



ӘОЖ 629.78:004.8

ҒТАХА 50.47.31, 50.45.35

[https://doi.org/10.53364/24138614\\_2026\\_40\\_1\\_23](https://doi.org/10.53364/24138614_2026_40_1_23)

А.Т. Боранбаева<sup>1,2,3\*</sup>, Ғ.Қ. Серғазин<sup>4</sup>, Г.М. Имашева<sup>3</sup>, Қ.Б. Багитова<sup>5</sup>,  
Т. Илиев<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Әл Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup> Академик Ә.А. Жолдасбеков атындағы механика және машинатану институты,  
Алматы, Қазақстан

<sup>3</sup> Қ.И. Сәтпаев атындағы Қазақ Ұлттық техникалық зерттеу университеті,  
Алматы, Қазақстан

<sup>4</sup> М. Тынышбаев атындағы АЛТ университеті, Алматы, Қазақстан

<sup>5</sup> Х.Досмұхамедов атындағы Атырау университеті, Қазақстан, Атырау

<sup>6</sup> Ангел Кынчев атындағы Русе университеті, Болгария, Русе

\*E-mail: [boranbayeva.anargul.talgatkyzy@gmail.com](mailto:boranbayeva.anargul.talgatkyzy@gmail.com)

## НАНОСПУТНИКТЕРДІҢ БОРТТЫҚ КҮЙІН ТЕЛЕМЕТРИЯ НЕГІЗІНДЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ ДИАГНОСТИКАЛАУ

*Аңдатпа.* Наноспутниктер шектеулі адам қатысуымен жұмыс істейтіндіктен, борттық ақауларды диагностикалау миссияның сенімді орындалуы үшін аса маңызды. Бұл мақалада жасанды интеллектке (ЖИ) негізделген автономды ақауларды анықтау және оқшаулау жүйесі бар IU-3U CubeSat наноспутнигін әзірлеу қарастырылады. Зерттеу машиналық оқыту әдістерін қолданатын наноспутниктің техникалық күйін басқару жүйесіне бағытталған.

Жұмыста классикалық шектік мониторинг пен заманауи ЖИ әдістері салыстырылып, маңызды борттық ішкіжүйелердегі аномалияларды жоғары дәлдікпен және аз кідіріс уақытымен анықтайтын борттық диагностикалық үдеріс ұсынылады. Аппараттық архитектура, телеметрияға негізделген ақаулар симуляторы және симуляцияланған деректерде оқытылған ЖИ алгоритмі сипатталады.

Ұсынылған жүйе ақауларды анықтауда шамамен 98% дәлдік көрсетіп, классикалық әдістерден айтарлықтай артық екенін дәлелдеді, ал ақауды анықтау кідірісі бірнеше секундпен шектеледі. Нәтижелер машиналық оқыту әдістерінің модельге негізделген диагностиканы тиімді толықтыра алатынын көрсетеді. Әзірленген ЖИ-негізделген диагностикалық жүйе аномалияларды ерте анықтау және қалпына келтіру шараларын автономды түрде іске асыру арқылы наноспутниктер миссиясының төзімділігін арттырады.

**Түйін сөздер:** наноспутник; CubeSat; телеметрия; ақауды анықтау және оқшаулау; жасанды интеллект; машиналық оқыту; гибриді диагностика; кірістірілген жүйе.

### Кіріспе.

Осы зерттеудің нысаны – спутниктің ішкі жүйелерінің жұмысқа қабілеттілігін бақылау және қолдау үшін жасанды интеллектті пайдаланатын наноспутниктердің диагностикалық жүйесі. Соңғы жылдары наноспутниктер, әсіресе CubeSat форматындағы аппараттар, төмен құны мен қысқа әзірлеу циклдерінің арқасында кеңінен таралуда [1]. Алайда, олар салыстырмалы түрде сенімділіктің төмендігімен және ақауларды анықтау, оқшаулау және жоюдың (FDIR) шектеулі мүмкіндіктерімен сипатталады [2].

Дәстүрлі спутниктік FDIR жүйелері, әдетте, телеметриялық параметрлер белгіленген шекті мәндерден асқан кезде іске қосылатын қарапайым шектік тексерулер мен ережелерге

негізделген логикаға сүйенеді [2]. Мұндай тәсілдер сенімді әрі стандартталған (мысалы, ECSS талаптарына сәйкес), алайда олар тек алдын ала белгілі ақау режимдерімен және бірөлшемді параметрлермен шектеледі [3]. Қазіргі уақытта спутниктік миссиялар барған сайын күрделеніп, автономдылық деңгейі артқан сайын, борттық диагностика мүмкіндіктерін жетілдіруге деген қажеттілік те күшейіп отыр.

Жасанды интеллект пен спутниктік технологиялар саласындағы соңғы жетістіктер алдын ала бағдарламаланбаған аномалияларға бейімделіп, оларға жауап бере алатын интеллектуалды борттық жүйелерге қызығушылықты арттырды. Соған сәйкес, спутниктердегі ақауларды диагностикалаудың қазіргі күйі де өзгеруде: деректерге және машиналық оқытуға негізделген әдістер классикалық диагностикалық тәсілдерді толықтыру немесе алмастыру мақсатында белсенді түрде зерттелуде [3].

Модельге негізделген дәстүрлі FDIR тәсілінде ғарыш аппаратының математикалық моделі нақты жүйемен қатар орындалып, аналитикалық артықшылық арқылы (қалдық шамаларды салыстыру) ақаулар анықталады. Бұл әдіс жүйені дәл модельдеуді талап етеді және есептеу ресурстары тұрғысынан күрделі болуы мүмкін. Ал жасанды интеллектке негізделген әдістер номиналды және номиналдан тыс мінез-құлық үлгілерін деректер арқылы үйреніп, физикалық модельсіз-ақ жаңа немесе күрделі аномалияларды анықтауға мүмкіндік береді [4].

Қазіргі таңда деректерге негізделген ақау диагностикасы әртүрлі салаларда өзінің тиімділігін дәлелдеп, ғарыш аппараттарында да қолданылып келеді. Мысалы, машиналық оқыту классификаторлары (тірек векторлы машиналар, нейрондық желілер және т.б.) спутниктің модельденген ішкі жүйелеріндегі ақауларды жоғары дәлдікпен анықтай алатынын көрсетті. Кейбір зерттеулерде жасанды нейрондық желілер мен SVM әдістері навигация, басқару және бағдарлау жүйелеріндегі ақауларды тиімді түрде оқшаулап, қарапайым шектік детекторлармен салыстырғанда жалған іске қосылулар санын айтарлықтай азайтатыны көрсетілген. Сондай-ақ, сенсорлардағы ақауларды (мысалы, акселерометр немесе IMU көрсеткіштерінің «қатып қалуы») анықтауға арналған свертотты нейрондық желілердің жылдамырақ әрі толық нәтиже беріп, борттық есептеу ресурстарына бейім екені дәлелденген [5].

Бұл зерттеулер жасанды интеллект әдістерінің бақыланатын ақаулар аясын кеңейтіп қана қоймай, спутниктің жұмысындағы әрекет ету уақытын да жақсартуға қабілетті екенін көрсетеді. Дегенмен, ресурстары шектеулі наноспутниктерде ЖИ қолдану есептеу қуаты, оқыту деректерінің жеткіліктілігі және автономды шешім қабылдаудың сенімділігі сияқты бірқатар мәселелерді туындатады [6].

Қорытындылай келе, зерттеудің негізгі мақсаты — жасанды интеллектке негізделген борттық диагностикалық жүйені енгізу арқылы наноспутниктердің сенімділігін арттыру. Жасанды интеллект спутниктердің автономдылығы мен ақауға төзімділігін күшейтетін маңызды фактор ретінде қарастырылады, себебі ол бекітілген ережелерге негізделген жүйелермен салыстырғанда болжаушы және бейімделгіш ақауларды басқаруға мүмкіндік береді. Бұл мақала CubeSat платформасы үшін кешенді шешім әзірлеу мақсатында спутниктік FDIR және жасанды интеллект саласындағы қолданыстағы зерттеулерге, әдеби шолуларға және соңғы CubeSat тәжірибелеріне сүйенеді. Келесі бөлімдерде зерттеудің нақты мақсаттары мен міндеттері, сондай-ақ ұсынылған жүйені әзірлеу және сынақтан өткізу тәсілдері сипатталады.

### **Материалдар және әдістер.**

*Ақау түрлерін талдау және телеметрияға қойылатын талаптар.*

Зерттеудің диагностикалық нысаны электрлік қоректендіру ішкіжүйесі, борттық электроника және байланыс модулі сияқты дәстүрлі борттық ішкіжүйелермен жабдықталған CubeSat типті наноспутник болып табылады [7]. Масса, көлем, есептеу ресурстары және энергия тұтынуы бойынша қатаң шектеулерге байланысты наноспутниктік платформалар, әдетте, аппараттық резервтеудің төмен деңгейімен және

ақауларды өңдеудің қарапайым хаттамаларымен сипатталады. Осыған байланысты миссиялардың сенімді және автономды жұмысын қамтамасыз ету үшін борттық телеметриялық деректердің өзіне ғана сүйене отырып, қалыптан тыс жұмыс режимдерінің ерте пайда болуын болдырмау және оларды уақтылы оқшаулау аса маңызды болып табылады.

Ұсынылған әдіс аясында ақауларды диагностикалау наноспутник қалыпты режимде жұмыс істеген кезде үнемі қолжетімді болатын телеметриялық параметрлер негізінде жүзеге асырылады. Диагностикалық үдеріске енгізілетін негізгі ішкі жүйелерге электрмен қоректендіру ішкі жүйесі, борттық өңдеу блогы және байланыс ішкі жүйесі жатады. Наноспутниктік миссияларда жиі кездесетін ақау түрлеріне сенсорлардың ығысуы мен дрейфі, энергия тұтынудың қалыптан тыс артуы, борттық компоненттердің жылулық тұрақсыздығы, байланыс сапасының үзілісті нашарлауы және процессордың шамадан тыс жүктелуі жатады. Аталған ақаулардың барлығы телеметриялық сигналдардағы сипаттамалық өзгерістер түрінде көрініс табады, сондықтан телеметрияға негізделген диагностика тиімді әрі өміршең шешім болып саналады.

Диагностикалық кіріс деректерін формализациялау мақсатында уақыттың  $t$  мезетіндегі борттық телеметрия көп өлшемді телеметриялық күй векторы ретінде модельденеді:

$$T(t) = [V(t), I(t), T(t), RSSI(t), L(t), C(t)], \quad (1)$$

мұндағы  $T(t)$  диагностикалық жүйе өңдей алатын бірыңғай көрініс қалыптастыру мақсатында әртекті телеметриялық өлшеулерді біріктіру үшін қолданылады. Бұл жағдайда  $V(t)$  – электрмен қоректендіру және реттеу жүйесінің күйін сипаттайтын электрлік шинадағы кернеу;  $I(t)$  – платформаның жүктемесін және энергияны қалыптан тыс тұтыну ықтималдығын көрсететін жалпы ток тұтыну мәні;  $T(t)$  – борттық жылулық датчиктер арқылы алынатын температура көрсеткіштері;  $RSSI(t)$  – байланыс арнасының сапасын сипаттайтын қабылданған сигнал қуатының деңгейі;  $L(t)$  – телеметрия берілісінің сенімділігін көрсететін пакеттердің жоғалу үлесі;  $C(t)$  – борттық электрониканың есептеу күйін сипаттайтын процессор жүктемесі немесе пайдаланылу деңгейі.



Сурет 1 – Наноспутник ішкіжүйелерінің телеметрияға негізделген бейнеленуі және деректердің борттық диагностикалық жүйеге ағу сызбасы

1-суретте наноспутниктің ішкі жүйелері, телеметрияға қатысты параметрлер және телеметрияға негізделген диагностикалық үдеріс арасындағы өзара байланыс сызбалық түрде көрсетілген. Сурет ішкі жүйе деңгейінде алынатын өлшеулердің борттық диагностикалық жүйеге қалай түрлендіріліп берілетінін және олардың сәйкестендірілуін айқын бейнелейді.

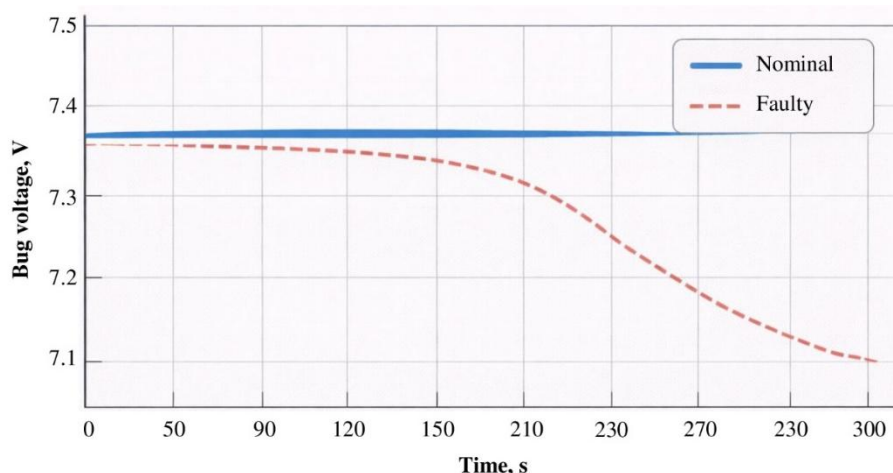
$T(t)$  телеметриялық вектор ретінде қолданылып, наноспутниктің диагностикалық тұрғыдан көрінетін ізі болып табылады. Кез келген ішкіжүйедегі ақау осы вектордың бір немесе бірнеше компонентінің өзгеруіне әкелуі ықтимал.  $T(t)$  векторының құрамы миссияның ерекшеліктеріне және қолжетімді сенсорлар жиынтығына байланысты өзгеруі мүмкін болғанымен, оны векторлық форматта оңай сипаттауға болады, бұл диагностикалық жүйені басқа наноспутниктік платформаларға жылдам қайта бейімдеуге мүмкіндік береді.

Қалыпты жұмыс режимінде әрбір телеметриялық параметр жүйенің конструкциясымен және миссияның ағымдағы фазасымен анықталатын күтілетін мінез-құлық профилін көрсетеді. Осы номиналдық профильдер сақталмаған жағдайлар ақаулық күй ретінде қарастырылады. Әрбір телеметриялық компоненттің  $T_i(t)$  номиналдық мінез-құлқынан ауытқуы келесі түрде сипатталады:

$$\Delta T_i(t) = T_i(t) - T_i^{nom}(t) \quad (2)$$

мұндағы  $T_i(t)$  –  $t$  уақыт мезетіндегі  $i$ -ші телеметриялық параметрдің нақты мәні, ал  $T_i^{nom}(t)$  – қателіксіз жұмыс жағдайындағы сәйкес номиналдық мәні болып табылады. Номиналдық эталон тұрақты жұмыс нүктесі түрінде, миссия фазасына тәуелді номиналдық профиль ретінде немесе тарихи телеметриялық деректерге негізделген анықтама ретінде алынуы мүмкін. Осылайша алынған  $T_i(t)$  ауытқуы жүйенің ағымдағы жұмыс күйінің күтілетін мінез-құлыққа қаншалықты сәйкес келмейтінін анықтауға мүмкіндік береді [8].

Номиналдық және ақаулық телеметриялық мінез-құлықтың мысалы 2-суретте көрсетілген, онда телеметриялық параметрлердің бірінің ақау жағдайы басталған сәттен бастап айқын ауытқу көрсететіні байқалады. Бұл мысал наноспутниктерге тән ақаулар телеметриялық деректерде өзіндік ерекшелігі бар үлгілерді (паттерндерді) қалыптастыратынын және осы үлгілерді автоматты түрде анықтау мен ақауларды оқшаулау үшін пайдалануға болатынын көрсетеді.



Сурет 2 – Қалыпты және ақаулық жұмыс режимдеріндегі телеметриялық параметр ауытқуының мысалы

Анықталған ақау режимдері мен телеметриялық сипаттамаларға байланысты бірқатар диагностикалық талаптар қалыптастырылады. Диагностикалық жүйе телеметрияның табиғи дискреттеу (sampling) жиілігінде жұмыс істей алуы және есептеу ресурстарына

шамадан тыс жүктеме түсірмеуі тиіс. Ақауды анықтау кідірісі мүмкіндігінше аз болуы қажет, себебі бұл ақаудың әрі қарай таралуын болдырмауға және уақтылы түзету шараларын қабылдауға мүмкіндік береді. Диагностикалық қорытынды наноспутниктің телеметриясына тән шу мен уақытша ауытқулар жағдайында да сенімді болуы керек, ал барлық есептеулер CubeSat санатындағы аппараттық құралдардың есептеу қуаты мен энергия тұтыну шектеулері аясында орындалуы тиіс.

Осылайша, аталған кішібөлім ұсынылып отырған борттық диагностикалық жүйенің телеметрияға негізделген іргетасын қалыптастырады және ішкіжүйелердің параметрлерін ғана өлшеуге сүйенетін интеллектуалды ақауларды анықтау мүмкіндігінің негізді екенін дәлелдейді. Көрсетілген диагностикалық талаптар келесі кішібөлімде сипатталатын борттық диагностикалық жүйе құрылымын айқындайтын тікелей факторлар болып табылады.

*Борттық диагностикалық жүйенің архитектурасы.*

Ұсынылған борттық диагностикалық жүйе дәстүрлі телеметриялық бақылауды ЖИ негізіндегі ақауларды анықтаумен біріктіретін гибриді архитектура болып табылады. Ол CubeSat класындағы аппараттық құрал үшін жарамды болып қала отырып, классикалық диагностикалық пайымдаудың ашықтығы мен сенімділігін машиналық оқытудың икемділігі мен үлгіні тану мүмкіндіктерімен біріктіреді.

Процесс қуат, байланыс және борттық электрондық ішкі жүйелерден телеметриялық деректерді жинаудан басталады. Деректер ағыны сәйкестік пен шуға төзімділікті қамтамасыз ету үшін сүзу, қалыпқа келтіру және синхрондау арқылы алдын ала өңделеді.

Содан кейін екі параллель диагностикалық жолдар деректерді талдайды. Біріншісі шұғыл әрекетті талап ететін сыни аномалияларды анықтау үшін классикалық шекті және ережеге негізделген мониторингті пайдаланады, ал екіншісі күрделі немесе нәзік ақау үлгілерін анықтау және жүйенің денсаулығына ықтималдық немесе категориялық бағалауды қамтамасыз ету үшін ЖИ модулін пайдаланады.



Сурет 3 – Классикалық телеметриялық бақылау мен ЖИ негізіндегі ақауларды анықтауды біріктіретін гибриді борттық диагностикалық жүйе архитектурасы

Ұсынылған архитектура телеметрияны жинау → алдын ала өңдеу (сүзгілеу, нормалау, синхрондау) → екі параллель диагностикалық жол (классикалық шекті бақылау және ЖИ-негізделген модуль) → біріктірілген шешім логикасы кезеңдерінен тұрады. Классикалық жол қауіпсіздікке критикалық жағдайларға дереу жауап береді, ал ЖИ-модуль көпөлшемді және уақыттық үлгілер арқылы «жасырын» деградацияларды ерте таниды [8].

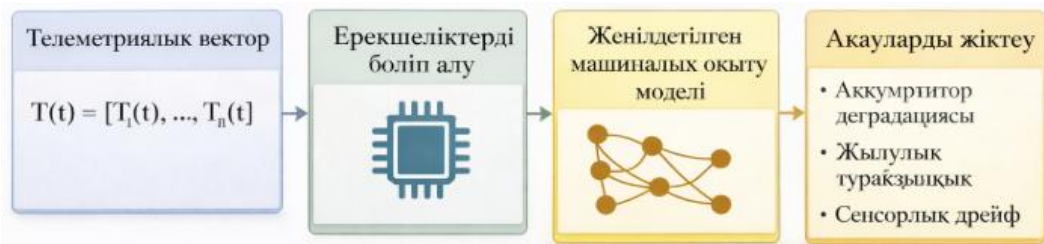
$$D(t) = F_C(T(t)) \cup f_{AI}(T(t)), \quad (3)$$

мұндағы  $F_C$  – шекті тексерулер мен ережелер жиыны;  $f_{AI}$  – машиналық оқыту модулі; біріктіру ережесі басымдық, дауыс беру немесе сенімділікпен өлшеу арқылы іске аса алады.

*Жеңіл салмақты ЖИ-диагностика алгоритмі.*

Ұсынылған бортық архитектураға енгізілген жасанды интеллекттің диагностикалық модулі наноспутниктік платформалар контекстінде есептеу тиімділігіне де, нақты уақыттағы қолайлылыққа да басты назар аудару негізінде әзірленген. Ұсынылған шешім жеңіл машиналық оқыту үлгісіне негізделген және әдетте көп өңдеу мүмкіндіктері мен жадты қажет ететін ресурсты көп қажет ететін терең оқыту шешімдеріне қарағанда CubeSat класындағы аппараттық құрал мен энергия бюджетінің шектеулерінде іске қосылуы мүмкін.

Жеңіл диагностикалық алгоритм құрылымы 4-суретте көрсетілген. Алгоритм үш негізгі қадамнан тұрады, атап айтқанда, телеметриялық мүмкіндіктерді шығару, машиналық оқытудағы қорытынды және ақаулық классификациясы. Оның бортық орындауды тиімді орындауға мүмкіндік беретін модульдік дизайны бар, бірақ ақауларды анықтау және оқшаулауды орындау үшін әлі де жеткілікті диагностикалық дәлдік бар.



Сурет 4 – Бортық ақауларды жіктеуге арналған жеңіл ЖИ негізіндегі диагностикалық алгоритмнің құрылымы

ЖИ модулі ресурстық шектеулерді ескере отырып құрастырылды: қысқа терезедегі статистикалар, жылжымалы орташа және туынды сияқты қарапайым белгілер есептеліп, кейін ықшам классификаторға беріледі. Модель ретінде шағын көпқабатты перцептрон, SVM немесе ағаш-негізді әдістер қолданылуы мүмкін; бұл жұмыста есептеу күрделілігі төмен көпклассты классификация қағидасы қарастырылды.

$$x(t) = \phi(T(t)), \quad (4)$$

$$y(t) = \arg \max_k P(y_k | x(t)), \quad (5)$$

*Валидация: симуляция және метрикалар*

Ұсынылған бортық диагностикалық жүйені бақыланатын және қайталанатын жағдайларда бағалау үшін наноспутниктік ақаулар туралы нақты деректердің шектеулі қолжетімділігіне байланысты модельдеуге негізделген валидация жүйесі пайдаланылады. Модельдеу ақаулық сценарийлерін жүйелі талдауға және ақаудың уақытын, ауырлығын және ұзақтығын толық бақылауға мүмкіндік береді [9,10].

5-суретте көрсетілгендей, жұмыс процесі төрт негізгі кезеңді қамтиды: телеметрияны құру, ақауды енгізу, диагностикалық өңдеу және өнімділікті бағалау. Біріншіден, номиналды телеметрия деректері қалыпты наноспутник жұмысын көрсету үшін жасалады, соның ішінде қуаттағы, бортық электроникадағы және байланыс ішкі жүйелеріндегі нақты өзгерістер [11].



Сурет 5 – Борттық ЖИ негізіндегі диагностикалық жүйе үшін модельдеу ортасы және валидация жұмыс процесі

Нақты орбиталық ақау деректерінің шектеулі болуына байланысты, номинал және ақаулы телеметрияны генерациялайтын симуляциялық орта құрылды. Бағалау метрикалары ретінде ақауды анықтау кідірісі, классификация дәлдігі және есептеу жүктемесі қолданылды.

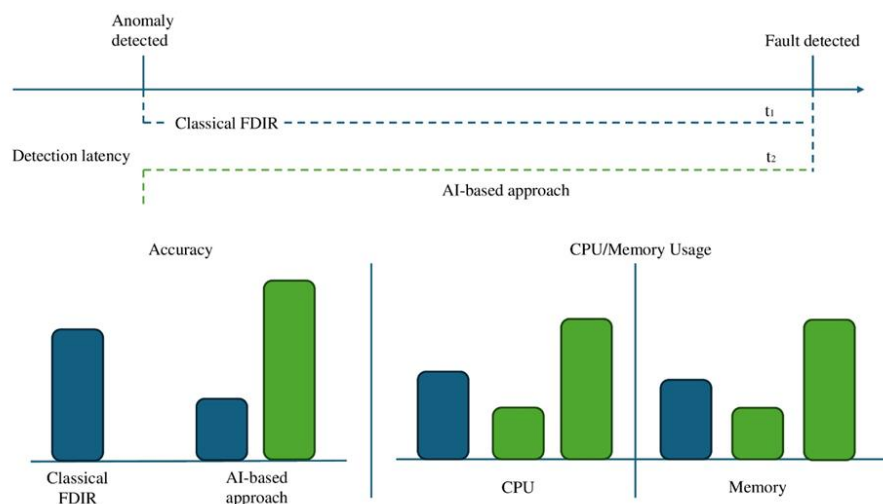
$$\tau_d = t_{detect} - t_{fault}, \tag{6}$$

$$Acc = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN}, \tag{7}$$

$$E_c = \frac{N_{ops}}{t_{inf}}, \tag{8}$$

**Нәтижелер және оларды талдау.**

Бастапқы нәтижелер жиынтығы телеметриялық өлшеулерде жалпы наноспутниктік ақаулардың пайда болуын көрсетеді. 6-сурет қалыпты және ақаулы жұмыс жағдайлары бар типтік телеметриялық уақыт қатарын көрсетеді. Номиналды жұмыс кезінде телеметриялық сигналдар есептелген шектерде болуы керек және аз шамадағы стохастикалық вариациялардан өтуі керек. Ақаулық инъекция бірте-бірте дрейф, қадамға негізделген вариациялар және үзіліссіз ауытқулар сияқты тартылған телеметриялық арналардағы нақты вариацияларды тудырады.



Сурет 6 – Классикалық FDIR және ұсынылған ЖИ негізіндегі диагностикалық тәсіл үшін телеметрия негізінде ақауды анықтау әрекетін салыстыру

Симуляцияда батарея деградациясы, жылу тұрақсыздығы, байланыс сапасының нашарлауы, процессор жүктемесінің артуы және сенсор дрейфі сияқты сценарийлер қарастырылды. ЖИ-негізделген модуль шекті мониторингпен салыстырғанда баяу деградацияны ертерек анықтады және анықтау кідірісін айтарлықтай қысқартты. 1U–3U кестелерде негізгі сандық нәтижелер келтірілген (кестелер Word-та редактірленетін түрде беріледі).

Кесте 1 – Симуляциядағы ақау сценарийлері және телеметриялық индикаторлар

Ақау түрі	Ішкі жүйе негізі	Әсер ететін телеметрия
Батарея деградациясы	EPS	Шина кернеуі, ток тұтынуы
Температуралық тұрақсыздық	TCS	Температура сенсорлары
Байланыс деградациясы	COM	RSSI, пакет жоғалту
Процессор артық жүктелуі	OBC	CPU жүктемесі, watchdog оқиғалары
Сенсор дрейфі	ADCS	Сенсор ығысуы, бұрыштық жылдамдық

1-кестеде симуляцияда қолданылған негізгі ақау түрлері, олардың әсер ететін ішкі жүйелері және телеметриялық индикаторлары көрсетілген. Бұл параметрлер ақауларды телеметрия негізінде анықтауға жеткілікті диагностикалық ақпарат беретінін көрсетеді.

Кесте 2 – Ұсынылған жүйенің ақауды анықтау және оқшаулау көрсеткіштері

Ақау түрі	Анықтау дәлдігі, %	Оқшаулау дәлдігі, %
Батарея деградациясы	96.2	93.8
Температуралық тұрақсыздық	97.5	95.1
Байланыс ақауы	95.8	94.0
Процессор жүктемесі	98.1	96.7
Сенсор дрейфі	94.6	92.3

2-кестеде ұсынылған жүйенің ақауларды анықтау және оқшаулау дәлдігі келтірілген. Барлық ақау түрлері бойынша анықтау дәлдігі 94 %–дан жоғары болды. Ең жоғары нәтиже процессор жүктемесін анықтауда байқалды, ал баяу дамиды сенсор дрейфі кезінде дәлдік салыстырмалы түрде төмен болды. Дегенмен, бұл көрсеткіштер классикалық шекті мониторингтен жоғары.

Кесте 3 – Анықтау кідірісі және есептеу өнімділігі

Әдіс	Орташа анықтау кідірісі, с	Инференс уақыты, мс	CPU жүктемесі, %
Классикалық шекті мониторинг	18.4	–	–
Гибридті ЖИ-негізделген тәсіл	4.7	12.3	9.6

3-кестеге сәйкес, гибридті ЖИ-негізделген тәсіл ақауды орташа 4.7 секундта анықтап, классикалық мониторингке қарағанда анықтау кідірісін айтарлықтай қысқартты (18.4 с). Инференс уақыты мен CPU жүктемесі CubeSat-классындағы борттық есептеуіштер үшін рұқсат етілген деңгейде қалды .

Жалпы алғанда, алынған нәтижелер ұсынылған гибридті диагностикалық жүйенің ақауларды ерте кезеңде, дәл және есептеу ресурстарын үнемдей отырып анықтай алатынын

көрсетті. Бұл тәсіл наноспутниктердің автономдылығын және миссияның сенімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

### **Қорытынды.**

Зерттеу нәтижелері ұсынылған гибриді борттық диагностикалық жүйенің тек телеметриялық деректер негізінде наноспутник ақауларын тиімді анықтап, оқшаулауға қабілетті. Классикалық шекті бақылаумен салыстырғанда, жасанды интеллект негізіндегі модуль жүйенің қалыпты мінез-құлқын үйреніп, белгіленген шектерді әрдайым аспайтын ауытқуларды анықтай отырып, біртіндеп нашарлау мен өзара байланысты аномалияларды жақсырақ анықтайды. Дәстүрлі әдістер кенеттен және аса қауіпті ақауларды анықтауда тиімді болып қала береді, бірақ олардың алдын ала орнатылған шектерге тәуелділігі анықтауды кешіктіруі мүмкін.

Ережелерге негізделген мониторинг пен жасанды интеллект талдауын біріктіретін гибриді архитектура сенімділік пен бейімделгіштік арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз етеді. Бұл тәсіл жалған оң нәтижелер ықтималдығын азайтады және автономды наносателлит миссиялары үшін аса маңызды. Сонымен қатар, жеңіл нейрондар алгоритмі CubeSat класындағы борттық компьютерлерде есептеу тұрғысынан мүмкін екенін көрсетті: процессор жүктемесі төмен және энергия шектеулерін асырамай нақты уақытта жұмыс істеу қабілеті бар. Жалпы алғанда, телеметрияға бағытталған жасанды интеллекті мен классикалық мониторингті біріктіру наносателлиттердің техникалық жағдайын бақылаудың автономиясы мен тиімділігін арттыруға арналған практикалық және масштабталатын шешім болып табылады. Болашақ жоспарларға аппараттық-бағдарламалық циклдік сынақтарды өткізу, нақты ұшу деректерін пайдалана отырып тексеру, миссия кезінде бейімделген модельдік жаңартуларды енгізу, қалған ресурстарды бағалауға арналған болжау функцияларын әзірлеу және бұл тәсілді көп спутникті және спутниктер торабы миссияларына кеңейту кіреді.

### **Әдебиеттер тізімі**

1. Poghosyan, A. & Golkar, A. (2021). Эволюция CubeSat: анализ возможностей CubeSat для выполнения научных миссий. *Progress in Aerospace Sciences*; 122, 100671. DOI: 10.1016/j.paerosci.2020.100671.
2. Nieto-Peroy, C. & Emami, M.R. (2021). Обнаружение и диагностика отказов CubeSat: обзор и классификация. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*; 36(4), 6–21. DOI: 10.1109/MAES.2020.3043420.
3. Fejjari, A., Bouchene, M.A. & Ouertani, M. (2025). Обзор методов обнаружения аномалий в телеметрии космических аппаратов: методы и эталоны. *Applied Sciences*; 15(10), 5653. DOI: 10.3390/app15105653.
4. Ibrahim, S.K., Ahmed, A., Zeidan, M.A.E. & Ziedan, I.E. (2020). Методы машинного обучения для диагностики отказов спутников. *Ain Shams Engineering Journal*; 11(1), 45–56. DOI: 10.1016/j.asej.2019.08.006.
5. Ruzczak, B., Machowski, J. & Kelemen, R. (2025). OPSSAT-AD: эталонный набор данных, готовый к применению ИИ, для обнаружения аномалий CubeSat. *Scientific Data*; 12, 35. DOI: 10.1038/s41597-025-05035-3.
6. Walker, R., McDonald, M. & Pullin, H. (2023). Легковесные бортовые методы машинного обучения для обнаружения аномалий в телеметрии CubeSat. *IEEE Access*; 11, 48762–48775. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3272145.
7. Cuéllar, S., Díaz, A. & López, J. (2024). Объяснимая диагностика аномалий в телеметрии космических аппаратов с использованием методов машинного обучения. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*; 133, 108083. DOI: 10.1016/j.engappai.2024.108083.

8. Crotti, E. & Colagrossi, A. (2025). Подходы машинного обучения к диагностике и обнаружению отказов космических аппаратов на основе данных. *Applied Sciences*; 15(14), 7761. DOI: 10.3390/app15147761.
9. Куттыбаева, А., Жамалова, С., Абдуллаев, М., Домрачев, В. и др. (2025). Разработка интеллектуальной системы управления и энергоменеджмента для стратосферных телекоммуникационных аэростатов. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*; 6(9), 16–27. DOI: 10.15587/1729-4061.2025.346938.
10. Таштай, Й., Смаилов, Н., Тажен, К. и др. (2025). Интеграция GNSS и волоконно-оптического гироскопа для повышения устойчивости навигации при потере спутникового сигнала. В материалах Международной конференции по электротехнике и фотонике (EExPolytech), 412–415. DOI: 10.1109/EExPolytech66949.2025.11253802.
11. Смаилов, Н., Цыпоренко, В., Уалиев, З., Сабibolda, А. и др. (2025). Повышение точности спектрально-корреляционного радиопеленгования и оценки задержек с использованием машинного обучения. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*; 2. DOI: 10.15587/1729-4061.2025.327021.

### References

1. Poghosyan, A. & Golkar, A. (2021). CubeSat evolution: Analyzing CubeSat capabilities for conducting science missions. *Progress in Aerospace Sciences*; 122, 100671. DOI: 10.1016/j.paerosci.2020.100671.
2. Nieto-Peroy, C. & Emami, M.R. (2021). CubeSat fault detection and diagnosis: A review and classification. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*; 36(4), 6–21. DOI: 10.1109/MAES.2020.3043420.
3. Ibrahim, S.K., Ahmed, A., Zeidan, M.A.E. & Ziedan, I.E. (2020). Machine learning techniques for satellite fault diagnosis. *Ain Shams Engineering Journal*; 11(1), 45–56. DOI: 10.1016/j.asej.2019.08.006.
4. Crotti, E. & Colagrossi, A. (2025). Machine learning approaches for data-driven self-diagnosis and fault detection in spacecraft systems. *Applied Sciences*; 15(14), 7761. DOI: 10.3390/app15147761.
5. Ruszczak, B., Machowski, J. & Kelemen, R. (2025). OPSSAT-AD: AI-ready benchmark dataset for CubeSat anomaly detection. *Scientific Data*; 12, 35. DOI: 10.1038/s41597-025-05035-3.
6. Fejjari, A., Bouchene, M.A. & Ouertani, M. (2025). A review of anomaly detection in spacecraft telemetry: Methods and benchmarks. *Applied Sciences*; 15(10), 5653. DOI: 10.3390/app15105653.
7. Cuellar, S., Diaz, A. & Lopez, J. (2024). Explainable anomaly detection in spacecraft telemetry using machine learning techniques. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*; 133, 108083. DOI: 10.1016/j.engappai.2024.108083.
8. Walker, R., McDonald, M. & Pullin, H. (2023). Lightweight onboard machine learning for anomaly detection in CubeSat telemetry. *IEEE Access*; 11, 48762–48775. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3272145.
9. Kutybayeva, A., Zhamalova, S., Abdullayev, M., Domrachev, V. et al. (2025). Development of an intelligent control and energy management system for stratospheric telecommunication airships. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*; 6(9), 16–27. DOI: 10.15587/1729-4061.2025.346938.
10. Tashtay, Y., Smailov, N., Tazhen, K. et al. (2025). Integration of GNSS and fiber-optic gyroscope for robust navigation under satellite signal loss. V materialakh International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech); 412–415. DOI: 10.1109/EExPolytech66949.2025.11253802.
11. Smailov, N., Tsyporenko, V., Ualiyev, Z., Sabibolda, A. et al. (2025). Improving spectral-correlation direction finding accuracy using machine learning. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*; 2. DOI: 10.15587/1729-4061.2025.327021.

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА БОРТОВОГО СОСТОЯНИЯ НАНОСПУТНИКОВ НА ОСНОВЕ ТЕЛЕМЕТРИИ

**Аннотация.** Поскольку наноспутники функционируют в условиях ограниченного участия человека, бортовая диагностика отказов является критически важным фактором надежного выполнения миссий. В данной статье рассматривается разработка наноспутника формата 1U–3U CubeSat, оснащённого автономной системой обнаружения и изоляции отказов на основе искусственного интеллекта (ИИ). Исследование направлено на создание системы управления техническим состоянием наноспутника с использованием методов машинного обучения.

В работе проводится сравнение классического порогового мониторинга и современных ИИ-подходов, а также предлагается бортовой диагностический процесс, обеспечивающий выявление аномалий в ключевых подсистемах с высокой точностью и минимальной задержкой. Описываются аппаратная архитектура, симулятор отказов на основе телеметрических данных и алгоритм ИИ, обученный на моделируемых данных в номинальных и аварийных режимах.

Предложенная система демонстрирует точность обнаружения отказов около 98%, значительно превосходя классические методы, при этом задержка обнаружения составляет всего несколько секунд. Полученные результаты подтверждают, что методы машинного обучения эффективно дополняют модельно-ориентированную диагностику. Разработанная ИИ-ориентированная диагностическая система повышает устойчивость миссий наноспутников за счёт раннего выявления аномалий и автономной реализации восстановительных мероприятий.

**Ключевые слова:** наноспутник; CubeSat; телеметрия; обнаружение и изоляция отказов; искусственный интеллект; машинное обучение; гибридная диагностика; встраиваемая система.

## INTELLIGENT TELEMETRY-BASED DIAGNOSIS OF NANOSATELLITE ONBOARD STATE

**Abstract.** Since nanosatellites operate with limited human intervention, onboard fault diagnosis is a critical factor in ensuring reliable mission execution. This paper addresses the development of a 1U–3U CubeSat nanosatellite equipped with an autonomous fault detection and isolation system based on artificial intelligence (AI). The study focuses on the design of a nanosatellite health management system employing machine learning techniques.

The work compares classical threshold-based monitoring with modern AI approaches and proposes an onboard diagnostic workflow capable of detecting anomalies in key subsystems with high accuracy and low latency. The hardware architecture, a telemetry-based fault simulation environment, and an AI algorithm trained on simulated telemetry data under nominal and faulty operating conditions are described.

The proposed system achieves approximately 98% fault detection accuracy, significantly outperforming classical methods, while maintaining detection latencies of only a few seconds. The results demonstrate that machine learning techniques effectively complement model-based diagnostic approaches. The developed AI-based diagnostic system enhances nanosatellite mission resilience by enabling early anomaly detection and autonomous execution of recovery actions.

**Keywords:** nanosatellite; CubeSat; telemetry; fault detection and isolation; artificial intelligence; machine learning; hybrid diagnostics; embedded system

**Авторлар туралы мәлімет**

Боранбаева Анаргүл Талғатқызы	Әл Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің 3-ші курс докторанты, Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы механика және машинатану институтының ғылыми қызметкері, Қ.И. Сәтпаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университетінің аға оқытушысы, Қазақстан, Алматы E-mail: <a href="mailto:boranbayeva.anargul.talgatkyzy@gmail.com">boranbayeva.anargul.talgatkyzy@gmail.com</a>
Серғазин Ғани Құдайбергеноұлы	PhD, қауымдастырылған профессор, АЛТ университеті, Қазақстан, Алматы, E-mail: <a href="mailto:g.balbayev@gmail.com">g.balbayev@gmail.com</a>
Имашева Гүлнар Махмутовна	техника ғылымдарының докторы, профессор, «Логистика» кафедрасы, «Көлік инжинирингі және логистика» мектебі, Қ.И. Сәтпаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., Қазақстан, E-mail: <a href="mailto:g.imasheva@satbayev.university">g.imasheva@satbayev.university</a>
Бағитова Қаламқас Бағитқызы	PhD, қауымдастырылған профессор, Х. Досмұхамедов атындағы Атырау университетінің «Информатика» кафедрасының меңгерушісі, Қазақстан, Атырау, E-mail: <a href="mailto:KBBagitova@gmail.com">KBBagitova@gmail.com</a>
Илиев Теодор	PhD, профессор, Русе университеті, Болгария E-mail: <a href="mailto:tiliev@uni-ruse.bg">tiliev@uni-ruse.bg</a>

**Сведения об авторах**

Боранбаева Анаргүл Талғатовна	докторант 3-го курса Казахского национального университета имени аль-Фараби, научный сотрудник Института механики и машиноведения имени академика О.А. Жолдасбекова, старший преподаватель Казахского национального технического исследовательского университета имени К.И. Сатпаева, Казахстан, г. Алматы. E-mail: <a href="mailto:boranbayeva.anargul.talgatkyzy@gmail.com">boranbayeva.anargul.talgatkyzy@gmail.com</a>
Серғазин Ғани Құдайбергенович	PhD, ассоциированный профессор, университет АЛТ, Казахстан, Алматы E-mail: <a href="mailto:g.balbayev@gmail.com">g.balbayev@gmail.com</a>
Имашева Гүлнар Махмутовна	доктор технических наук, профессор кафедры «Логистика» Школы «Транспортный инжиниринг и Логистика» Казахского национального технического исследовательского университета имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан, E-mail: <a href="mailto:g.imasheva@satbayev.university">g.imasheva@satbayev.university</a>
Бағитова Қаламқас Бағитовна	PhD, ассоциированный профессор, заведующая кафедрой «Информатика» Атырауского университета имени Халела Досмұхамедова, Казахстан, г. Атырау, E-mail: <a href="mailto:KBBagitova@gmail.com">KBBagitova@gmail.com</a>
Илиев Теодор	PhD, профессор, Русенский университет, Болгария E-mail: <a href="mailto:tiliev@uni-ruse.bg">tiliev@uni-ruse.bg</a>

**Information about the authors**

Anargul Boranbayeva	3rd-year PhD student at Al-Farabi Kazakh National University, Researcher at the Institute of Mechanics and Machine Science named after Academician O.A. Zholdasbekov, and Senior Lecturer at Satbayev Kazakh National Technical Research University, Kazakhstan, Almaty, E-mail: <a href="mailto:boranbayeva.anargul.talgatkyzy@gmail.com">boranbayeva.anargul.talgatkyzy@gmail.com</a>
Gani Serghazin	PhD, Associate Professor, ALT University, Kazakhstan, Almaty. E-mail: <a href="mailto:g.balbayev@gmail.com">g.balbayev@gmail.com</a>
Gulnar Imasheva	Doctor of Technical Sciences, Professor, Department Logistics School of Transport engineering and Logistics, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, Email: <a href="mailto:g.imasheva@satbayev.university">g.imasheva@satbayev.university</a>
Kalamkas Bagitova	PhD, Associate Professor, Head of the Computer Science Department, Kh. Dosmukhamedov Atyrau University, Kazakhstan, Atyrau. E-mail: <a href="mailto:KBBagitova@gmail.com">KBBagitova@gmail.com</a>
Teodor Iliev	PhD, Professor, University of Ruse, Bulgaria. E-mail: <a href="mailto:tiliev@uni-ruse.bg">tiliev@uni-ruse.bg</a>