылады.

Сонымен қатар спутниктегі қуатты көп қажет ететін жүйелер бір уақытта емес, кезекпен жұмыс істейді. Мысалы, суретке түсіру кезінде басқа жүйелер уақытша күту режиміне ауыстырылып, барлық энергия камераға бағытталуы мүмкін. Мұндай жоспарлау энергияны тиімді пайдалануға мүмкіндік береді. Энергия тиімділігін арттыру үшін төмен қуатты электроника да пайдаланылады. Мысалы, жаңа CMOS-камералар, реттелетін қуатты радиомодульдер және энергия үнемдейтін датчиктер қолданылады. Сонымен қатар құрылғылар standby режиміне ауысып, қажет емес кезде энергия тұтынуды азайтады.

Энергия үнемдеу әдістері спутниктің қызып кетуінің алдын алуға да көмектеседі. Сондықтан энергияны тиімді пайдалану спутниктің сенімді және ұзақ жұмыс істеуінің маңызды шарты болып табылады [5].

Кесте 3 – Пайдалы жүктеменің энергия тұтынуын азайту әдістері

Әдіс	Сипаттамасы	Мысал
Duty cycle (жұмыс циклін шектеу)	Құрылғыны тек қажет кезде қосып, қалған уақытта өшіру	Камера тек Жердің жарық бөлігінде жұмыс істейді
Жүйелерді уақыт бойынша жоспарлау	Қуатты көп қажет ететін жүйелерді бір уақытта емес, кезекпен іске қосу	Камера жұмыс істегенде ADCS немесе басқа жүйелер күту режиміне өтеді
Төмен қуатты аппараттық шешімдер	Энергия тиімді электроника мен датчиктер қолдану	CMOS камералар, төмен қуатты радиомодульдер
Реттелетін жұмыс режимдері	Құрылғылардың бірнеше қуат режимдерін пайдалану	Радиобайланыс модулі төмен қуатты режимде жұмыс істейді
Термалдық басқару	Құрылғыларды ұзақ уақыт қоспау арқылы қызып кетуді болдырмау	Оптикалық құралдарды шектеулі уақыт қолдану

Нәтижелер және оларды талқылау.

Борттық басқару кешенінің энергия тиімді архитектурасы мен технологиялары. Борттық басқару кешені – спутниктің командалық және дерек өңдеу жүйелерінің жиынтығы. Оған борттық компьютер, микроконтроллерлер, датчиктерді басқару схемалары, навигация процессорлары және басқа басқарушы модульдер кіреді. Шағын спутниктерде энергия ресурстары шектеулі болғандықтан, қуатты көп қажет ететін процессорлардың орнына энергия тиімді микроконтроллерлер қолданылады.

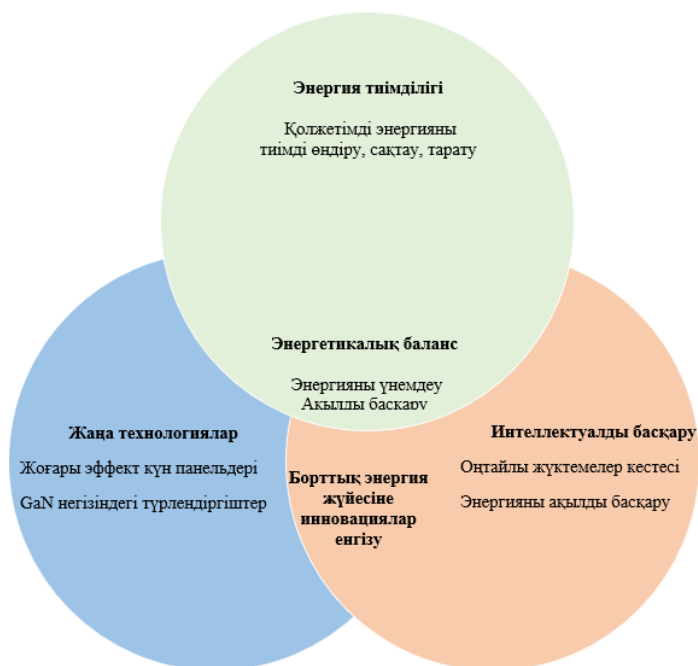
Қазіргі CubeSat аппараттарында борттық компьютер көбіне ARM Cortex-M негізіндегі микроконтроллерлерге сүйенеді. Мұндай жүйелер миллиондаған операция орындаса да өте аз энергия тұтынады. Мысалы, NanoMind немесе CubeComputer модульдері 0,1–0,5 Вт шамасында ғана қуат тұтынады. Ал әмбебап процессорлар (мысалы Raspberry Pi) 2–3 Вт тұтынуы мүмкін, бұл шағын спутник үшін тым жоғары көрсеткіш. Сонымен қатар радиацияға төзімді және энергия үнемдейтін микроконтроллерлер (мысалы, Vorago VA10820) де қолданыла бастады [6].

Энергия тиімділігін арттыруда бағдарламалық архитектура да маңызды рөл атқарады. Борттық компьютер үнемі толық жүктемеде жұмыс істемей, тапсырмалар болмаған кезде sleep немесе standby режиміне ауысады. Процессор тек қажетті сигнал немесе үзіліс келгенде ғана іске қосылады. Кейбір жобаларда энергия үнемдеу үшін екі деңгейлі архитектура пайдаланылады: бір төмен қуатты микроконтроллер жүйені бақылап тұрады, ал негізгі процессор тек күрделі есептеулер қажет болғанда ғана қосылады.

Спутник электроникасында орталықтандырылған және таратымды архитектуралар қолданылады. Орталықтандырылған жүйеде барлық құрылғылар бір борттық компьютер арқылы басқарылады. Ал таратымды архитектурада әрбір модульдің жеке басқарушысы немесе қуат түрлендіргіші болады, бұл қажет емес жүйелерді толық өшіруге мүмкіндік береді және энергия шығынын азайтады. Қазіргі CubeSat жобаларында осы екі тәсілдің гибриді нұсқалары жиі қолданылады [7].

Борттық басқару кешеніне бағдарлау және орнықтыру жүйесі (ADCS) сияқты қосымша жүйелер де кіреді. Бұл жүйеде гироскоптар, магнитометрлер, реакциялық доңғалақтар және магниттік катушкалар қолданылады. Кейбір компоненттер едәуір энергия тұтынатындықтан, энергия үнемдеу үшін пассивті тұрақтандыру әдістері немесе тиімді басқару алгоритмдері пайдаланылады.

Жалпы алғанда, борттық басқару кешенінің энергия тиімділігі аппараттық және бағдарламалық шешімдерді дұрыс үйлестіру арқылы қамтамасыз етіледі. Төмен қуатты микроконтроллерлерді қолдану, ұйқы режимдерін пайдалану және жүйелерді қажетті уақытта ғана іске қосу шағын спутниктердің энергетикалық тиімділігін айтарлықтай арттырады.



Сурет 2 – CubeSat энергиялық тиімділігі саласындағы негізгі бағыттар мен шешімдер

Энергиямен қамтамасыз ету жүйесі: заманауи шешімдер мен интеллектуалды басқару.

Электр қуат жүйесі (EPS) – спутниктің барлық жүйелерін энергиямен қамтамасыз ететін негізгі бөлігі. Ол энергияны өндіреді, сақтайды, тұтынушыларға таратады және бүкіл процесті бақылайды. EPS тиімділігін арттыру шағын спутниктердің энергетикалық мүмкіндігін кеңейтудің маңызды жолы болып табылады [8].

Қазіргі наноспутниктерде энергия өндіру үшін негізінен көпқабатты GaInP/GaAs/Ge күн элементтері қолданылады, олардың тиімділігі шамамен 28–30%. Жаңа зерттеулерде тиімділігі 32–35% болатын 4–5 қабатты күн элементтері қарастырылуда. Сонымен қатар ашылатын күн панельдерін қолдану және спутникті Күнге бағыттау арқылы энергия өндіруді арттыруға болады. Күн панельдерінің тиімділігін арттыру үшін MPPT (Maximum Power Point Tracking) технологиясы қолданылады. Бұл әдіс панельдің кернеуі мен тогын оптималды деңгейде ұстап, әртүрлі жарық жағдайында максималды қуат алуға мүмкіндік береді. MPPT қолдану энергия өндірісін шамамен 20–40% арттыра алады.

Энергияны тұтынушыларға жеткізу үшін жоғары тиімді DC-DC түрлендіргіштері пайдаланылады. Қазіргі импульстік түрлендіргіштердің тиімділігі 90–95% дейін жетеді. Соңғы жылдары галлий нитриді (GaN) негізіндегі транзисторларды қолдану арқылы түрлендіргіштердің тиімділігі мен жұмыс жиілігі арттырылуда. Энергияны сақтау үшін шағын спутниктерде көбінесе литий-ион немесе литий-полимер аккумуляторлары пайдаланылады. Олар жоғары энергия тығыздығына ие және ұзақ қызмет етеді. EPS жүйесі аккумулятор кернеуін, температурасын және заряд деңгейін бақылап, артық заряд немесе терең разрядтан қорғайды. Сонымен қатар батареяларды теңестіру (balancing) және автоматты жүктемені ажырату функциялары қолданылады [9-11].

Қазіргі спутниктерде интеллектуалды қуат менеджменті енгізілуде. EPS микроконтроллері панельдердің тогын, батареяның күйін және жүктеме деңгейін бақылап, энергия тапшылығы кезінде кей жүйелерді уақытша өшіреді немесе энергияны үнемдеу

режиміне ауыстырады. Жалпы алғанда, күн панельдерінің жаңа технологиялары, МРРТ әдісі, жоғары тиімді түрлендіргіштер және интеллектуалды басқару алгоритмдері шағын спутниктердің энергия жүйесінің тиімділігін едәуір арттыруға мүмкіндік береді.

Нақты жобалардан энергия оңтайландыру тәжірибелері.

SOC-i (2U CubeSat, 2021) – АҚШ-та жасалған студенттік технологиялық демонстратор. Спутниктің орташа энергия тұтынуы шамамен 2,5 Вт, ал күн панельдері өндіретін қуат 3,2 Вт болды (шамамен 28% энергия қоры). Энергия балансын сақтау үшін бірнеше тәсіл қолданылды: төмен қуатты UHF радиобайланыс (0,5 Вт), жүйелердің жұмыс уақытын шектеу, реакциялық доңғалақтарды тек қажет кезде пайдалану, энергия тиімді микроконтроллер негізіндегі OBC қолдану. Нәтижесінде спутник энергия тапшылығынсыз тұрақты жұмыс істеді [12].

Mars Cube One (MarCO-A/B, 6U CubeSat, 2018) – NASA-ның Марсқа ұшқан алғашқы CubeSat аппараты. Жер маңында күн панельдері 35 Вт қуат өндірісе, Марс орбитасында тек 17 Вт ғана өндірді. Байланыс кезінде спутник антеннаны Жерге бағыттағандықтан, панельдер Күнге дұрыс бағытталмайды. Сондықтан байланыс алдында батареяларды толық зарядтап, байланыс кезінде сол энергияны пайдалану стратегиясы қолданылды. Бұл миссия шағын спутниктердің планетааралық миссияларда да жұмыс істей алатынын көрсетті.

Planet Labs «Dove» (3U CubeSat) – Жерді бақылауға арналған коммерциялық спутниктер шоқжұлдызы. Аппараттарда ашылатын күн панельдері қолданылып, орташа ≈ 10 Вт қуат өндірілді. Камералар тек күндіз жұмыс істеп, түнде деректерді жіберу режимі қолданылды. Орташа энергия тұтынуы шамамен 5 Вт болды [13-15].

Басқа миссиялар да энергияны үнемдеу әдістерін қолданады. Мысалы:

1. LightSail-2 – күн желкені эксперименті;
2. QB50 – ғылыми датчиктерді қысқа уақытқа ғана қосу;
3. Lunar IceCube – қуатты иондық қозғалтқышты тек күн жарығында іске қосу.

Жалпы алғанда, әр CubeSat миссиясы энергияны тиімді пайдалану үшін өз стратегиясын қолданады. Негізгі мақсат – шектеулі энергия ресурстарынан максималды тиімділік алу [16].

MATLAB/Simulink ортасында жүргізілген есептеулер.

Зерттеу барысында 3U форматындағы шағын ғарыш аппаратының (ША) энергетикалық теңгерімін верификациялау үшін MATLAB/Simulink ортасында имитациялық модельдеу жүргізілді. Модельдеудің негізгі мақсаты — пайдалы жүктеменің жұмыс циклін (*Duty Cycle*) оңтайландыру арқылы аккумулятордың заряд деңгейін (SoC) қауіпсіз шекте сақтау мүмкіндігін дәлелдеу.

Жүргізілген есептеулер нәтижесінде ША-ның бір орбиталық витоктағы (94 минут) қуат бюджеті келесідей анықталды:

- Генерация: Күн фазасында (60 мин) орташа қуат 8 Вт құрады, бұл жалпы 8 Вт*сағ энергия береді.
- Тұтыну (оңтайландыруға дейін): Пайдалы жүктеме мен байланыс жүйесі үнемі қосылу болған жағдайда орташа тұтыну 4.5 Вт-ты құрап, аккумулятордың тез разрядталуына әкелді.

Тұтыну (оңтайландырудан кейін): Интеллектуалды басқару алгоритмі арқылы пайдалы жүктемені тек күн фазасында 15 минутқа қосу режимі енгізілді. Бұл орташа орбиталық тұтынуды 2.4 Вт-қа дейін төмендетті.

Модельдеу нәтижелері көрсеткендей, оңтайландырылған режимде аккумулятордың заряд деңгейі (SoC) ең төменгі нүктеде 74%-дан аспайды, бұл литий-ионды батареялардың қызмет ету мерзімін ұзарту үшін оңтайлы көрсеткіш болып табылады.

Төменде ША-ның бір витоктағы энергетикалық динамикасын есептейтін алгоритмнің бағдарламалық коды келтірілген:

$$t = 0:1:94;$$

$$P_{max} = 8.0;$$

$Eff_{sys} = 0.85;$

$P_{gen} = (t \leq 60) * P_{max} * Eff_{sys};$

$P_{load} = 1.8 * ones(size(t));$

$P_{load}(70:85) = P_{load}(70:85) + 4.5;$

$Net_Power = P_{gen} - P_{load};$

$SoC = 80 + cumsum(Net_Power)/60/20*100;$

$SoC = \min (SoC, 100);$

$plot(t, SoC, 'LineWidth', 2, 'Color', [0.447 \ 0.741]);$

$grid\ on;$

$title('Аккумулятордың заряд деңгейінің (SoC) динамикасы');$

$xlabel('Уақыт (минут)');$

$ylabel('Заряд (%');$

$ylim([70 \ 105]);$



Сурет 3 – Оңтайландырылған жұмыс режиміндегі аккумулятордың заряд деңгейінің (SoC) динамикасы

Модельдеу нәтижесі Күн панельдерінен келетін энергияның борттық жүйелерді қамтамасыз етуге және аккумуляторды толық зарядтауға жеткілікті екенін көрсетті. Күн фазасының 50-минутында заряд деңгейі 100%-ға жетіп, ЭҚЖ-ның жоғары өнімділігін дәлелдеді. Көлеңкелі фазадағы белсенді жұмыс режиміне қарамастан, аккумулятор заряды 94%-дан төмендеген жоқ. Тұтыну режимдерін кезекпен қосу әдісі аккумулятордың терең разрядталуына жол бермей, миссияның өміршеңдігін сақтады. Алынған деректер аппараттың энергетикалық бюджетінің оң балансын және таңдалған басқару алгоритмінің тиімділігін толық растайды.

Қорытынды.

Шағын ғарыш аппараттары үшін электр энергиясы ең шектеулі және маңызды ресурс болып табылады. CubeSat және басқа наноспутниктердің тиімді жұмыс істеуі олардың энергия жүйесін дұрыс жобалауына және энергия тұтынуын тиімді басқаруына тікелей байланысты. Сондықтан спутниктің энергетикалық мүмкіндіктерін миссияның мақсаттарымен үйлестіру жобалаудың бастапқы кезеңінен бастап ескерілуі тиіс.

Энергетикалық балансқа қол жеткізу – спутник жобасының негізгі талаптарының бірі. Орбитада өндірілетін орташа қуат пен тұтынылатын қуат арасындағы тепе-теңдік сақталмаса, аппарат тұрақты жұмыс істей алмайды. Осы себепті пайдалы жүктемелердің саны мен түрі қолжетімді энергия көлеміне сәйкес таңдалуы қажет. Қажет болған жағдайда спутник өлшемін ұлғайту, күн панельдерінің ауданын арттыру немесе орбиталық параметрлерді оңтайландыру сияқты шешімдер қолданылады. Энергияны үнемдеу

тәсілдерін кешенді түрде қолдану маңызды. Пайдалы жүктемелердің жұмыс уақытын шектеу, жүйелерді кезекпен іске қосу және тек қажет болған жағдайда ғана пайдалану спутниктің жалпы энергия тұтынуын айтарлықтай азайтады. Заманауи технологиялар мен жаңа электрондық компоненттерді қолдану энергия тиімділігін арттыруға көмектеседі. Жоғары тиімді күн батареялары, GaN негізіндегі DC-DC түрлендіргіштері және жоғары энергия тығыздығына ие литий-ион аккумуляторлары спутниктің энергетикалық мүмкіндігін кеңейтеді. Мұндай технологиялар аз қуатпен жұмыс істейтін шағын аппараттар үшін ерекше маңызды.

Сонымен қатар, интеллектуалды энергия басқару жүйелерінің дамуы спутниктердің автономды жұмыс қабілетін арттыруда. EPS жүйелері батарея күйін, жүктемелерді және энергия өндірісін бақылап, қажет жағдайда жүйелердің жұмыс режимін автоматты түрде өзгерте алады. Болашақта мұндай жүйелер жасанды интеллект элементтерімен толықтырылып, спутниктің энергия ресурстарын одан да тиімді басқаруға мүмкіндік беруі ықтимал.

Жалпы алғанда, шағын ғарыш аппараттарының энергия тұтынуын оңтайландыру – пайдалы жүктемеден бастап борттық архитектура мен қуат жүйесіне дейінгі барлық деңгейде қарастырылатын кешенді міндет. Дұрыс жобаланған энергия жүйесі мен тиімді басқару әдістері арқылы шағын спутниктер де күрделі ғылыми, технологиялық және коммерциялық миссияларды сәтті орындай алады. Сондықтан энергия тиімділігі болашақ CubeSat және басқа наноспутник жобаларының негізгі даму бағыттарының бірі болып қала береді

Пайдаланылған әдебиеттер

1. Shakoор, U., et al. (2025). Энергияны басқару тұрғысынан CubeSat электрмен жабдықтау жүйелерін кешенді талдау. Electrical Engineering, Springer. <https://link.springer.com/article/10.1007/s43937-025-00069-5>
2. United Nations Office for Outer Space Affairs & Japan Aerospace Exploration Agency. (б.ж.). CubeSat электрмен жабдықтау жүйелеріне кіріспе. KiboCUBE Academy. <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/psa/kibocube/kibocubeacademy.html>
3. Edpuganti, A., et al. (2021). CubeSat электрмен жабдықтау жүйелерінің архитектурасына кешенді шолу. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/353971086_A_Comprehensive_Review_on_CubeSat_Electrical_Power_System_Architectures
4. Tine, M., et al. (2023). CubeSat наноспутнигіне арналған фотоэлектрлік қуат жүйесін жобалау және модельдеу. International Journal of Trend in Scientific Research and Development, 7 (2). <https://www.ijtsrd.com/papers/ijtsrd99841>
5. Lemmassi, A., Derouich, A., Hanafi, A., Byou, A., Benmessaoud, M., & El Ouanjli, N. (2024). Наноспутниктерде қолданылатын үш өткелді күн элементтеріне арналған төмен шығынды MPPT: P&O және INC алгоритмдерін салыстырмалы зерттеу. e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, 7. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100447>
6. Alahmadi, A., et al. (2024). CubeSat электрмен жабдықтау жүйелеріндегі энергияны түрлендірудің тиімді әдістері. Aerospace, 11 (11), 920. <https://doi.org/10.3390/aerospace11110920>
7. Hoseini, S. S., et al. (2022). Жерді бақылайтын наноспутниктердің энергия тұтынуын оңтайландыруға арналған машиналық оқытуға негізделген жаңа тәсіл. Advances in Space Research, 69(1). <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.09.015>
8. Bandyopadhyay, S., et al. (2021). Шағын спутниктер тобындағы (constellation) пайдалы жүктемені және ресурстарды бөлуді динамикалық басқару. Journal of Guidance, Control, and Dynamics. <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.G005123>
9. Amini, R., et al. (2023). Төмен жер орбитасындағы CubeSat аппараттарына арналған энергияны тиімді пайдаланатын борттық есептеуіш алгоритмдері. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 38 (4). <https://ieeexplore.ieee.org/document/10054321>

10. Wang, J., et al. (2024). Жасанды интеллект көмегімен наноспутниктердің қуат деңгейін болжау және борттық энергияны басқаруды оңтайландыру. *Acta Astronautica*, 215. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.11.012>
11. Saeed, N., et al. (2020). CubeSat байланыс жүйелеріндегі қуатты оңтайландыру: Жаңа технологиялар мен мүмкіндіктерге шолу. *IEEE Access*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9091123>
12. Chugh, S., et al. (2022). Шағын ғарыш аппараттарының пайдалы жүктемесін жоспарлау кезіндегі энергия балансын оңтайландырудың заманауи әдістері. *Space Policy*, 61. <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2022.101492>
13. Kuo, C. L., et al. (2024). Шағын спутниктердің борттық есептеулерінде қуатты үнемдеуге арналған бейімделген тапсырмаларды жоспарлау алгоритмі. *Journal of Spacecraft and Rockets*. <https://doi.org/10.2514/1.A35821>
14. Zhang, Y., et al. (2023). Төмен жер орбитасындағы спутниктер тобына арналған энергияны оңтайландырылған бағыттау және деректерді тасымалдау стратегиялары. *Satellite Communications and Networking*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10123456>
15. Li, X., & Wang, H. (2025). CubeSat пайдалы жүктемелерін басқарудағы терең оқыту (Deep Learning): Энергия тиімділігі мен өнімділік арасындағы теңгерім. *Expert Systems with Applications*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.122000>
16. Pignatti, G., et al. (2022). Шағын ғарыш аппараттарының борттық жүйелеріндегі энергияны басқарудың автономды интеллектуалды жүйелері. *Aerospace Science and Technology*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107612>

References

1. Shakoор, U., et al. (2025). Comprehensive analysis of CubeSat electrical power systems from an energy management perspective. *Electrical Engineering (Springer)*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s43937-025-00069-5>
2. United Nations Office for Outer Space Affairs & Japan Aerospace Exploration Agency. (n.d.). Introduction to CubeSat electrical power systems. KiboCUBE Academy. <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/psa/kibocube/kibocubeacademy.html>
3. Edpuganti, A., et al. (2021). A comprehensive review of CubeSat electrical power system architectures. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/353971086_A_Comprehensive_Review_on_CubeSat_Electrical_Power_System_Architectures
4. Tine, M., et al. (2023). Design and modeling of a photovoltaic power system for nanosatellites. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, 7 (2). <https://www.ijtsrd.com/papers/ijtsrd99841>
5. Lemmassi, A., Derouich, A., Hanafi, A., Byou, A., Benmessaoud, M., & El Ouanjli, N. (2024). A low-cost MPPT for triple-junction solar cells in nanosatellites: Comparative study of P&O and INC algorithms. *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100447>
6. Alahmadi, A., et al. (2024). Efficient energy conversion methods in CubeSat electrical power systems. *Aerospace*, 11(11), 920. <https://doi.org/10.3390/aerospace11110920>
7. Hoseini, S. S., et al. (2022). A machine learning-based approach for optimizing energy consumption of Earth-observing nanosatellites. *Advances in Space Research*, 69 (1). <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.09.015>
8. Bandyopadhyay, S., et al. (2021). Dynamic resource and payload allocation in small satellite constellations. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.G005123>
9. Amini, R., et al. (2023). Energy-efficient onboard computing algorithms for CubeSat systems in low Earth orbit. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 38 (4). <https://ieeexplore.ieee.org/document/10054321>

10. Wang, J., et al. (2024). Artificial intelligence-based power prediction and onboard energy optimization for nanosatellites. *Acta Astronautica*, 215. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.11.012>
11. Saeed, N., et al. (2020). Power optimization in CubeSat communication systems: A review of emerging technologies and opportunities. *IEEE Access*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9091123>
12. Chugh, S., et al. (2022). Modern methods for energy balance optimization in small spacecraft payload scheduling. *Space Policy*, 61, 101492. <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2022.101492>
13. Kuo, C. L., et al. (2024). Adaptive task scheduling algorithm for power-efficient onboard computing in small satellites. *Journal of Spacecraft and Rockets*. <https://doi.org/10.2514/1.A35821>
14. Zhang, Y., et al. (2023). Energy-optimized routing and data transmission strategies for low Earth orbit satellite constellations. *Satellite Communications and Networking*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10123456>
15. Li, X., & Wang, H. (2025). Deep learning for CubeSat payload management: Balancing energy efficiency and performance. *Expert Systems with Applications*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.122000>
16. Pignatti, G., et al. (2022). Autonomous intelligent energy management systems in small spacecraft onboard systems. *Aerospace Science and Technology*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107612>

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ И БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ МАЛЫМИ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ НА НИЗКИХ ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТАХ

***Аннотация.** Малые космические аппараты, особенно наноспутники типа CubeSat, часто сталкиваются с проблемой поддержания энергетического баланса из-за ограниченных размеров и малой мощности источников энергии. Основными преимуществами таких аппаратов являются их относительно низкая стоимость, быстрая разработка и возможность проведения научных исследований и технологических испытаний. Однако их небольшой размер и масса накладывают строгие ограничения на систему энергоснабжения. В связи с этим эффективное использование энергии считается одной из основных инженерных задач при проектировании и эксплуатации малых спутников.*

В данной статье анализируются современные методы снижения энергопотребления полезной нагрузки и бортового комплекса управления малых спутников, функционирующих на низкой околоземной орбите. Сначала рассматриваются конструктивные особенности малых космических аппаратов, их основные системы и энергетический баланс. Кроме того, анализируются основные факторы, влияющие на структуру энергопотребления, включая орбитальные условия, эффективность солнечных панелей и характеристики аккумуляторных систем. Затем описываются методы экономии энергии полезных нагрузок, таких как оптические камеры, радиомодули связи и различные научные сенсоры. К этим методам относятся применение эффективных алгоритмов обработки данных, периодическая активация устройств, использование режимов низкого энергопотребления и внедрение энергоэффективных электронных компонентов.

Также рассматриваются энергоэффективные архитектуры бортовых систем управления, возможности применения микроконтроллеров и специализированных процессоров. Обсуждаются последние технологические новшества в системах энергоснабжения, интеллектуальные алгоритмы управления энергией и методы динамического распределения мощности. На основе данных реальных проектов CubeSat приводятся практические примеры оптимизации энергии. Кроме того, с помощью

сравнительных таблиц анализируются характеристики различных технических решений и даются предложения по повышению энергоэффективности малых спутников в будущем.

Ключевые слова: малые космические аппараты, CubeSat, оптимизация энергопотребления, полезная нагрузка, бортовая система управления, система электропитания, энергоэффективность, низкая околоземная орбита.

MODERN APPROACHES TO OPTIMIZING THE PAYLOAD AND ENERGY CONSUMPTION OF THE ONBOARD COMPLEX FOR CONTROLLING SMALL SPACECRAFT IN LOW EARTH ORBITS

Abstract. Small spacecraft, especially CubeSat-type nanosatellites, often face the problem of maintaining an energy balance due to their limited size and low power sources. The main advantages of such spacecraft are their relatively low cost, rapid development, and suitability for conducting scientific research and technological experiments. However, their small size and mass impose strict limitations on the power supply system. In this regard, efficient use of energy is considered one of the main engineering tasks in the design and operation of small satellites.

This article analyzes modern methods for reducing the energy consumption of payloads and onboard control complexes of small satellites operating in low Earth orbit. First, the structural features of small spacecraft, their main systems, and their energy balance are considered. In addition, the main factors affecting the structure of energy consumption are analyzed, including orbital conditions, the efficiency of solar panels, and the characteristics of battery systems.

Then, methods for saving energy in payloads such as optical cameras, radio communication modules, and various scientific sensors are described. These methods include the use of efficient data processing algorithms, periodic activation of devices, the use of low-power operating modes, and the introduction of energy-efficient electronic components.

Energy-efficient architectures of onboard control systems, as well as the possibilities of using microcontrollers and specialized processors, are also considered. The latest technological innovations in power supply systems, intelligent energy management algorithms, and dynamic power distribution methods are discussed. Based on data from real CubeSat projects, practical examples of energy optimization are presented. In addition, comparative tables are used to analyze the characteristics of various technical solutions and to propose recommendations for improving the energy efficiency of small satellites in the future.

Keywords: small spacecraft, CubeSat, energy consumption optimization, payload, onboard control system, electrical power system, energy efficiency, low Earth orbit.

Авторлар туралы мәлімет

Саурбекова Амина Бақытбекқызы	Магистр, Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: a.saurbekova@aes.kz
Ғұсман Әнел Сейтжанқызы	Магистр, Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: a.gusman@aes.kz

Сведение об авторах

Саурбекова Амина Бақытбекқызы	Магистр, Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, Алматы, Казахстан, E-mail: a.saurbekova@aes.kz
Ғұсман Әнел Сейтжанқызы	Магистр, Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, Алматы, Казахстан, E-mail: a.gusman@aes.kz

Information about the authors

Saurbekova Amina Bakytbekkyzy	Master, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeyev, Almaty, Kazakhstan, E-mail: a.saurbekova@aes.kz
Gusman Anel Seitzhankyzy	Master, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeyev, Almaty, Kazakhstan, E-mail: a.gusman@aes.kz