

УДК 629.78:004.032.26, 629.7.05

Ю.Б. Прібилев¹, А.О. Подорожняк², І. В. Новікова¹¹Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ²Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ БОРТОВИХ КОМПЛЕКСІВ УПРАВЛІННЯ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

У статті визначено місце бортових комплексів управління у структурі управління космічних апаратів, викладено підхід до побудови бортових комплексів управління космічних апаратів. Описано основні компоненти бортових комплексів управління космічних апаратів і розв'язувані ними завдання. Наведено структуру програмного забезпечення – головної інтеграційної ланки бортових комплексів управління космічних апаратів та запропоновано застосування нейромережесих технологій.

Ключові слова: космічні апарати, бортові комплекси управління, програмне забезпечення, нейромережесих технології.

Вступ

Космічна техніка безперервно розвивається, та як наслідок, ускладнюється управління космічними апаратами (КА). Управління КА являє собою комплекс взаємопов'язаних дій, спрямованих на досягнення цілей польоту з максимальною повнотою та надійністю [1, 2].

Досвід експлуатації автоматичних космічних апаратів свідчить про те, що ефективно управління їх польотом найкращим чином забезпечується системою управління КА (рис. 1) з декількох основних

ланок, кожна з яких здатна виконувати певні функції. До таких ланок відносять:

– наземний комплекс управління (або центр управління польотом), засоби моделювання польоту і забезпечення обміну інформацією між наземним комплексом і КА;

– бортовий комплекс управління (БКУ), що включає в себе «інтелектуальну» частину у вигляді бортової обчислювальної системи (БОС), виконавчу – у вигляді приладів, що перетворюють вихідні сигнали БОС в управляючі дії, і сенсорну частину у вигляді датчиків визначення руху.

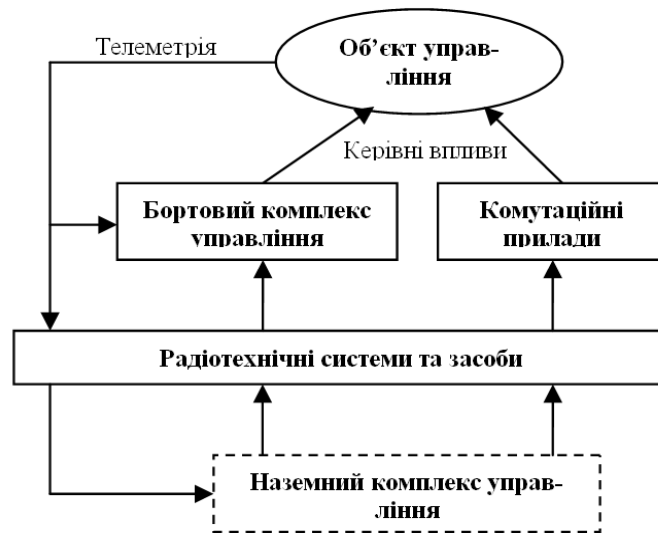


Рис. 1. Загальна схема системи управління КА

Система управління польотом космічного апарату в сукупності з його бортовими комплексами, агрегатами, механізмами і елементами конструкції, які є об'єктами управління, утворюють контур управління.

В ході виконання програми космічного польоту у системі управління КА реалізується ряд процесів, що вирішують завдання формування інформації, яка необхідна для управління. Зазначені процеси харак-

теризуються такими видами інформаційного забезпечення [3, 4]:

- балістико-навігаційне забезпечення;
- командно-програмне забезпечення;
- інформаційно-телеметричне забезпечення;
- контрольно-діагностичне забезпечення;
- методичне забезпечення нештатних операцій;
- інформаційне забезпечення виконання цільової програми роботи КА.

Метою роботи є викладення підходу до побудови бортових комплексів управління космічних апаратів та структури програмного забезпечення, як головної інтеграційної ланки БКУ КА.

Виклад основного матеріалу

Більшість існуючих зараз КА – автоматичні безпілотні КА, що застосовуються в тих випадках, коли виконання цільових завдань можливо здійснити без участі людини. Незважаючи на різне цільове призначення цих КА, кожен з них має окремі загальні системи, призначені для вирішення конкретного типу завдань. Серед цих завдань такі [4]:

- управління рухом КА (визначення і підтримка орієнтації КА у просторі, забезпечення руху КА у просторі (переміщення його центру мас та навколо центру мас);
- визначення (прогнозування) місця розташування КА на орбіті;
- забезпечення обміну інформацією з наземним комплексом управління (НКУ);
- збір, зберігання, обробка і передача телеметричної інформації;
- забезпечення постачання КА електроенергією;
- розподіл ресурсів електроживлення на КА між споживачами;
- управління сонячними батареями;
- підтримка необхідного теплового режиму на КА;
- управління роботою систем і устаткування КА відповідно до програми польоту КА і з урахуванням його реального стану;
- контроль за станом КА, виявлення та ідентифікація нештатних ситуацій в процесі контролю за станом КА [5, 6].

На перших КА кожне завдання вирішувалося автономною роботою окремої системи, що містить свою вимірвальну апаратуру, виконавчі органи, автоматику управління. З ускладненням КА і збільшенням числа вирішуваних ними завдань з'явилася потреба в централізації управління і контролю за роботою бортових систем КА, насамперед, у частині раціонального витрачання та поповнення енергоресурсів, пріоритетності і часу виконання польотних і регламентних операцій, автономного реагування на нештатні ситуації на основі результатів діагностики і тестування бортової апаратури та ін. Розроблення та впровадження на КА обчислювальних засобів з розвиненим програмним забезпеченням (ПЗ) дозволили задовольнити цю потребу. За аналогією з НКУ з'явилося поняття бортового комплексу управління (БКУ). БКУ є найважливішою складовою КА. На БКУ покладаються функції управління орієнтацією і стабілізацією КА, управління цільовим обладнанням, енергоживленням, зв'язком з наземними ком-

плексами. Крім цього, БКУ повинен здійснювати оперативний аналіз відхилень стану бортових систем КА від норми, виробляти рішення про компенсацію цих відхилень з метою збереження працездатного стану КА.

Бортовий комплекс управління об'єднує в собі основні бортові системи КА і включає в себе БОС, систему управління рухом і навігацією (СУРН), систему управління бортовою апаратурою (СУБА), бортову апаратуру службового каналу управління (БА СКУ), систему бортових вимірювань (СБВ), а також програмне забезпечення БКУ.

Для більш детального розгляду принципів побудови БКУ КА з різною цільовою спрямованістю (спутники зв'язку, КА спостереження ділянок зоряного простору, космічні апарати зондування Землі) перерахуємо їх основні системи (рис. 2):

- бортова обчислювальна система у вигляді сукупності обчислювальних засобів і пристроїв сполучення (адаптерів зв'язку), що забезпечує інформаційну взаємодію з бортовими абонентами і надає свої обчислювальні ресурси для вирішення завдань управління системами КА і завдань контролю за їх роботою;



Рис. 2. Бортові системи космічного апарата

– система управління рухом та навігації або система орієнтації та управління рухом, що призначена для управління рухом КА як матеріальної точки (переміщенням центру мас), так і для управління кутовим рухом КА (рухом навколо центру мас). Навігаційна система призначена для визначення місцеположення КА та прогнозування руху його центру мас. Система управління рухом включає в себе чутливі елементи, перетворюючі пристрої, блоки формування керуючих сигналів і виконавчі органи, що виробляють управляючі дії;

– система управління бортовою апаратурою, що виконує функції комутації електроживлення, посилення і перетворення електричних сигналів, а також видачі команд управління в системи і прилади КА відповідно до тимчасових або логічних умов;

– система бортових вимірювань (телеметрична система), що призначена для підготовки та передачі на Землю інформації про результати вимірювань, що характеризують стан систем КА і різних технічних пристроїв. До складу бортової телеметричної системи входять датчики, формувачі сигналів, пристрої обробки даних, шифратор і передавач, що призначені для збору, обробки і передачі в НКУ телеметричної інформації;

– бортова апаратура службового каналу управління або командної радіолінії, що являє собою радіотехнічний комплекс для забезпечення своєчасного обміну службовою інформацією між НКУ та БКУ;

– комплект двигунів для забезпечення переміщення КА щодо орбіти і кутового руху КА (об'єднана система двигунів (ОСД));

– система забезпечення певного теплового режиму всередині КА;

– система енергопостачання (СЕП) КА призначена для постачання систем апарату електроенергією. Вона складається з джерела первинної енергії, перетворювача первинної енергії в електричну та автоматичного пристрою, що формує режими роботи системи енергопостачання залежно від умов роботи систем КА;

– система терморегулювання (СТР), що здійснює підтримку усередині КА заданого теплового режиму. До складу системи входять чутливі елементи, що вимірюють температуру в контрольованих точках КА, блоки формування керуючих сигналів на підтримку номінального теплового режиму та виконавчі органи, які впливають безпосередньо на теплові процеси.

Завдання управління сонячними батареями в деяких типах КА вирішуються спеціальною системою орієнтації сонячних батарей. В інших КА ці завдання вирішуються в СУРН.

У деяких класах КА як окрема структурна одиниця розглядається бортова кабельна мережа.

Впровадження на КА обчислювальних засобів і нових конструктивно-технологічних рішень, застосування сучасної елементної бази і засобів комплексування ПЗ дозволили створити основу для побудови інтегрованих БКУ. Можливість оперативного контролю за станом систем КА і “розумного” виконання програми польоту КА з урахуванням зовнішньої обстановки, поточного статусу бортових систем і наявних на поточний момент часу ресурсів дозволила перенести різноманітні функції контролю і

управління КА у БОС, точніше – у її ПЗ. Тенденція концентрації цих функцій у бортовій обчислювальній системі (ПЗ БКУ) продовжує посилюватися у міру розвитку програмних і апаратних засобів.

Ефективність і якість функціонування БКУ КА визначаються відповідними характеристиками програмного та інформаційного забезпечення, що призначене для автоматизації всього комплексу задач обробки даних і управління. Програмне забезпечення сформувалося як окремий (та найголовніший) компонент БКУ (рис. 3).

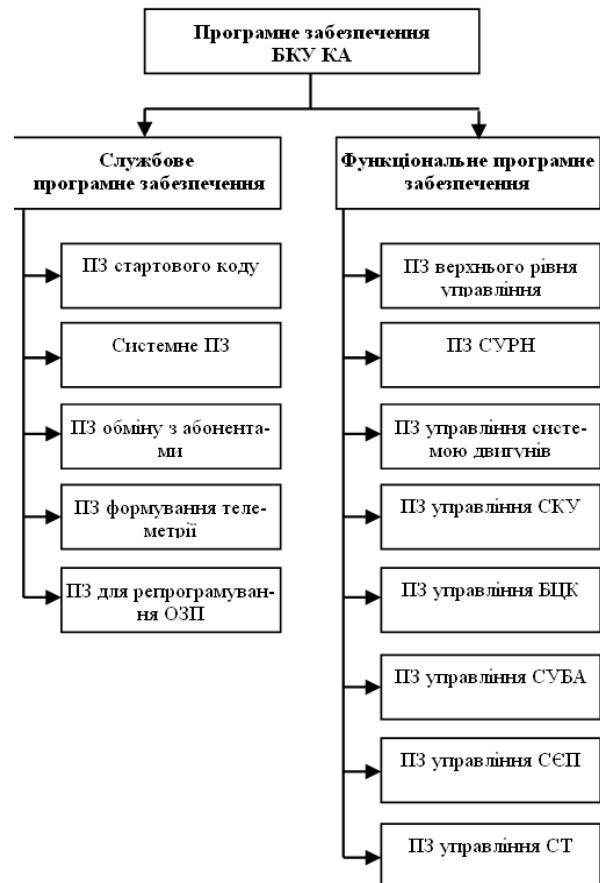


Рис. 3. Програмне забезпечення БКУ КА

Програмне забезпечення БКУ побудовано за ієрархічним принципом:

– перший або нижній рівень складають драйвери обміну з апаратурою та програми організації обчислювального процесу;

– другий рівень складають програми забезпечення управління та контроль за роботою бортових приладів і обладнання;

– програми третього рівня включають в себе програми забезпечення польотних режимів бортових систем та розрахункові програми;

– четвертий чи верхній рівень складають програми планування та організації режимів роботи всього БКУ та контроль за станом систем КА.

Архітектура ПЗ БКУ поділяє всі програми на службові (диспетчер, обмін, управління конфігура-

цією БОС, таймування тощо) і функціональні (програми включення/виключення конкретних приладів, програми розрахунку різної підготовчої та супровідної інформації, програми формування керуючих впливів на окремі прилади тощо). Кожна програма (програмний модуль) має свої параметри настройки та логіко-інформаційні зв'язки з іншими програмами. Побудова ПЗ БКУ передбачає детермінований обмін інформацією між програмами усіх рівнів, причому керуюча інформація надходить зверху вниз (від програм верхніх рівнів до програм нижніх рівнів), а контролюючо-діагностична інформація – знизу вгору.

Для забезпечення функціонування ПЗ БКУ в реальному масштабі часу кожній програмі визначаються послідовність і конкретний час підключення на обчислювальному такті бортового комп'ютера, а також її обчислювальні ресурси.

Інтеграційний характер ПЗ БКУ дозволяє виконувати, крім функцій контролю та управління, інші важливі функції і завдання, як наприклад:

- завдання повиткового планування польоту КА;
- завдання оптимізації витрат бортових ресурсів;
- функції забезпечення автономності існування КА;
- функції оперативного реагування на нештатні ситуації.

Бортова обчислювальна система та ПЗ БКУ займають важливе місце в бортовому комплексі управління та враховує особливості отримання цифрової інформації від бортових систем (безпосередньо або через СБВ), обміну інформацією з НКУ (через БА СКУ), обробку та використання отриманої інформації в розрахунково-обчислювальних завданнях, реалізованих в ПЗ. Системи БА СКУ та СБВ в такій конфігурації є невід'ємною частиною БКУ як джерела циркулюючої на КА інформації. Зауважимо, що зв'язки між БОС, БА СКУ та СБВ можуть бути як фізичні (дротяні, через бортову кабельну мережу і пристрої сполучення), так і “віртуальні” (інформаційні, через канали інформаційного обміну).

Для забезпечення виконання поставлених перед КА завдань в кожну з розглянутих систем КА в певний час повинні надходити відповідні команди. Крім команд управління просторовим рухом КА, на борту має бути своєчасно вироблено велика кількість команд, що призначені для управління функціонуванням бортових систем. Вироблення і комутація команд управління функціонуванням покладається на систему управління бортовою апаратурою (СУБА), що є невід'ємною і основною частиною БКУ. СУБА контролює поточний час і виробляє команди відповідно до програми польоту. Часова

діаграма вироблення команд не є постійною і жорсткою. При зміні умов польоту окремі команди або їх набори змінюються.

Змінені набори команд формуються на борту або передаються з Землі.

Серед інших є дві важливі функції СУБА, що носять інтеграційний характер і є прерогативою БКУ:

- забезпечення всіх бортових споживачів електроживленням та забезпечення фізичного (проводового) інтерфейсу з системами та обладнанням КА;
- керування ними шляхом формування відповідних команд і сигналів.

Всі інші з вищеперерахованих систем вирішують свої конкретні завдання, життєво важливі для КА, але не є інтеграційними з точки зору структурної побудови БКУ. З цих систем особливо виділимо СУРН, яка часто є складовою БКУ завдяки таким аспектам:

- дана система (як і СУБА) – одна з перших бортових систем, вона проектувалася і розроблялася вже для перших КА;
- завдання СУРН (орієнтація, стабілізація, наведення КА для вирішення цільових завдань тощо) – найважливіші та першочергові;
- програми керування СУРН тісно “прив'язані” до програм управління інших систем і програмами “верхнього” рівня ПЗ БКУ та ін. До складу СУРН включені чутливі елементи у вигляді оптико-спектральних датчиків і датчиків кутових швидкостей, перетворюючі пристрої і блоки формування керуючих сигналів, а також виконавчі органи у вигляді силових гіроприладів (наприклад, маховиків або гіродинів). Виконавчими органами СУРН є також двигуни КА. Склад апаратури СУРН може доповнюватися навігаційними приладами та апаратурою супутникової навігації [7, 8].

Основою побудови СУРН є інерціальна навігаційна система, що є коригуючою та дозволяє в реальному масштабі часу визначити поточне положення пов'язаних осей КА щодо інерціальної системи координат шляхом інтегрування складових абсолютної кутової швидкості.

Функціонування СУРН забезпечується роботою трьох контурів управління:

- кінематичний контур управління орієнтацією дозволяє визначити кутову неузгодженість приладового базису СУРН з якимсь опорним базисом, що задається режимом орієнтації; крім того, кінематичний контур уточнює (коригує) даний опорний базис;
- динамічний контур управління орієнтацією дозволяє поєднувати із заданою точністю пов'язаний базис КА з опорним базисом; крім того, динамічний контур забезпечує стабілізацію КА в процесі корекції орбіти і інших динамічних операцій;

– навігаційний контур дозволяє визначати (прогнозувати) у реальному масштабі часу з заданою точністю місце розташування КА на орбіті за початковими умовами, що визначаються в НКУ або в бортовій навігаційній апаратурі, з використанням розрахункових гравітаційних і магнітних моделей Землі й інформації від бортових навігаційних датчиків КА.

До службових систем КА розглянутого класу висуваються подібні за своїм складом вимоги, обумовлені корисним навантаженням або бортовим цільовим комплексом (БЦК) до службових систем цих апаратів.

У головних підприємствах космічної галузі існує тенденція розроблення універсальних космічних платформ (УКП), єдиних для різних типів КА. Інтеграція готової УКП з новим БЦК шляхом наступності систем та приладів УКП та мінімізації етапів проектування та наземної обробки дозволяє істотно скоротити терміни створення нових КА, і фінансові витрати при збереженні показників якості та надійності.

Ступінь наступності існуючої космічної платформи до застосування на КА з новою цільовою апаратурою визначається, виходячи з характеристик цієї апаратури і складу вимог до УКП, що її обумовлюють.

Основні характеристики БЦК:

- енергоспоживання,
- маса,
- кількість фідерів живлення,
- тип інтерфейсів та ін.

До завдань, що визначаються умовами роботи БЦК, включаються:

- забезпечення точності орієнтації та стабілізації КА при роботі БЦК;
- забезпечення точності наведення та її оцінка;
- забезпечення заданих параметрів робочої орбіти і тривалості експлуатації КА;
- виконання заданих режимів роботи БЦК та ін.

Наслідком аналізу вимог і характеристик БЦК є підтвердження придатності УКП до інтеграції з даними БЦК у складі КА, що проектується, або визначення переліку необхідних доробок та дооснащення УКП.

Вибір остаточної модифікації УКП стосовно до нового БЦК визначається як рішення багатопараметричного функціоналу:

$$\Phi(M_i, N_{ij}, U_i, T_i, S_i, \dots, K_{ij}, P_{ij}) = 0,$$

де M_i – маси окремих приладів і систем;

N_{ij} – число однотипних приладів j -го класу в i -й системі;

U_i – енергоспоживання окремих приладів і систем;

K_{ij} – число інтерфейсів (командних сигналів) j -го типу в i -й системі;

P_{ij} – ймовірність безвідмовної роботи приладу j -го типу в i -й системі;

T_i – тривалість виготовлення та випробувань окремих компонентів;

S_i – вартість витрат на створення окремих компонентів.

У такій схемі БКУ розглядається як ядро УКП. Іншими словами, БКУ є сукупністю основних службових систем і бортового ПЗ, що забезпечує інтеграцію систем УКП при реалізації функціональних завдань КА на програмно-логічному і фізичному рівнях через відповідні інтерфейси.

Основні завдання цього типу БКУ:

– координоване управління функціонуванням УКП і КА в цілому при наземному відпрацюванні КА і штатному виконанні програми польоту в автоматичному режимі і за інформацією від ПКУ;

– діагностика стану УКП і її систем, виявлення, локалізація і парировання розрахункових нештатних ситуацій в автоматичному режимі;

– збирання, первинна обробка, зберігання та отримання телеметричної інформації, інформації оперативного контролю, а також її використання в завданнях управління УКП;

– організація інформаційно-командної взаємодії з БЦК.

Рішення бортовим комплексом управління перерахованих завдань супроводжується підтвердженням якісних характеристик, таких як:

– високий рівень комплексування, тобто організація комбінованої роботи систем УКП і підтримка інтерфейсів при реалізації всіх польотних режимів та операцій у реальному масштабі часу;

– суворі ієрархічність багаторівневої структури побудови БКУ і детермінованість руху потоків інформації (командно-керуючої інформації зверху вниз від “ядра” БКУ до кожного елементу і контрольно-діагностичної інформації знизу вгору від периферійних елементів до “ядра”);

– розвинена “гнучкість” управління, що реалізована в алгоритмах управління ПЗ БКУ і забезпечує на базі цілевказань від ПКУ та обробленої діагностичної інформації від датчикової апаратури ефективну витрату ресурсів і залучення резервів, а також адаптивність до відмов і коригування нештатних ситуацій.

Зважаючи на вищевикладене, можливо передбачити такі напрямки розвитку і вдосконалення БКУ:

– доробка (заміна на нові розробки) окремих приладів і виконавчих органів БКУ, що дозволяють поліпшити точнісні, динамічні, масово-інерційні характеристики з умови вимог з боку цільової апаратури;

– підвищення надійності і збільшення гарантованого терміну функціонування окремих приладів (шляхом застосування сучасних електрорадіовиробів) і БКУ в цілому (завдяки впровадженню функціонального резервування на апаратному та програмному рівнях);

– при збереженні цільових функцій і показників БКУ зниження його загальної маси і економія інтерфейсних ресурсів в інтересах корисного навантаження завдяки уніфікації різнотипних інтерфейсів, застосування більш легких електрорадіовиробів, оптимізації розміщення бортової кабельної мережі, переходу в окремих позиціях структури БКУ на дублювання замість трійного резервування апаратних засобів;

– підвищення метрологічної надійності системи бортових вимірювань.

Кожен напрям передбачає виконання комплексу робіт і заходів і вимагає окремого розгляду. Одним із шляхів вирішення сформульованих напрямки розвитку і вдосконалення БКУ є впровадження нейромережових технологій під час проектування елементів БКУ та його ПЗ [6–8], застосування нових нейророботоподібних обчислювальних засобів у бортовій апаратурі КА [9].

Висновки

Таким чином, в ході проведеного аналізу основних бортових систем КА визначено місце БКУ як найважливішої складової КА.

Розглянуті принципи побудови БКУ автоматичних КА та завдання їх основних систем дозволили визначити перспективу перенесення функцій контролю і управління на борт КА.

Сформульовані напрямки розвитку і вдосконалення БКУ та запропоновано застосування нейромережових технологій під час їх впровадження.

Список літератури

1. Микрин Е.А. Бортовые комплексы управления космическими аппаратами и проектирование их программ-

ного обеспечения. / Е.А. Микрин. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 336 с.

2. Соловьев В.А. Управление космическими полетами. Ч. 2 / В.А. Соловьев, Л.Н. Лысенко, В.Е. Любинский; под общ. ред. Л.Н. Лысенко. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 426 с.

3. Организация баллистико-навигационного обеспечения управления космическими аппаратами / О.Б. Захаров, В.О. Гуменюк, Р.М. Залужный та ін.; под заг. ред. М.С. Сивова. – К.: НАОУ. – 2007. – 512 с.

4. Бортовые системы управления космическими аппаратами / А.Г. Бровкин, Б.Г. Бурдыгов, С.В. Гордийко и др.; под ред. А.С. Сырова. – М.: МАИ-ПРИНТ, 2010. – 304 с.

5. Красовский П.А. Метрология космических навигационных спутниковых систем: моногр. / П.А. Красовский. – Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2009. – 216 с.

6. Назаров А.В. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем / А.В. Назаров, А.И. Лоскутов. – СПб.: Наука и техника, 2003. – 386 с.

7. Подорожняк А.А. Интегрированная инерциально-спутниковая технология навигационных определений летательных аппаратов / А.А. Подорожняк, В.Г. Макаренко, С.В. Рудаков // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. Сборник научных работ НАКУ «ХАИ». – Х.: НАКУ «ХАИ». – Вып. 31. – 2006. – С. 187-195.

8. Подорожняк А.А. Метод оптимизации вектора измерений инерциально-спутниковой системы управления на основе радиально-базисных искусственных нейронных сетей / А.А. Подорожняк, М.В. Федоров, С.В. Рудаков // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2009. – № 5. – С. 67-74.

9. Новейшая элементная база ЗАО НТЦ "Модуль" для цифровой обработки сигналов и систем управления / В.М. Черников, А.П. Панфилов, П.А. Шевченко, Н.Ю. Миронов, Д.В. Фомин // IX отраслевая научно-техническая конференция "Технологическая модернизация - основа повышения конкурентоспособности радиоэлектронной промышленности", Томск, 2010. [Электрон. ресурс] Режим доступа: http://www.module.ru/upload/images/1354524813tomsk_2010_fomine.pdf.

Надійшла до редколегії 24.01.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ БОРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Ю.Б. Прибылев, А.А. Подорожняк, И.В. Новикова.

В статье определено место бортовых комплексов управления в структуре управления КА. Изложен подход к построению бортовых комплексов управления космических аппаратов. Описаны основные компоненты БКУ и решаемые ими задачи. Приведена структура программного обеспечения - главного интеграционного звена БКУ. Сформулированы направления развития и совершенствования БКУ с использованием нейросетевых технологий.

Ключевые слова: космические аппараты, бортовые комплексы управления, программное обеспечение, нейросетевые технологии.

DIRECTIONS OF BOARD CONTROL SPACECRAFT

Y.B. Pribylev, A.O. Podorozhniak, I.V. Novikova.

The article defines the place of on-board complex of control in the management structure of spacecraft. An approach to the construction of on-board control of spacecraft. The basic components of the BCC and their tasks are describe. Shows the structure of the software - the main link BCC integration. Formulated directions of development and improvement of the BCC using neural network technologies.

Keywords: spacecraft, on-board control complex, software, neuronet technologies.