

Д. Калманова, А. Базарбек, О. Әбдірашев

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
E-mail: asyl.bazarbek.92@mail.ru

ЭНЕРГИЯМЕН ЖАБДЫҚТАУ ЖҮЙЕСІНІҢ СЕНІМДІЛІГІН МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ БОЛЖАУ

Аңдатпа. Ғарыш аппараттарының энергиямен жабдықтау жүйесінің сенімділігін зерттеу қазіргі ғарышкерліктегі маңызды бағыт болып табылады. Ғылым мен инженерияның бұл саласы ғарыштық миссиялардың өміршеңдігін сақтау үшін қажетті энергетикалық жүйелердің сенімділігі мен беріктігін қамтамасыз ету үшін математикалық модельдерді, талдау әдістерін және инновациялық технологияларды әзірлеуге және қолдануға арналған.

Ғарыштық миссиялардың энергияға сыни тәуелділігі ғарыштық ортаның экстремалды жағдайында үздіксіз энергетикалық қоректенуді қамтамасыз ету үшін жоғары дәлдіктегі әдістер мен технологияларды әзірлеуді талап етеді.

Ғарыш аппараттарының энергиямен жабдықтау жүйесінің сенімділігін модельдеу және болжау ғарыштық миссиялардың үздіксіз жұмыс істеуін қамтамасыз ету және олардың ұзақтығын арттыру мақсатында зерттеулер мен әзірлемелерде маңызды рөл атқарады.

Біздің мақалада ұшу кезінде өндірілген энергиямен жабдықтау сипаттамаларын және бүкіл қызмет ету мерзімінде тұтынылатын жалпы энергияны есептеу жүргізілді. Сондай-ақ өндірілген энергияны пайдалану пайызы, тәулігіне қуаттың артық немесе тапшылығы және т. б. есептелді.

Түйінді сөздер. Энергия, аккумулятор батареясы, күн панелі, жабдық, істен шығу жиілігі.

Кіріспе.

Энергетика объектілерінің қасиеттерін зерттеу жүйелік энергетикалық зерттеулердің маңызды құрамдас бөліктерінің бірі болып табылады [1]. Қасиеттердің көмегімен объектілердегі кез келген ерекшеліктер мен жалпыларды көрсетуге болады. Жеке қасиеттерді өлшеу мүмкіндігі оларды дұрыс басқаруға мүмкіндік береді. Нақты объектілердің қасиеттерін және олардың модельдерін зерттеу соңғысының біріншісіне сәйкестігінің негізгі критерийі болып табылады.

Аталған [2] жұмысқа сәйкес, сенімділік - бұл «объектінің белгілі бір режимдерде және қолдану, техникалық қызмет көрсету, сақтау және тасымалдау жағдайларында қажетті функцияларды орындау қабілетін сипаттайтын барлық параметрлердің мәндерін белгіленген шектерде уақыт бойынша сақтау қасиеті».

Энергетикалық жүйелердің сенімділік теориясында бұл қасиет «объектінің белгілі бір жұмыс жағдайында берілген функцияларды белгілі бір көлемде орындау қабілеті» арқылы анықталады [3].

Ғарыш кеңістігінде сенімділік ғарыш аппараттарын жобалау мен пайдаланудың негізгі аспектісі болып табылады. Олар алыс ғарыштық вакуумда, радиациялық әсерге және олардың сенімділігі мен беріктігіне қауіп төндіретін басқа факторларға ұшыраған кезде төтенше жағдайларда жұмыс істеуі керек. Бұл тұрғыда ғарыш аппараттарының энергиямен жабдықтау жүйесінің сенімділігін модельдеу және болжау ғарышта сәтті миссияларды қамтамасыз етудің маңызды құралдарына айналуға.

Энергиямен жабдықтау жүйесінің сенімділігін болжау энергетикадан аэроғарыштық техникаға дейінгі салалар мен салалардың кең ауқымын қамтитын зерттеудің өзекті және көп қырлы бағыты болып табылады. Бұл салада үздіксіз энергиямен жабдықтауды қамтамасыз ету үшін қажетті энергетикалық жүйелердің сенімділігін бағалауға және арттыруға мүмкіндік беретін математикалық модельдерді, деректерді талдау әдістерін және технологияларды әзірлеуге баса назар аударылады.

Зерттеулер энергиямен жабдықтау саласында, әсіресе қазіргі заманғы технологиялық және экологиялық сын-қатерлер жағдайында сенімділікті қамтамасыз етудің маңыздылығын көрсетеді. Ол сондай-ақ тиімдірек және тұрақты энергиямен жабдықтау жүйелерін құру үшін деректерді модельдеу мен талдаудың озық әдістерін қолдану мәселесін көтереді, бұл сайып келгенде біздің заманауи инфрақұрылымымыздың тұрақтылығы мен тұрақтылығын қамтамасыз етуге және өмір сүру сапасын жақсартуға ықпал етеді.

Ғарыш аппаратының энергиямен жабдықтау жүйесінің сенімділігін модельдеу және болжау ғарыш миссияларының тұрақты жұмысын қамтамасыз етуге және олардың ұзақтығын барынша арттыруға бағытталған зерттеулер мен әзірлемелердің маңызды бағыты болып табылады.

Материалдар мен тәсілдер.

Энергиямен жабдықтау жүйесі (EPS) математикалық моделін анықтау үшін ықтималдықты модельдеудің әдеттегі әдісі қолданылады. EPS сенімділік теңдеуін келесідей құруға болады:

$$R_{\text{ЭС}} = R_{\text{СП}} \cdot R_{\text{АБ}} \cdot R_{\text{УКП}}, \quad (1)$$

мұнда, $R_{\text{ЭС}}$ - электрмен жабдықтау жүйесінің сенімділік коэффициенті;

$R_{\text{СП}}$ - күн панелінің сенімділік коэффициенті;

$R_{\text{АБ}}$ - батареяның сенімділік коэффициенті;

$R_{\text{УКП}}$ - сенімділік коэффициенті басқару және бақылау қуат;

«2/8»'2 ' дауыс беру конфигурациясына қосылған күн панелінің (SA) ішкі жүйесі сенімділік теңдеуіне ие болады:

$$R_{\text{SA}} = \sum_{i=m}^n \frac{n!}{i!(n-i)!} \cdot R_{\text{SAS}} \cdot (1 - R_{\text{SAS}})^{n-1}, \quad (2)$$

“n” – SA секциялардың жалпы саны,

8-ге тең, “m = n - k”,

“k” - 1 артық SA секцияларының саны 1-ге тең

Мұндай секциялардың ықтимал кенеттен істен шығуын талдаудан келесі сәтсіздіктер әр секцияның толық істен шығуына әкеледі:

- оқшаулағыш диодтағы ашық тізбектің ақауы [4];

- қысқа тұйықталу немесе жалпы ашық тізбек (деградацияның бұзылуы);

- шунттау реттегішіндегі қысқа тұйықталу.

Бұл дизайнда қуат маңызды параметр болғандықтан, ақауларға төзімділік процедурасы қорғаныс тізбегі қосылған сақтандырғышы бар шунттау реттегіштерін қолдану арқылы жүзеге асырылды, оның негізгі функциясы оқшаулағыш диодтың қысқа тұйықталуы сәтсіз болған жағдайда шунттау реттегішіндегі қысқа тұйықталу әсерін (оқшаулау) елемей болып табылады. Бұл әрекеттің жалғыз кемшілігі - микроконтроллерде сақталатын басқару алгоритмінде өңделетін күн панелінің осы бөлімі үшін айналып өту мүмкіндігін жоғалту. Күн модулінің математикалық моделінде жүйенің істен шығуы кезінде диодтың қысқа тұйықталу оқшаулауының әсерін болдырмау үшін жұмыс істейтін

сериялық диод бар, өйткені спутниктік шинаның кернеу диапазоны күн панелі модульдерінің сериялық диодтарын бұза алмайды, бұл күн модульдерін жалған жүктемелерге айналдырмайды [5].

Шунттау реттегішінің ашық тізбегінің істен шығуы еленбейді, өйткені бұл тек микроконтроллерде сақталатын басқару алгоритмінде ескерілетін күн панелі бөлімі үшін шунттау құрылғысының жоғалуына әкеледі.

Алдыңғы сәтсіздік режимдерінен және күн панелі секцияларының функционалдық схемасынан әрбір SA секциясының сенімділік теңдеуі келесідей жасалуы мүмкін:

$$R_{SAS} = R_{SAM} \cdot R_{iD}^* [1 - (1 - R_{SR}) \cdot R_{iD}], \quad (3)$$

мұнда: R_{SA} - күн батареясының модулінің ақаусыз жұмыс істеу ықтималдығы (деградация);

R_{iD}^* - ашық тізбекті оқшаулағыш диодтың жұмыс істеу ықтималдығы;

R_{sx}^* - шунттаушы қысқа тұйықталу реттегішінің ақаусыз жұмыс істеу ықтималдығы;

R_{iD}^* - оқшаулағыш қысқа тұйықталу диодының жұмыс істеу ықтималдығы.

«2/22» дауыс беру конфигурациясына қосылған батарея элементтері сенімділік теңдеуі:

$$R_{CI} = \sum_{i=m}^n \frac{n!}{i!(n-i)!} R_{ECI} (1 - R_{ECH})^{n-1}. \quad (4)$$

Мұнда:

nb - батарея бөлімдерінің жалпы саны 22,

$mb = nb - kb$,

“ kb ” - Батареяның резервтік бөлімдерінің саны 1-ге тең.

Мұндай бөлімдердің кенеттен істен шығуын талдаудан келесі пайда болған сәтсіздіктер әр бөлімнің толық істен шығуына әкеледі:

- қуат көзінің кездейсоқ істен шығуы (қысқа тұйықталу);

- қуат көзінің деградациялық істен шығуы және CEU бір мезгілде істен шығуы.

«Break» типті литий-ионды ұяшықтардың істен шығуы қарастырылмайды, осыған байланысты алдыңғы істен шығу режимдерінен және аккумулятордың ішкі жүйесінің функционалдық схемасынан біз әр батарея ұяшығының сенімділік теңдеуін жасай аламыз, оны келесідей көрсетуге болады:

$$R_{BS} = R_{BS} [1 - (1 - R_{BX}) (1 - R_{CEU})]. \quad (5)$$

R_{BS} - батарея ұяшығы үшін қысқа тұйықталу түріндегі ақаусыз жұмыс істеу ықтималдығы;

R_B - батарея ұяшығының ақаусыз жұмыс істеу (деградация) ықтималдығы;

R_{CEU} - CEU жұмысының ықтималдығы (деградация).

Басқару ішкі жүйесінің функционалды элементтерінің істен шығуының салдарын талдай отырып, PMC ішкі жүйесінің істен шығуы тек MCM және SM блоктары істен шыққан жағдайда ғана болатындығы анықталды. PMC үшін сенімділік теңдеуі болып табылады:

$$R_{PMC} = R_{MCM} \cdot R_{SM}, \quad (6)$$

мұнда:

$$R_{MCM} = R_{MCC} (1 - \ln(R_{MCC})), \quad (7)$$

$$R_{SM} = \sum_{k=ms}^{NS} , \quad (8)$$

“ns - басқару ішкі жүйесінің тізбектерінің жалпы саны 3-ке тең;

а “ns = ms - ks”;

“ks” - ішкі басқару жүйесінің резервтік тізбектерінің саны (1-ге тең).

Болжамдар талаптардың орындылығын анықтау және осы талаптарға қол жеткізудегі прогресті бағалау құралы болып табылады. Жалпы, әзірлеушіге қол жетімді сенімділікті болжау әдістерінің иерархиясы бар. Бұл әдіс MIL-HDBK-217 сериясында жақсы сипатталған [6].

Бұл мақалада жүйенің құрылғылары мен компоненттеріне қолданылатын болжамды талдауды ұсынатын қысқаша мысал келтірілген. Бұл мысал егжей-тегжейлі дизайнның функционалды блок-схемаларынан алынған келесі құрылғылардан тұратын МСС блогы болып табылады (бұл күрделі орнату немесе ең нашар жағдай деп есептеледі): - «МС» микроконтроллері, - «ADC» сандық аналогтық түрлендіргіші, - «LOA» сызықтық операциялық күшейткіштері (10 бірлік), - «OC» оптоқосқыштары (40 бірлік), - «BT» BJT транзисторлары (40 бірлік), - «ZD» Зенер диодтары (5 бірлік), - «GPD» жалпы мақсаттағы диодтары (5 бірлік), - «PD» қуат диодтары (3 бірлік), - «C» конденсаторлары (50 бірлік), - «R» резисторлары (70 бірлік), - «CON» қосқыштары (25 бірлік), «REL» релесі (10 бірлік) және, - «CBO» Екі қабатты баспа платалары (2 бірлік). Әрбір құрылғы үшін жұмыс және жұмыс істемейтін істен шығу жылдамдығын анықтаудың мысалы ретінде осы мақалада МС қолданылады. МС ATMEL Corp көмегімен жасалады, ол AVR технологиясына негізделген. МС жұмысының істен шығу жиілігі; нәтижелер 1-кестеде келтірілген.

1 кесте - МК пайдалану кезінде істен шығу жиілігін есептеу кезеңдері

Параметрлер	Мәні	Дереккөз/ пайдаланылған деректер
МК үшін сапа коэффициенті	1	В класындағы скрининг деңгейіне арналған MIL-HDBK-217 сапа коэффициенттерінің кестелерінен (сонымен қатар ATMEL ұсынған)
Ұзақ мерзімді, технологияның қаншалықты жетілгеніне байланысты	1	Себебі ATMEL өндірісте 2 жылдан астам уақыт болды
Қоршаған орта факторы	12	Mt түріне арналған MIL-HDBK-217 қоршаған орта факторларының кестелері
Кернеудің үдеу коэффициенті	1	Себебі МК-бұл CMOS құрылғысы
Орау коэффициенті $C_1 = 3,6 * 10^4 * (64)^{1.08} = 0.03213$	0.0321	64 түйреуішпен оралған МС
Қиындық коэффициенті	0.02	Сандық микроэлектроника жағдайында MIL-HDBK-217 күрделілік коэффициенттерінің кестелері, I ескерту
Температураның жоғарылау коэффициенті	0.3193	2 ескерту
Ескерту: автор NASA анықтамалығы негізінде құрастырған		

Нәтижелер мен талқылау.

Кестеге және әдебиеттерден мәліметтер жинауға сүйене отырып, микроконтроллер компонентінің орташа істен шығу жылдамдығын есептеуге болады. Сәтсіздік жиілігін есептеу үшін компоненттің құрамдас бөлігіне назар аудару керек. Осы параметрлерге сүйене отырып, әмбебап формула компонентке байланысты өзгереді. Бұл микроконтроллерде Atmel орташа жиілікті келесі формула бойынша аламыз:

$$\lambda = \pi_1 \cdot \pi_Q (C_1 \cdot \pi_T \cdot \pi_V + C_2 \cdot \pi_E), \quad (9)$$

мұнда:

π_1 – ұзақ мерзімділік коэффициенті;

π_Q – сапа коэффициенті;

π_E – қоршаған орта коэффициенті;

π_V – кернеу коэффициенті;

C_1 – орау коэффициенті;

C_2 – қиындық коэффициенті.

Осылайша микроконтроллердің орташа істен шығу жылдамдығы:

$$\lambda = 1 \cdot (0,02 \cdot 0,3193 \cdot 1 + 0,03213 \cdot 12) \cdot 1 = 0,3920.$$

Орташа сәтсіздік жиілігінің көмегімен сенімділік коэффициентін одан әрі есептеуге болады. Жабдық элементінде $\lambda(t)$ ақаулық жиілігі болған кезде, оның өмір сүру ықтималдығы 0-ден t -ге дейін немесе $R(t)$ сенімділігі, содан кейін интегралдық теңдеу арқылы анықталады. Бұл өрнектің жалпы формасы бар, ол $\lambda(t)$ сәтсіздік жиілігінің өзгеру заңына уақыт өте келе тәуелді емес. Егер сәтсіздік жиілігі λ тұрақты болса, сенімділік үшін өрнек төмендейді:

$$R_{MK} = e^{-2,699 \cdot 10^{-6} \cdot 61320} = 0,847467592.$$

2 кесте - Басқару ішкі жүйесінің барлық компоненттерінің орташа істен шығу жиілігі және қуатты басқару

Элемент	Ұсынылған сәтсіздік жылдамдығы / 10^{-6} сағат	Саны	Жалпы сәтсіздік деңгейі / 10^{-6} сағат
Микроконтроллер	0,3920	1	0,3920
Сандық аналогтық түрлендіргіш	0,1	1	0,1
Сызықтық операциялық күшейткіштер	0,1	10	1
Оптикалық қосқыштар	0,007	40	0,28
Транзисторлар	0,01	40	0,4
Зенер диодтары	0,02	5	0,1

Диодтар	0,05	3	0,15
Күш диодтары	0,01	3	0,03
Конденсаторлар	0,002	50	0,1
Резисторлар	0,001	70	0,07
Қосқыштар	0,001	25	0,025
Реле	0,002	10	0,02
Баспа екі қабатты платалар	0,016	2	0,032
Жалпы			2,699

3 кесте - Шунттау реттегішін пайдалану кезінде істен шығу жиілігін есептеу кезеңдері

Параметрлер	Мәні	Дереккөз/ пайдаланылған деректер
Сапа коэффициенті	0,25	U класындағы скрининг деңгейіне арналған MIL-HDBK-217F сапа коэффициенттерінің кестелерінен
Ұзақ мерзімді, технологияның қаншалықты жетілгеніне байланысты	1	Себебі ол өндірісте 7 жылдан астам уақыт болды
Қоршаған орта факторы	4	MIL-HDBK-217 қоршаған орта факторларының кестелері
Орау коэффициенті	0.012	Барлық MIL-HDBK-217F чиптеріне арналған коэффициент кестесі
Қиындық коэффициенті	0.02	Сандық микроэлектроника жағдайында MIL-HDBK-217 күрделілік коэффициенттерінің кестелері, I ескерту

Кестелер мен әдебиеттерден мәліметтер жинау негізінде шунттау реттегіші компонентінің орташа істен шығу жылдамдығын есептеуге болады. Сәтсіздік жиілігін есептеу үшін компоненттің құрамдас бөлігіне назар аудару керек. Осы параметрлерге сүйене отырып, әмбебап формула компонентке байланысты өзгереді. Бұл шунттау реттегішінде біз осы формула бойынша орташа жиілікті аламыз:

$$\lambda = \pi_1 \cdot \pi_Q (C_1 \cdot \pi_T + C_2 \cdot \pi_E), \quad (10)$$

мұнда:

π_1 – ұзақ мерзімділік коэффициенті;

π_Q – сапа коэффициенті;

π_E – қоршаған орта коэффициенті;

C_1 – орау коэффициенті;

C_2 – қиындық коэффициенті.

Осылайша реттегіштің орташа істен шығу жиілігі:

$$\lambda_{\text{ШР}} = 1 \cdot (0,02 \cdot 0,3193 + 0,03213 \cdot 8 \cdot) \cdot 1 = 2,28.$$

Орташа сәтсіздік жиілігінің көмегімен сенімділік коэффициентін одан әрі есептеуге болады. Жабдық элементінде $\lambda(t)$ ақаулық жиілігі болған кезде, оның өмір сүру ықтималдығы 0-ден t -ге дейін немесе $R(t)$ сенімділігі, содан кейін интегралдық теңдеу арқылы анықталады. Бұл өрнектің жалпы формасы бар, ол $\lambda(t)$ сәтсіздік жиілігінің өзгеру заңына уақыт өте келе тәуелді емес. Егер сәтсіздік жиілігі λ тұрақты болса, сенімділік үшін өрнек төмендейді:

$$R_{\text{ШР}} = e^{-2,28 \cdot 10^{-6} \cdot 61320} = 0,995.$$

4 кесте - Күн батареясының модулін пайдалану кезінде істен шығу жиілігін есептеу қадамдары

Параметрлер	Мәні	Дереккөз/ пайдаланылған деректер
Сапа коэффициенті	1	MIL-HDBK-217 сапа коэффициенттерінің кестелерінен
Ұзақ мерзімді, технологияның қаншалықты жетілгеніне байланысты	1	Себебі ATME1 өндірісте 2 жылдан астам уақыт болды
Қоршаған орта факторы	1	Mt түріне арналған MIL-HDBK-217 қоршаған орта факторларының кестелері
Орау коэффициенті	1	Себебі MC-бұл CMOS құрылғысы және ол кернеуді 12 вольттан аспайды
Қиындық коэффициенті	0.2	Сандық микроэлектроника жағдайында MIL-HDBK-217 күрделілік коэффициенттерінің кестелері, I ескерту
Температураның жоғарылау коэффициенті T	0.3193	2 ескерту

Кестеге және әдебиеттерден мәліметтер жинауға сүйене отырып, батарея компонентінің орташа істен шығу жылдамдығын есептеуге болады. Сәтсіздік жиілігін есептеу үшін компоненттің құрамдас бөлігіне назар аудару керек. Бұл параметрлерде әмбебап формула компонентке байланысты өзгереді. Бұл батареяда біз осы формула бойынша орташа жиілікті аламыз:

$$\lambda = \pi_1 \cdot \pi_Q (\pi_T \cdot \pi_V + C_2 \cdot \pi_E), \quad (11)$$

мұнда:

π_1 – ұзақ мерзімділік коэффициенті;

π_Q – сапа коэффициенті;

π_E – қоршаған орта коэффициенті;

π_V – кернеу коэффициенті;

C_2 – қиындық коэффициенті.

$$\lambda_{\text{MCP}} = 1 \cdot 1(1 \cdot 0,3193 + 0,02 \cdot 8) \cdot 2,29 \quad (10^6 \text{ сағатта істен шығу жиілігі})$$

Орташа сәтсіздік жиілігінің көмегімен сенімділік коэффициентін одан әрі есептеуге болады. Жабдық элементінде $\lambda(t)$ ақаулық жиілігі болған кезде, оның өмір сүру ықтималдығы 0-ден t -ге дейін немесе $R(t)$ сенімділігі, содан кейін интегралдық теңдеу арқылы анықталады. Бұл өрнектің жалпы формасы бар, ол $\lambda(t)$ сәтсіздік жиілігінің өзгеру заңына уақыт өте келе тәуелді емес. Егер сәтсіздік жиілігі λ тұрақты болса, сенімділік үшін өрнек төмендейді:

$$R_{\text{MCP}} = e^{-2,29 \cdot 10^{-6} \cdot 61320} = 0.8689907484.$$

5 кесте - Оқшауланған диодты пайдалану кезінде істен шығу жиілігін есептеу қадамдары

Параметрлер	Мәні	Дереккөз/ пайдаланылған деректер
Сапа коэффициенті π_Q	8	MIL-HDBK-217 сапа коэффициенттерінің кестелерінен, пластик
Негізгі сәтсіздік жылдамдығы λ_b	0,025	Себебі ол өндірісте 5 жылдан астам уақыт болды
Қоршаған орта факторы, π_E	1	Mt түріне арналған MIL-HDBK-217 қоршаған орта факторларының кестелері
Кернеудің үдеу коэффициенті, π_V	0,37	Себебі MC-бұл CMOS құрылғысы және ол кернеуді 12 вольттан аспайды
Құрылыстың күрделілік коэффициенті, π_C	1	Сандық микроэлектроника жағдайында MIL-HDBK-217 күрделілік коэффициенттерінің кестелері, I ескерту
Температура коэффициенті, π_T	0.3193	2 ескерту

Кестеге және әдебиеттерден мәліметтер жинауға сүйене отырып, оқшауланған диод компонентінің орташа істен шығу жылдамдығын есептеуге болады. Сәтсіздік жиілігін есептеу үшін компоненттің құрамдас бөлігіне назар аудару керек. Бұл параметрлерде әмбебап формула компонентке байланысты өзгереді. Бұл диодта біз осы формула бойынша орташа жиілікті аламыз:

$$\lambda = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_V \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E, \quad (12)$$

Мұнда: λ_b - негізгі сәтсіздік жылдамдығы;
 π_1 – ұзақ мерзімділік коэффициенті;
 π_Q – сапа коэффициенті;
 π_E – қоршаған орта коэффициенті;
 π_V – кернеу коэффициенті;
 π_C – конструкцияның күрделілік коэффициенті.

$$\lambda_{\text{ид}} = 1 \cdot 0,3193 \cdot 0,37 \cdot 1 \cdot 8 \cdot 1 = 1,14 \quad (10^6 \text{ сағатта істен шығу жиілігі}).$$

Орташа сәтсіздік жиілігінің көмегімен сенімділік коэффициентін одан әрі есептеуге болады. Жабдық элементінде $\lambda(t)$ ақаулық жиілігі болған кезде, оның өмір сүру ықтималдығы 0-ден t -ге дейін немесе $R(t)$ сенімділігі, содан кейін интегралдық теңдеу арқылы анықталады. Бұл өрнектің жалпы формасы бар, ол $\lambda(t)$ сәтсіздік жиілігінің өзгеру заңына уақыт өте келе тәуелді емес. Егер сәтсіздік жиілігі λ тұрақты болса, сенімділік үшін өрнек бұрын қолданылған формулаға дейін азаяды, бірақ нәтиже екі есе артады, өйткені мұнда 2 диод бар:

$$R_{ид} = e^{-1,14 \cdot 10^{-6} \cdot 61320} = 0.4970582781,$$

$$R_{oid} = 0,98.$$

6 кесте - Батарея ұяшығын пайдалану кезінде істен шығу жиілігін есептеу қадамдары

Параметрлер	Мәні	Дереккөз/ пайдаланылған деректер
Сапа коэффициенті	1	MIL-HDBK-217 сапа коэффициенттерінің кестелерінен
Ұзақ мерзімді, технологияның қаншалықты жетілгеніне байланысты	1	Себебі ол өндірісте 5 жылдан астам уақыт болды
Қоршаған орта факторы	0.5	Mt сыныбына арналған MIL-HDBK-217 қоршаған орта факторларының кестелері
Кернеудің үдеу коэффициенті	1	Mt түріне арналған MIL-HDBK-217 қоршаған орта факторларының кестелері
Қиындық коэффициенті	0.2	Себебі MC-бұл CMOS құрылғысы және ол кернеуді 12 вольттан аспайды
Температураның жоғарылау коэффициенті T	0.3193	Сандық микроэлектроника жағдайында MIL-HDBK-217 күрделілік коэффициенттерінің кестелері, I ескерту

Кестеге және әдебиеттерден мәліметтер жинауға сүйене отырып, батарея компонентінің орташа істен шығу жылдамдығын есептеуге болады. Сәтсіздік жиілігін есептеу үшін компоненттің құрамдас бөлігіне назар аудару керек. Бұл параметрлерде әмбебап формула компонентке байланысты өзгереді. Бұл батареяда біз осы формула бойынша орташа жиілікті аламыз:

$$\lambda = \pi_1 \cdot \pi_Q (\pi_T \cdot \pi_V + C_2 \cdot \pi_E),$$

мұнда:

π_1 – ұзақ мерзімділік коэффициенті;

π_Q – сапа коэффициенті;

π_E – қоршаған орта коэффициенті;

π_V – кернеу коэффициенті;

C_2 – қиындық коэффициенті.

$$\lambda = 1 \cdot 1(1 \cdot 0,3193 + 0,02 \cdot 0,5 \cdot 16) \cdot 1 = 2,29 \quad (10^6 \text{ сағатта істен шығу жиілігі}).$$

Орташа сәтсіздік жиілігінің көмегімен сенімділік коэффициентін одан әрі есептеуге болады. Жабдық элементінде $\lambda(t)$ ақаулық жиілігі болған кезде, оның өмір сүру ықтималдығы 0-ден t -ге дейін немесе $R(t)$ сенімділігі, содан кейін интегралдық теңдеу арқылы анықталады. Бұл өрнектің жалпы формасы бар, ол $\lambda(t)$ сәтсіздік жиілігінің өзгеру заңына уақыт өте келе тәуелді емес. Егер сәтсіздік жиілігі λ тұрақты болса, сенімділік үшін өрнек төмендейді:

$$R_{\text{яб}} = e^{-2,29 \cdot 10^{-6} \cdot 61320} = 0.8689907484.$$

7 кесте - Зарядтау разряд құрылғысын пайдалану кезінде істен шығу жиілігін есептеу кезеңдері

Параметрлер	Мәні	Дереккөз/ пайдаланылған деректер
МС үшін сапа коэффициенті	1	В класындағы скрининг деңгейіне арналған MIL-HDBK-217 сапа коэффициенттерінің кестелерінен (сонымен қатар ATMEL ұсынған),
Ұзақ мерзімді, технологияның қаншалықты жетілгеніне байланысты	1	Себебі ол өндірісте 5 жылдан астам уақыт болды
Қоршаған орта факторы	5	MIL-HDBK-217 қоршаған орта факторларының кестелері
Кернеудің үдеу коэффициенті	1	-
Орау коэффициенті	0.0335	32 түйреуішпен оралған МС
Күрделілік коэффициенті C_2	0.02	Сандық микроэлектроника жағдайында MIL-HDBK-217 күрделілік коэффициенттерінің кестелері, I ескерту ,
Температураның жоғарылау коэффициенті T	0.294	Ғарыштық ортаға арналған MIL-HDBK-217 ақаулық кестесіндегі 2 ескерту

Кестеге және әдебиеттерден мәліметтер жинауға сүйене отырып, батарея ұяшығы компонентінің орташа істен шығу жылдамдығын есептеуге болады. Сәтсіздік жиілігін есептеу үшін компоненттің құрамдас бөлігіне назар аудару керек. Бұл параметрлерде әмбебап формула компонентке байланысты өзгереді. Бұл жағдайда батарея ұяшығы орташа жиілікті келесі формула бойынша аламыз:

$$\lambda = \pi_1 \cdot \pi_Q (C_1 \cdot \pi_T \cdot \pi_V + C_2 \cdot \pi_E), \quad (13)$$

мұнда:

π_1 – ұзақ мерзімділік коэффициенті;

π_Q – сапа коэффициенті;

π_E – қоршаған орта коэффициенті;

C_1 – орау коэффициенті;

C_2 – қиындық коэффициенті.

Жоғарыда келтірілген формуладан біз келесі деректерді ала аламыз:

$$\lambda = 1 \cdot (0,02 \cdot 0,3193 \cdot 1 + 0,03213 \cdot 12 \cdot) \cdot 1 = 2,29 \text{ (} 10^6 \text{ сағатта істен шығу жиілігі).}$$

Орташа сәтсіздік жиілігінің көмегімен сенімділік коэффициентін одан әрі есептеуге болады. Жабдық элементінде $\lambda(t)$ ақаулық жиілігі болған кезде, оның өмір сүру ықтималдығы 0-ден t -ге дейін немесе $R(t)$ сенімділігі, содан кейін интегралдық теңдеу арқылы анықталады. Бұл өрнектің жалпы формасы бар, ол $\lambda(t)$ сәтсіздік жиілігінің өзгеру заңына уақыт өте келе тәуелді емес. Егер сәтсіздік жиілігі λ тұрақты болса, сенімділік үшін өрнек төмендейді:

$$R_{\text{PЗУ}} = e^{-2,29 \cdot 10^{-6} \cdot 61320} = 0.8689907484.$$

8 кесте - Басқару тізбегін пайдалану кезінде істен шығу жиілігін есептеу қадамдары

Параметрлер	Мәні	Дереккөз/ пайдаланылған деректер
Сапа коэффициенті	1	MIL-HDBK-217 сапа коэффициенттерінің кестелерінен 5.10 бөлім
Ұзақ мерзімді, технологияның қаншалықты жетілгеніне байланысты	1	Себебі ол өндірісте 5 жылдан астам уақыт болды
Қоршаған орта факторы	1	Қоршаған орта факторларының кестелері MIL-HDBK-217 5.10 бөлім
Негізгі сәтсіздік жылдамдығы	0.0038	Сандық микроэлектроника жағдайында MIL-HDBK-217 коэффициент кестелері, 6.1.1 бөлім
Күрделілік коэффициенті C_v	0.29	Сандық микроэлектроника жағдайында MIL-HDBK-217 күрделілік коэффициенттерінің кестелері, 6.1 бөлім
Температураның жоғарылау коэффициенті T	6,3	2 ескерту

Кестеге және әдебиеттерден мәліметтер жинауға сүйене отырып, батарея ұяшығы компонентінің орташа істен шығу жылдамдығын есептеуге болады. Сәтсіздік жиілігін есептеу үшін компоненттің құрамдас бөлігіне назар аудару керек. Бұл параметрлерде әмбебап формула компонентке байланысты өзгереді. Бұл жағдайда батарея ұяшығы орташа жиілікті келесі формула бойынша аламыз:

$$\lambda = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_i \cdot \pi_Q \cdot \pi_E, \quad (14)$$

- мұнда: λ_b - негізгі сәтсіздік жылдамдығы;
 π_T – ұзақ мерзімділік коэффициенті;
 π_Q – сапа коэффициенті;
 π_E – қоршаған орта коэффициенті;
 π_v – кернеу коэффициенті;
 π_C – конструкцияның күрделілік коэффициенті.

$$\lambda = 1 \cdot (0,29 \cdot 0,0038 \cdot 1 \cdot 6,3 \cdot 1) \cdot 1 = 2,29 \text{ (} 10^6 \text{ сағатта істен шығу жиілігі).}$$

Орташа сәтсіздік жиілігінің көмегімен сенімділік коэффициентін одан әрі есептеуге болады. Жабдық элементінде $\lambda(t)$ ақаулық жиілігі болған кезде, оның өмір сүру ықтималдығы 0-ден t -ге дейін немесе $R(t)$ сенімділігі, содан кейін интегралдық теңдеу арқылы анықталады. Бұл өрнектің жалпы формасы бар, ол $\lambda(t)$ сәтсіздік жиілігінің өзгеру заңына уақыт өте келе тәуелді емес. Егер сәтсіздік жиілігі λ тұрақты болса, сенімділік үшін өрнек төмендейді:

$$R_{\text{ушц}} = e^{-2,29 \cdot 10^{-6} \cdot 61320} = 0.8689907484.$$

9 кесте - Ғарыш аппаратын энергиямен жабдықтау жүйесінің барлық компоненттерін есептеу нәтижелері

Блок	Сенімділік коэффициенті (сенімділік жиілігі)
Қуат жүйесі	0,9900
Оқшаулауға арналған Диод (разряд уақыты)	0,9950
Оқшаулауға арналған Диод (қысқа тұйықталу уақыты)	0,9800
Айналымалы реттегіш (қысқа тұйықталу уақыты)	0,9950
Батарея ұяшығы (зарядсыздану уақыты)	0,9800
Ұяшық (қысқа тұйықталу уақыты)	0,9950
Жабық тарату құрылғысы	0,9700
Сандық микрометр	0,8884
Орнату тұтастығы	0,9700

Барлық ішкі жүйелер бойынша сенімділікті есептеу нәтижелері.

Күн панелінің бірлігінің сенімділігі 98% пайызды құрайды, өйткені оның элементтері 0,001-ден 0,005-ке дейінгі орташа сәтсіздікке ие.

$$R_{ECI} = 0.99 \cdot 0.955 [1 - (1 - 0.995) \cdot 0.98] = 0.98.$$

8 панельден тұратын күн панелінде панельдің барлық бірліктерінің қосындысы бар бұл осындай формулаға әкеледі:

$$R_c = \sum_{i=7}^8 \frac{8!}{i!(8-i)!} R_{ECI}^i (1 - R_{ECI})^{8-i}.$$

Келесі - батареяның негізгі ұяшығынан келесі Ішкі жүйе, жоғарыдағы ұяшықтың сенімділігін есептеу үшін әдебиеттер пайдаланылды және оның элементтерінің істен шығу жиілігі есептелді:

$$R = 0.995 \cdot 1(1 - 0.98 \cdot 1 - 0.97) = 0.9944.$$

Батарея ұяшығының бірліктерінің көмегімен 22 батареядан тұратын ішкі жүйенің қосындысын табуға болады:

$$R_{AB} = \sum_{j=22} \frac{22!}{j!(22-j)!} \cdot R_C^j (1-R_9)^{22-j}.$$

Қуатты басқару мен басқарудың соңғы ішкі жүйесі микроконтроллер модулінен және басқару модулінен тұрады. Біріншісінде 2 компонент сенімділік есептелетін тізбектер:

$$R = 0.8884(1 - \ln(0.8884)) = 0.9935.$$

Басқару (басқару) модулінде 3 бөлік бар, оның 1-і резервтік. Сенімділікті есептеу үшін барлық бөліктер де қосылады. Нәтижесінде шығады:

$$R_{KM} = \sum_{k=2}^3 \frac{3!}{k!(3-k)!} \cdot R_{KL} (1-R_{KL})^{3-k}.$$

Ішкі жүйенің екі компонентін көбейту арқылы қуатты басқару және басқару, біз осы ішкі жүйенің сенімділік коэффициентін аламыз:

$$R_y = 0.9935 \cdot 0.997354 = 0.9909.$$

Энергиямен жабдықтау жүйесінің сенімділігін талдау мен есептеудің ең соңғы кезеңі - бұрын есептелген күн панелінің, аккумулятордың ішкі жүйелерінің қосындысы және қуатты басқару және басқару:

$$R_{CЭЭ} = 0.989883 \cdot 0.99328 \cdot 0.9909 = 0.974386.$$

Қорытынды.

Қорытындылай келе, күн энергиясымен жабдықтау жүйесінің сенімділігін модельдеу және болжау қазіргі заманғы энергетика индустриясында шешуші рөл атқаратынын атап өтуге болады. Бұл процестер күн энергиясын тиімді пайдалануды қамтамасыз етіп қана қоймайды, сонымен қатар жалпы күн энергетикалық жүйелерінің тұрақтылығы мен сенімділігіне ықпал етеді.

Біздің мақалада 125545374,74 Вт/сағ ұшу кезінде өндірілген жалпы энергиямен жабдықтау сипаттамаларын есептеу жүргізілді. 45552495,00 Вт/сағ бүкіл қызмет ету мерзімінде тұтынылатын жалпы энергия. Өндірілген энергияны пайдалану пайызы: 36,28 %. Тәулігіне 702,44 Вт артық немесе жетіспейтін қуат. 3333057,28 Вт қызмет ету мерзімі ішінде энергияның артық немесе тапшылығы. Алынған деректерді спутниктің өмірлік циклін одан әрі талдау үшін пайдалануға болады.

ӘДЕБИЕТТЕР

[1] Мелентьев Л.А. Избранные труды. Методология системных исследований в энергетике. / Сост. Г.М. Беляева, Л.С. Попырин. - М.: Наука, Физматлит, 1995. – С. 302.

[2] Надежность систем энергетики (сборник рекомендуемых терминов) /Отв. редактор чл.-корр. РАН Н.И. Воропай. - М.: ИАЦ «Энергия», 2007. – С.192.

[3] Надежность систем энергетики и их оборудования. Справочник: в 4-х т. / Под общей ред. Ю.Н. Руденко. Т.2. Надежность электроэнергетических систем / Под ред. М.Н. Розанова. - М.: Энергоатомиздат, 2000. – С. 568.

- [4] Gopalaswami Parthasarathy. *Spacecraft Power Technologies*. CRC Press, 2018.
- [5] Miguel R. Aguirre. *Introduction to Space Systems: Design and Synthesis*. CRC Press, 2018.
- [6] Ennio P. Mignani. *Electric Propulsion for Spacecraft Operations*. Springer, 2018.
- [7] Benson, S., Arrington, L., Hoskins, W., & Meckel, N. (1999). Development of a PPT for the EO-1 spacecraft. 35th Joint Propulsion Conference and Exhibit. doi:10.2514/6.1999-2276
- [8] Barnett, D. M., Rawal, S., & Rummel, K. (2001). Multifunctional Structures for Advanced Spacecraft. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 38(2), 226–230. doi:10.2514/2.3674

REFERENCES*

- [1] Melent'ev L.A. Izbrannye trudy. Metodologija sistemnyh issledovanij v jenergetike. / Sost. G.M. Beljaeva, L.S. Popyrin. - M.: Nauka, Fizmatlit, 1995. – S. 302. [2] Nadezhnost' sistem jenergetiki (sbornik rekomenduemyh terminov) /Otv. redaktor chl.-korr. RAN N.I. Voropaj. - M.: IAC «Jenergija», 2007. – S.192.
- [3] Nadezhnost' sistem jenergetiki i ih oborudovaniya. Spravochnik: v 4-h t. / Pod obshej red. Ju.N. Rudenko. T.2. Nadezhnost' jelektrojenergeticheskikh sistem / Pod red. M.N. Rozanova. - M.: Jenergoatomizdat, 2000. – S. 568.
- [4] Gopalaswami Parthasarathy. *Spacecraft Power Technologies*. CRC Press, 2018.
- [5] Miguel R. Aguirre. *Introduction to Space Systems: Design and Synthesis*. CRC Press, 2018.
- [6] Ennio P. Mignani. *Electric Propulsion for Spacecraft Operations*. Springer, 2018.
- [7] Benson, S., Arrington, L., Hoskins, W., & Meckel, N. (1999). Development of a PPT for the EO-1 spacecraft. 35th Joint Propulsion Conference and Exhibit. doi:10.2514/6.1999-2276
- [8] Barnett, D. M., Rawal, S., & Rummel, K. (2001). Multifunctional Structures for Advanced Spacecraft. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 38(2), 226–230. doi:10.2514/2.3674

Dinara Kalmanova, candidate of pedagogical sciences, acting associate professor, Eurasian National University after L. N. Gumilyov, Astana, Kazakhstan, dinara_kalmanova@mail.ru

Assyl-Dastan Bazarbek, PhD, acting associate professor, Eurasian National University after L. N. Gumilyov, Astana, Kazakhstan, asyl.bazarbek.92@mail.ru

Omirzak Abdirashev, PhD, acting associate professor, Eurasian National University after L. N. Gumilyov, Astana, Kazakhstan, omeke_92@mail.ru

MODELING AND FORECASTING THE RELIABILITY OF THE ENERGY SUPPLY SYSTEM

Abstract. The study of the reliability of the energy supply system of spacecraft is an important direction in modern Astronautics. This branch of Science and engineering is dedicated to the development and application of mathematical models, analysis methods and innovative technologies to ensure the reliability and durability of energy systems necessary to maintain the viability of space missions.

The critical dependence of space missions on energy requires the development of high-precision methods and technologies to ensure continuous energy nutrition in the extreme conditions of the space environment.

Modeling and forecasting the reliability of spacecraft energy supply systems plays an important role in research and development in order to ensure the smooth operation of space missions and increase their duration.

Our article carried out the calculation of the characteristics of the energy supply produced during the flight and the total energy consumed over the entire service life. The percentage of energy use produced, excess or shortage of power per day, etc. were also calculated.

Keywords. Energy, battery, solar panel, equipment, failure rate.

Динара Калманова, к.п.н., и.о. доцента, Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Астана, Казахстан, dinara_kalmanova@mail.ru

Асыл-Дастан Базарбек, PhD, и.о. доцента, Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Астана, Казахстан, asyl.bazarbek.92@mail.ru

Омирзак Абдирашев, PhD, и.о. доцента, Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Астана, Казахстан, omeke_92@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Аннотация. Исследование надежности системы энергоснабжения космического аппарата представляет собой критически важное направление в современной космонавтике. Эта область науки и инженерии посвящена разработке и применению математических моделей, методов анализа и инновационных технологий для обеспечения надежности и долговечности энергетических систем, необходимых для поддержания жизнеспособности космических миссий.

Критическая зависимость космических миссий от энергии требует разработки высокоточных методов и технологий для обеспечения бесперебойного энергетического питания в экстремальных условиях космической среды.

Моделирование и прогнозирование надежности системы энергоснабжения космического аппарата играют важную роль в исследованиях и разработках с целью обеспечения непрерывного функционирования космических миссий и увеличения их длительности.

В нашей статье был проведен расчёт характеристик энергоснабжения, выработанная за время полета и общая потребляемая энергия за весь срок службы. Так же были рассчитаны процент использования произведенной энергии, избыток или дефицит мощности в день и т.д.

Ключевые слова. Энергия, аккумуляторная батарея, солнечная панель, оборудование, частота отказов.
