

УДК 681.5.09: 629.7.05

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ СТАБИЛИЗАЦИИ И ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

© С. Н. Фирсов

Представлены инструментальные средства диагностирования и восстановления работоспособности систем стабилизации и ориентации. Описан программный комплекс отладки модулей обеспечения функциональной устойчивости и их алгоритмического обеспечения. Представлен один из возможных вариантов решения научно-прикладной задачи обеспечения функциональной устойчивости систем стабилизации и ориентации летательных аппаратов. Определены критерии, выполнение которых обеспечивает функциональную устойчивость.

Ключевые слова: отказ, восстановление, датчик угловых скоростей, двигатели маховики, система стабилизации и ориентации, функциональная устойчивость.

The tools for diagnosis and restoring the functionality of the orientation and stabilization systems are presented. The software system for debugging modules providing functional stability and algorithmic support is described. One of the possible solutions to scientific and applied task of providing the functional stability of stabilization systems and aircraft orientation. The criteria, the fulfillment of which provides a functional sustainability.

Keywords: failure, stability restoration, angular velocity sensor, flywheels engines, stabilization and orientation satellite system, functional stability, measuring unit.

1. Введение

Актуальными проблемами космической отрасли являются создание и поддержание в штатном составе спутниковых систем различного применения в условиях снижения уровня финансирования космических программ, значительного удорожания средств запуска, сокращения объемов производства ракет-носителей и космических аппаратов (КА). Для снижения стоимости разработки и эксплуатации космических объектов значительная часть исследований направлена на увеличение срока активного существования КА, а также уменьшение их массы и габаритов [1–3], что определяет актуальность использования малых космических аппаратов (МКА) для решения таких целевых задач как картографирование, радиотехническая разведка, исследование ресурсов Земли, экологический и метеорологический контроль, мониторинг чрезвычайных ситуаций и т.д., которые ранее решались большими космическими платформами и аппаратами. Кроме того, МКА представляют собой относительно недорогое средство для проведения контрольных и оценочных испытаний инновационных систем КА в условиях реального космического полета при приемлемом уровне риска и, соответственно, активно применяются для демонстрации новых технологий [4, 5]. Также широкое применение МКА получили в образовательных программах: Массачусетский технологический институт - проекты SPHERES и EMFF; университет графства Суррей (SSTL) – 27 малых спутников; Стэнфордский университет - проект OPAL, пикоспутники StenSat, QuakeSat, CubeSat; технический университет Берлина - наноспутники TUBSat; центр космических технологий и микрогравитации Бременского университета – BremSat; университет штата Юта – аппарат NuSat; университет Санта Клара – Artemis; университет Рима La Sapienza – четыре микроспутника UniSat. В Украине и России проекты малых спутников разрабатываются в

ХАИ, ДГУ, ХПИ, МАИ, МВТУ, МЭИ, САКУ, ВИКИ при поддержке ведущих конструкторских бюро.

2. Постановка проблемы

Анализ литературных источников представленный во введении и опыт эксплуатации и экспериментальной отработки спутниковых систем стабилизации и ориентации (ССО) МКА, показывает, что наиболее характерными причинами для преждевременного выхода из строя системы либо существенного ухудшения показателей качества ее функционирования являются отказы объекта автоматической стабилизации и ориентации (ОАС), включающего в себя МКА, исполнительные механизмы и датчики кинематических параметров движения аппарата.

Требования к динамическим и ресурсным характеристикам ССО современных МКА обусловили использование активных ССО с двигателями-маховиками в качестве основных исполнительных механизмов [6–9], а для определения ориентации – бесплатформенные астроинерциальные блоки (БАИБ) [10, 11].

В состав традиционной ССО входят три двигателя маховика (ДМ) и ДУС, установочные векторы которых совпадают с собственными осями вращения маховиков и осями чувствительности датчиков, ортогональны друг другу и параллельны основным осям инерции МКА. Это позволяет упростить алгоритмы управления ориентацией и стабилизации, а также осуществлять независимый выбор ДМ и ДУС исходя из требуемых динамических возможностей МКА в соответствующем канале управления. В последнее время разработчиками ССО все чаще используются нетрадиционные схемы установки, характеризующиеся избыточным количеством ДМ и ДУС, а также неортогональностью их установочных векторов друг другу [12, 13].

Технические требования к динамическим возможностям ОАС в различных каналах управления определяют диапазоны изменения кинетических и управляющих моментов соответствующих исполнительных механизмов и влияют на выбор конкретного типа ДМ из имеющегося в наличии номенклатурного ряда. Зачастую ДМ, наилучшим образом удовлетворяющий требуемым динамическим характеристикам, отсутствует, а разработка нового сопряжена с дополнительными материальными затратами и увеличением времени проектирования ССО. Так как моментные характеристики ДМ прямо пропорциональны их массе и габаритам, выбор ДМ с более широким, чем требуется, динамическим диапазоном приводит к нежелательному увеличению массо-габаритных характеристик системы. Вместе с этим, за счет применения неортогональных схем установки обеспечивается близкое к требуемому распределение управляющего момента между каналами управления, используя при этом несколько идентичных ДМ, хорошо освоенных производством [14–16].

Для обеспечения пространственной управляемости МКА даже в случае полного отказа произвольного исполнительного механизма или ДУС необходимо использовать избыточные схемы установки этих элементов и при этом располагать их установочные вектора, параллельные осям вращения ДМ и осям чувствительности ДУС, таким образом, чтобы они были неколлинеарны друг другу [15–17].

Исполнительные механизмы и датчики представляют собой сложные электромеханические устройства, характеристики которых существенно изменяются в процессе функционирования, и обладают меньшим ресурсом и большими массогабаритными характеристиками по сравнению с цифровыми вычислительными модулями, а их резервирование сопряжено с различными техническими и технологическими трудностями, а замена функциональных элементов ОАС МКА на более качественные аналоги затруднительна ввиду ряда существующих объективных ограничений. Альтернативой является обеспечение функциональной устойчивости ОАС, которая предполагает разработку таких аппаратных и алгоритмических решений, которые позволяют восстанавливать требуемое качество управления после появления отказов на основании информации о текущем функциональном состоянии объекта.

3. Определение структуры функционально устойчивого ОАС

ОАС является составной частью ССО и включает в себя объект управления (ОУ), блок исполнительных механизмов (БИМ) для выработки управляющих моментов на ОУ, а также блок датчиков (БД) для определения параметров движения ОУ. Выходные сигналы с БД поступают на устройство автоматического управления (УАУ), которое с учетом текущего состояния, режима работы и алгоритма ориентации или стабилизации формирует сигналы управления, подаваемые на БИМ (рис. 1).

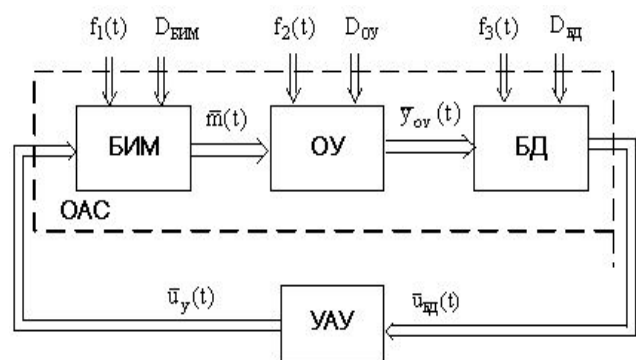


Рис. 1. Функциональная схема ССО

На рис. 1 введены следующие обозначения: $f_i(t)$, $i = \overline{1,3}$ – внешние возмущения; $D_{БИМ}$, $D_{ОУ}$, $D_{БД}$ – множества видов отказов БИМ, ОУ и БД; $\bar{u}_y(t)$ – вектор управляющих воздействий; $\bar{m}(t)$ – вектор управляющих моментов; $\bar{y}_{ou}(t)$ – вектор измеряемых параметров движения ОУ; $\bar{u}_{бд}(t)$ – вектор выходных сигналов БД.

Спектр датчиков, используемых для определения параметров ориентации МКА в БАИБ, включает астродатчики, датчики угловой скорости (ДУС), приборы ориентации на Землю; приборы ориентации на Солнце, магнитометры. Каждый тип датчиков имеет свои особенности, определяющие его применимость в структуре ССО МКА. Астродатчики, несмотря на свое преимущество в отношении точности определения углового положения КА (до нескольких десятков угловых секунд), имеют высокую стоимость, значительные массогабаритные характеристики, и большую инерционность, что не позволяет применять их на микро и нано спутниках. Точность магнитометров существенно зависит от точности модельной имитации напряженности геомагнитного поля земли, траектории и режима полета МКА. Приборы ориентации на Землю и Солнце имеют узкое поле зрения и позволяют получить адекватную информацию только в строго определенных режимах движения МКА, а также характеризуются недостаточной точностью и быстродействием для решения большинства целевых задач. Наиболее универсальными и широко используемыми при построении современных ССО, являются бесплатформенные измерительные блоки (БИБ) вектора угловой скорости.

В случае возникновения нештатной ситуации, приводящей к полному отказу хотя бы одного из ДМ или ДУС, традиционный ОАС, теряет пространственную управляемость, а МКА – возможность выполнить целевую задачу. В функционально устойчивых ОАС восстановление работоспособности осуществляется за счет использования различного рода избыточностей. Такие виды избыточностей как параметрическая, сигнальная, и алгоритмическая обеспечивают парирование видов отказов, приводящих к частичной потере работоспособности функциональных элементов. В случае же полного отказа ДМ или ДУС, восстановление работоспособности возможно только за счет

структурной избыточности, следовательно, для обеспечения функциональной устойчивости ССО к подобным видам отказов требуется установка на КА дополнительных ДМ и ДУС.

Таким образом, для обеспечения функциональной устойчивости ОАС в его структуру, а в целом и в структуру ССО МКА целесообразно вводить минимально-избыточные блоки ДМ и ДУС (рис. 2).

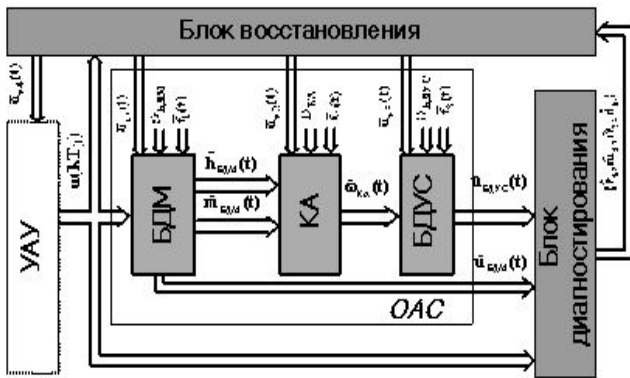


Рис. 2. Схема функционально устойчивого ОАС

Принцип действия функционально устойчивого ОАС заключается в следующем (рис. 2): вектор сигналов управления $\bar{u}(kT_0)$ с УАУ поступает на блок двигателей-маховиков (БДМ), который вырабатывает управляющий $\tilde{m}_{БДМ}(t)$ и кинетический $\tilde{h}_{БДМ}(t)$ моменты, воздействующие на КА. Угловые скорости $\tilde{\omega}_{КА}(t)$ вращения КА измеряются при помощи блока датчиков угловой скорости (БДУС) и используются в дальнейшем для определения параметров движения МКА относительно центра масс. На функциональные элементы ОАС в процессе его функционирования воздействуют внешние возмущения $\bar{f}_i(t), i = \overline{1,3}$, а также виды отказов из множеств $D_{БДМ}, D_{БДУС}$ и $D_{КА}$, приводящие к отклонению углового положения и скорости вращения КА, а также показаний датчиков от своих номинальных значений. Блок диагностирования на основании сигналов управления, а также доступных измерению сигналов с БДМ $\tilde{m}_{БДМ}(t)$ и БДУС $\tilde{\omega}_{КА}(t)$ осуществляет решение задач диагностирования ОАС и вырабатывает сигналы, характеризующие момент обнаружения отказа \hat{t}_i , его принадлежность к определенному месту \hat{m}_i , классу \hat{a}_i , и виду \hat{d}_i . Полученные значения передаются на блок восстановления, который осуществляет выбор средства парирования обнаруженного вида отказа и формирует соответствующие сигналы $u_{vi}(t), i = \overline{1,4}$ на УАУ и функциональные элементы ОАС для восстановления работоспособности объекта.

БДМ содержит в своем составе избыточное количество (от четырех и более) инерционных исполнительных механизмов, каждый из которых состоит из усилителя мощности (УМ), двигателя-

маховика и датчика скорости (ДС) вращения ротора ДМ. Функциональные элементы в исполнительном механизме соединены согласно принципу управления по отклонению, при этом в качестве сигнала обратной связи используется выходной сигнал ДС.

4. Диагностическое обеспечение функционально устойчивого ОАС

Возникновение в ОАС любого вида отказа представляет собой неопределенное событие с точки зрения момента его появления, места возникновения, принадлежности к одному из классов, конкретного вида проявления. Снятие неопределенностей связано с оценкой соответствующих характеристик на основании доступных измерению косвенных признаков отказов ОАС. Для этих целей в работе используется сигнально-параметрический подход к диагностированию технических систем, который базируется на принципах оценки параметров диагностических моделей, соответствующих текущему техническому состоянию процесса [17–21].

Диагностическое обеспечение при использовании сигнально-параметрического подхода формируется по принципу последовательного снятия неопределенностей характеристик отказов, т. е. позволяет решать следующие задачи диагностирования ОАС: обнаружение отказа; поиск места отказа; установление класса отказа; определение вида отказа. Каждая из задач диагностирования предполагает построение своих диагностических моделей, наиболее подходящих для ее решения. Все диагностические модели иерархически связаны между собой. На верхнем уровне находятся модели, применяемые для обнаружения отказов, а на нижнем уровне – модели, используемые для решения задачи установления вида отказа.

Для решения задач диагностирования на основании обработки входных и выходных сигналов ОАС необходимо сформировать соответствующие диагностические функциональные модели (ДФМ), отражающие влияние прямых диагностических признаков $\Delta\lambda_i$, характеризующих рассматриваемые виды, классы и места возникновения отказа на косвенные диагностические признаки. В качестве косвенных диагностических признаков могут быть использованы признаки $\Delta\bar{y}(k)$, сформированные на основании доступных измерению входных и выходных сигналов ОАС, а также оценочных значений выходных сигналов $\hat{y}(k)$.

Уравнения, описывающие в общем виде возмущенное движение исследуемой части ОАС при наличии прямого диагностического признака $\Delta\lambda_i$, могут быть представлены следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{x}(k+1) &= \tilde{A}(\Delta\lambda_i) \bar{x}(k) + \tilde{B}(\Delta\lambda_i) u(k) + \tilde{F}(\Delta\lambda_i) f(k) + b_0(\Delta\lambda_i) + a_0; \\ \bar{y}(k) &= \tilde{C}(\Delta\lambda_i) \bar{x}(k) + \tilde{D}(\Delta\lambda_i) u(k) + c_0(\Delta\lambda_i), \end{aligned}$$

где $\tilde{A}(\Delta\lambda_i), \tilde{B}(\Delta\lambda_i), \tilde{F}(\Delta\lambda_i), \tilde{D}(\Delta\lambda_i), \tilde{C}(\Delta\lambda_i)$ – соответствующие матрицы, составленные из

параметров уравнений возмущенного движения рассматриваемой части ОАС при наличии прямого признака отказа $\Delta\lambda_i$; a_0 – вектор, характеризующий параметры рабочей точки ОАС; $b_0(\Delta\lambda_i)$, $c_0(\Delta\lambda_i)$ – вектора, характеризующие влияние видов отказов на переменные состояния и выхода.

Для формирования оценочных значений $\hat{y}(k)$ может быть использована модель с произвольной динамикой, имеющая вид

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= G\hat{x}(k) + K\hat{y}(k) + Bu(k) + Ff(k) + a_0; \\ \hat{y}(k) &= C\hat{x}(k) + Du(k), \end{aligned}$$

где $G = A - KC$ – матрица, определяющая динамические свойства модели K – матрица фильтра Льюенбергера, A, B, F, D, C – соответствующие матрицы, составленные из параметров уравнений номинального движения рассматриваемой части ОАС.

В случае, если отсутствуют отказы в измерителях, связь прямых и косвенных диагностических признаков будет описываться при помощи следующей ДФМ:

$$\begin{aligned} \Delta x(k+1) &= G\Delta x(k) + \Delta A(\Delta\lambda_i)\tilde{x}(k) + \Delta B(\Delta\lambda_i)u(k) + \\ &+ \Delta F(\Delta\lambda_i)f(k) + b_0(\Delta\lambda_i); \\ \Delta y(k) &= C\Delta x(k) + \Delta D(\Delta\lambda_i)u(k), \Delta x(0) = \Delta x_0, \end{aligned}$$

где $\Delta A(\Delta\lambda_i)$, $\Delta B(\Delta\lambda_i)$, $\Delta F(\Delta\lambda_i)$, $\Delta D(\Delta\lambda_i)$ – отклонения соответствующие матриц от номинальных значений, вызванные наличием прямого признака отказа $\Delta\lambda_i$.

В ДФМ классов отказов $\lambda_i \in A = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{N_\alpha}\}$, где A – множество прямых диагностических параметров классов отказов. В ДФМ мест отказов $\lambda_i \in B = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{N_\beta}\}$, где B – множество прямых диагностических параметров мест отказов. В ДФМ обнаружения отказов $\lambda_i \in \Gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{N_\gamma}\}$, где Γ – множество прямых диагностических параметров обнаружения отказов.

Если признак $\Delta\lambda_i$ входит в соответствующие матрицы и вектора линейно, а матрица D равняется нулю, ДФМ принимает вид.

$$\begin{aligned} \Delta x(k+1) &= G\Delta x(k) + (A_{\lambda_i}\tilde{x}(k) + B_{\lambda_i}u(k) + F_{\lambda_i}f(k) + b_{0,\lambda_i})\Delta\lambda_i; \\ \Delta y(k) &= C\Delta x(k), \Delta x(0) = \Delta x_0. \end{aligned}$$

В случае полностью измеряемого вектора состояния, целесообразно использовать статическую ДФМ:

$$\begin{aligned} \Delta x(k+1) &= \Delta A(\Delta\lambda_i)\tilde{x}(k) + \Delta B(\Delta\lambda_i)u(k) + \Delta F(\Delta\lambda_i)f(k) + b_0(\Delta\lambda_i); \\ \Delta y(k) &= C\Delta x(k) + \Delta D(\Delta\lambda_i)u(k). \end{aligned}$$

Оценка возможностей обнаружения отказа, поиска места и установления класса отказа осуществляется на основании анализа полученных ДФМ с использованием критериев структурной и сигнальной диагностируемости сигнально-параметрического подхода, для однократного отказа.

Диагностические функциональные модели для решения задач обнаружения, поиска места и установления класса отказа в ОАС, которые обеспечивают однозначную аналитическую связь между прямыми и косвенными диагностическими признаками для каждой из задач диагностирования, учитывают динамические особенности объекта, а также системные связи между его элементами. На основании ДФМ формируется дихотомическое дерево обнаружения и классификации отказов, являющееся основой для разработки машинных процедур глубокого диагностирования ОАС.

5. Парирование отказов ОАС

Характеристики отказов, такие как время обнаружения, место, класс и вид, полученные в результате диагностирования ОАС, представляют собой основу для следующего этапа обеспечения функциональной устойчивости – парирования отказов за счет использования имеющихся в объекте структурной, функциональной и информационной избыточностей.

Наиболее распространенными средствами парирования отказов, применимыми на МКА, являются сигнальная и параметрическая подстройка, а также реконфигурация аппаратуры и алгоритмов управления.

Сигнальная подстройка заключается в формировании дополнительного управляющего воздействия, устраняющего последствия компенсируемых видов отказов в целях восстановления номинальной ориентации и стабилизации объекта. Параметрическая подстройка заключается в изменении параметров элементов системы (коэффициентов передачи, напряжений питания и т.п.) с целью парирования видов отказов, обнаруженных в объекте.

Для организации сигнальной подстройки в конструкцию ОАО предусмотрена возможность подачи дополнительного управляющего воздействия, а для параметрической подстройки ССО располагает элементами с подстраиваемыми параметрами, значения которых можно целенаправленно изменять для компенсации последствий отказов (рис. 3). На рис. 3 введены понятия блоков параметрической подстройки (БПП) и блоков сигнальной подстройки (БСП).

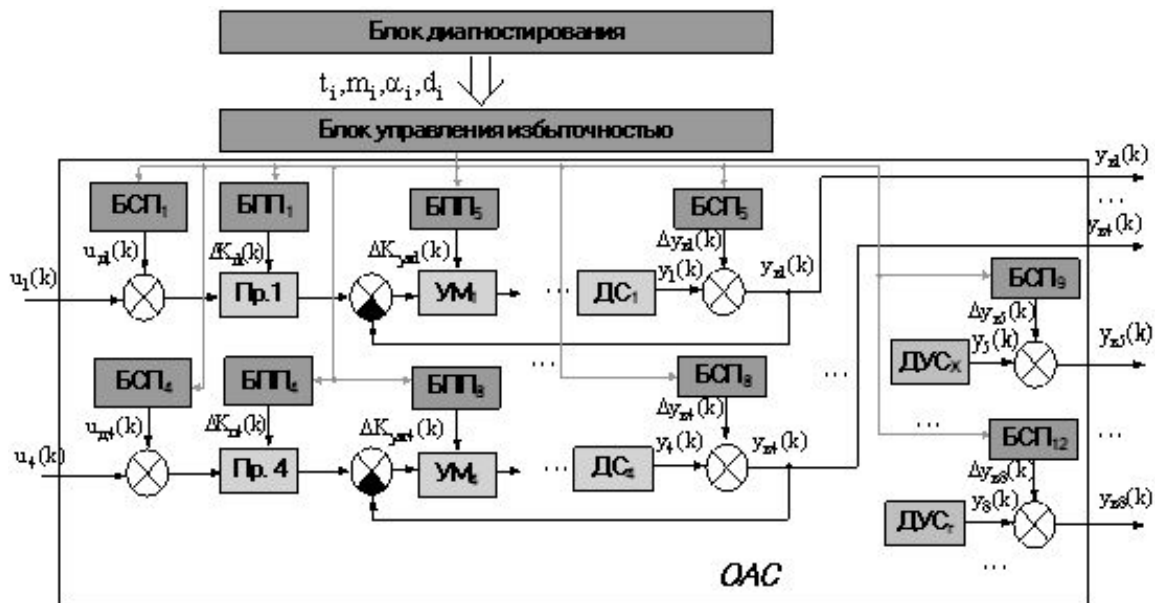


Рис. 3. Схема реализации сигнальной и параметрической подстроек

За счет сигнальной подстройки осуществляется компенсация влияния видов отказов, приводящих к изменению коэффициентов передачи и дрейфу статических характеристик, а также изменению параметров, характеризующих динамические свойства элементов ОАС.

Сигнальная подстройка используется также для формирования дополнительного управляющего воздействия $u_o(k)$ на ОАС, устраняющего последствия компенсируемых видов отказов ДМ и МКА в целях сохранения номинальной ориентации и стабилизации.

В случае если влияние обнаруженных видов отказов не может быть скомпенсировано сигнальной или параметрической подстройками (обрывы, короткие замыкания, пробой, некомпенсируемое изменение коэффициентов передачи либо некомпенсируемый дрейф статической характеристики), восстановление работоспособности ОАС можно осуществить за счет реконфигурации аппаратуры или алгоритмов управления, предполагающих использование имеющейся в наличии структурной избыточности.

В рассматриваемой компоновке ОАС используются минимально-избыточные схемы установки ДМ и ДУС, и, соответственно, имеется структурная избыточность, позволяющая восстанавливать работоспособность ОАС в условиях появления неопределенных отказов ДМ и ДУС, а также видов отказов, приводящих к полным отказам ДМ и ДУС.

Использование структурной избыточности в случае отказа одного из ДМ в ОАС предполагает формирование требуемого результирующего момента БДМ только лишь за счет работоспособных ДМ. Данное средство парирования отказа может быть использовано как на этапе, когда найдено место отказа (номер ДМ), но еще не

установлен класс и определен вид отказа, так и в случаях, когда парирование отказов сигнальной и параметрической подстройкой невозможно ввиду наличия ограничений на величину входных сигналов и значения параметров, либо в ИМ присутствует вид отказа, приводящий к его окончательному выходу из строя (короткое замыкание, обрыв).

Парирование видов отказов, приводящих к обрыву датчика скорости вращения ротора ДМ, осуществляется либо полным отключением ДМ с последующим перераспределением вырабатываемого им кинетического момента между работоспособными ДМ, либо отключением контура локальной обратной связи с последующим учетом изменения преобразовательных свойств отказавшего функционального элемента с порядковым номером $\alpha_{умз}$ при формировании управляющих сигналов. Факт использования ДМ, с которого не поступает сигнал об угловой скорости вращения ДМ, учитывается в процедурах диагностирования БДМ и алгоритмах формирования управляющих воздействий.

Для реализации сценариев парирования отказов исследуемого ОАС необходимо сформировать процедуры выбора средства парирования из имеющихся в наличии на основании полученной в результате диагностирования информации о месте, классе и виде возникшего отказа (рис. 4, 5).

На первом этапе разработки процедур выбора средства парирования осуществляется анализ всех рассматриваемых видов отказов с точки зрения возможности его парирования за счет имеющихся в наличии сигнальной, параметрической или структурной избыточностей. На основании результатов анализа устанавливаются взаимосвязи между видами отказа и средствами парирования, и формируется ряд

подмножеств $D_{cpe_i}, i = \overline{1, N_{cp}}$, количество N_{cpe} которых равно количеству имеющихся в наличии средств парирования отказов.



Рис. 4. Связь средств парирования отказов с видами отказов ИМ

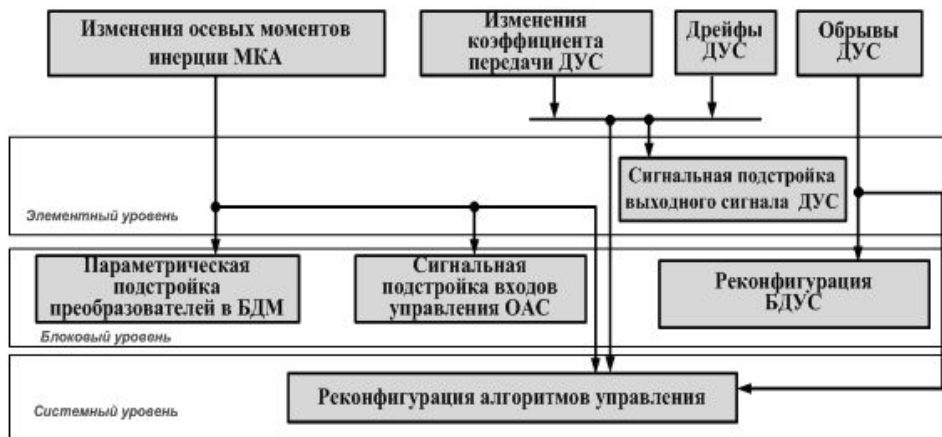


Рис. 5. Связь средств парирования отказов с видами отказов МКА и БДУС

Принадлежность отказа к тому или иному подмножеству определяется его основными характеристиками (класс, вид, место, величина отклонения прямого признака отказа от своего номинального значения), а также характеристиками средств восстановления (ограничение на величину подстраиваемого сигнала или параметра, количество резервных элементов в блоке):

- парирование отказа за счет сигнальной и параметрической подстроек предполагает наличие информации о виде отказа и численном значении отклонения матриц и векторов, описывающих динамику ОАС, от их номинальных значений;

- компенсация влияния видов отказов БДМ и БДУС за счет реконфигурации аппаратуры может осуществляться уже при наличии информации о номере отказавшего исполнительного механизма или датчика, что позволяет на более ранней стадии начать процедуру парирования ОАС, однако позволяет компенсировать влияние отказов только в случае наличия не менее трех работоспособных элементов в блоке;

- при расчете управляющих сигналов, компенсирующих влияние отказов необходимо учитывать ограничения на величины изменения управляемых сигналов и параметров элементов.

- при парировании отказов переход к средствам восстановления блокового и системного уровня осуществляется только тогда, когда все средства элементного уровня исчерпаны.

Наличие перекрестных связей между средствами парирования и видами отказов обуславливает необходимость разработки метода, позволяющего на основании информации о возникшем виде отказа и текущем состоянии ОАС наиболее эффективно выбрать средство парирования.

Предлагаемый метод выбора средства парирования основывается на учете множественных связей между средствами парирования и видами отказов объекта восстановления. Для этого каждому i -му средству парирования ставится в соответствие характеристика $P_{срvi}$, численное значение которой равняется количеству видов отказов, парируемых за счет i -го средства.

Для расчета $P_{срvi}$ на этапе выбора средства парирования связи между множествами видов отказов и средствами парирования задаются в виде таблицы, содержащей количество строк равное количеству видов отказов N_D и количество столбцов, равное количеству средств парирования

N_{cp} . Значение ячейки таблицы на пересечении i -й строки и j -го столбца определяется в результате решения соответствующего предикатного уравнения и равно «1» в случае, если i -й вид отказа может быть парирован j -м средством восстановления, и «0» в противном случае.

Для парирования обнаруженного в ОАС вида отказа d_m выбирается такое средство W_e , которое содержит «1» в строке с номером m , и сумма элементов q_{ij} в соответствующем столбце для которого наименьшая.

В случае, если в результате применения предлагаемого подхода было определено сразу несколько средств парирования с идентичными значениями параметров P_{crai} , среди них выбирается то средство, которое обладает наивысшим приоритетом, установленным на этапе синтеза процедур восстановления.

6. Стенд исследования ССО с функционально устойчивым ОАС

Для исследования работоспособности синтезированных средств обеспечения функциональной устойчивости разработан специализированный аппаратно-программный комплекс (АПК), позволяющий осуществлять экспериментальные исследования процессов управления ОАС с избыточным количеством двигателей-маховиков и датчиков угловой скорости в номинальном и нештатных режимах его работы. Внешний вид АПК представлен на рис. 6.

Функциональный состав АПК позволяет вводить в ОАС виды отказов, а также исследовать поведение ОАС в номинальных и аварийных режимах. Таким образом, создаются условия для отладки, доводки и коррекции разработанных моделей и методов обеспечения функциональной устойчивости ОАС.

АПК состоит из следующих основных элементов: платформа с минимально-избыточными БДМ и БДУС (рис. 7), закрепленная в кардановом подвесе (КП); УАУ и ПК со специализированным программным обеспечением (ПО).

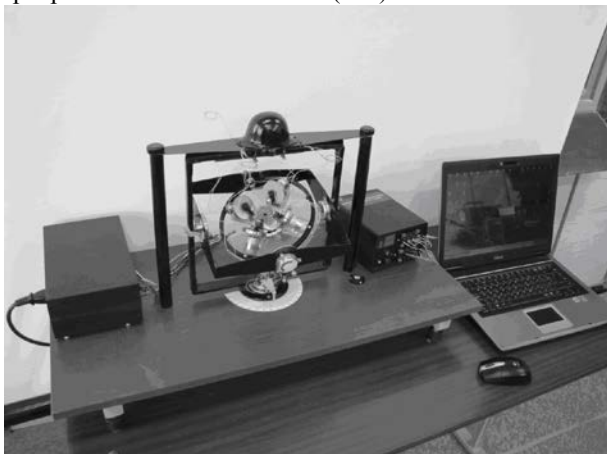


Рис. 6. Внешний вид АПК для исследования моделей и методов обеспечения функциональной устойчивости ОАС с ДМ

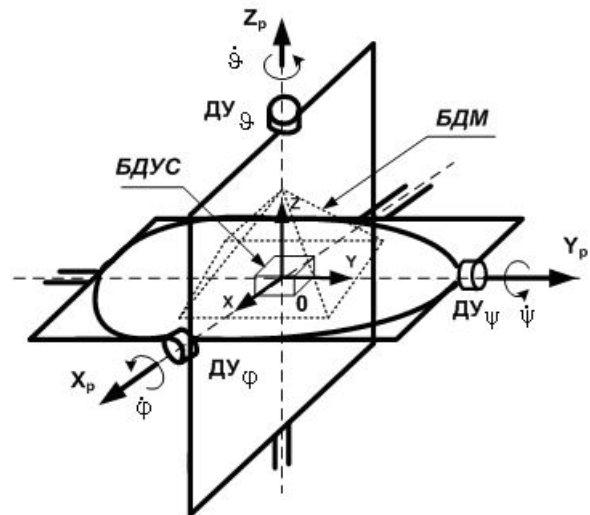


Рис. 7. Схема установки платформы с БДМ и БДУС в КП

Схема установки ДМ – пирамидальная. Угловые скорости движения платформы измеряются при помощи избыточного блока микромеханических датчиков угловой скорости. Схема установки ДУС – диагональная. Угловое положение платформы вычисляется на основании показаний датчиков углов (ДУ) поворота рамок подвеса, а также интегрирования показаний ДУС. Скорости вращения ДМ измеряются при помощи оптических прерывателей.

УАУ построено на базе однокристальных микроконтроллеров семейств AVR и ARM7, и включает в себя:

- периферийный микроконтроллерный модуль, предназначенный для преобразования сигналов датчиков стенда в цифровой код, а также генерацию управляющих сигналов на исполнительные механизмы;
- управляющий микроконтроллерный модуль, осуществляющий обмен данными с ПК и реализующий процедуры управления движением платформы, диагностирования и парирования отказов ОАС;
- усилители мощности, обеспечивающие преобразование и усиление сигналов, подаваемых на ДМ.

Функциональная схема аппаратной части комплекса представлена на рис. 8.

$$\exists (\tilde{u}_{dycs}(k) \neq const), s \in \{x, y, z\}, s \neq j.$$

Программное обеспечение комплекса включает в себя ПО нижнего уровня, обеспечивающее выполнение в УММ и ПММ разработанных процедур управления и обеспечения функциональной устойчивости, а также ПО верхнего уровня, предназначенное для выполнения следующих функций: обмен информацией с УАУ, задание режимов работы системы, визуализация и хранение результатов экспериментальных исследований.

Созданный аппаратно-программный комплекс позволяет обрабатывать все основные режимы работы ССО, как в номинальном (штатном) режимах

работы, так и в аварийных (нештатных) режимах. Проведенные исследования на стенде макетного образца объекта автоматической стабилизации и ориентации со свойством функциональной устойчивости в штатных режимах работы, показали работоспособность разработанных моделей и методов глубокого диагностирования и гибкого

парирования отказов и принципиальную возможность сохранения работоспособности объекта при возникновении в нем видов отказов из рассматриваемого множества. Рассматриваемая ССО представляет собой макетный образец системы студенческого спутника СМС ХАИ.

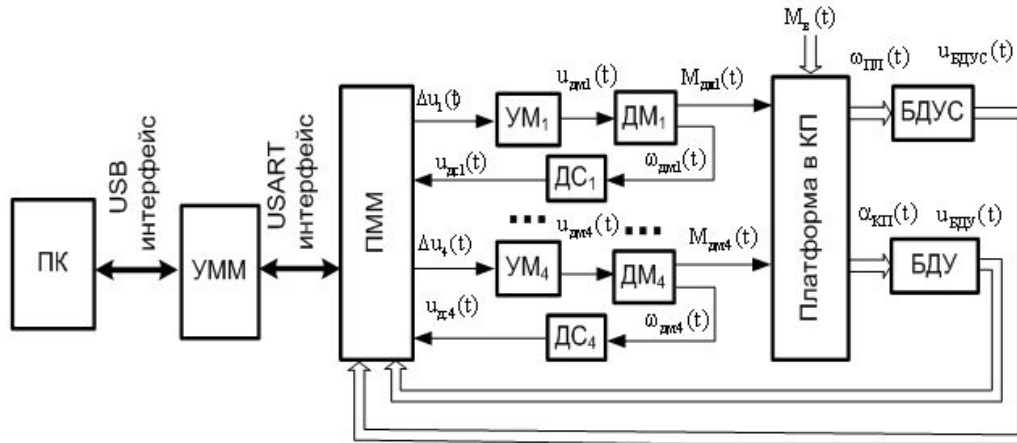


Рис. 8. Функциональная схема аппаратной части комплекса: ПММ – периферийный микроконтроллерный модуль; УММ – управляющий микроконтроллерный модуль; БДУ – блок датчиков углового положения рамок КП

7. Выводы

В результате проведенного анализа тенденций в разработках по расширению функциональных возможностей ССО МКА для парирования штатных ситуаций, установлены тенденции в расширении функциональных возможностей, заключающиеся в обеспечении ССО МКА свойством функциональной устойчивости. Представлены инструментальные средства диагностирования, позволившие разработать модели и методы глубокого диагностирования функционального состояния ОАС, а также методы гибкого восстановления работоспособности посредством управления по диагнозу такими избыточными средствами как сигнальная и параметрическая подстройка, реконфигурация алгоритмов и коммутация аппаратуры. Представлен программный комплекс отладки модулей функциональной устойчивости и произведена отработка и исследование их алгоритмического обеспечения, доказавшие их работоспособность для парирования штатных ситуаций.

Литература

1. Севастьянов, Н. Н. Анализ современных возможностей создания малых космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли [Текст] / Н. Н. Севастьянов, В. Н. Бранец, В. А. Панченко, Н. В. Казинский, Т. В. Кондранин, С. С. Негодяев. – ТРУДЫ МФТИ. – 2009. – Т. 1, № 3. – С. 14–22.
2. Кулик, А. С. Концепция обеспечения живучести спутниковых систем управления ориентацией и стабилизацией [Текст] / А. С. Кулик, О. А. Лученко, С. Н. Фирсов // Радиоэлектроника,

информатика, управління. – 2011. – № 2 (25). – С. 41–47.

3. Фирсов, С. Н. Комплексные показатели функциональной устойчивости спутниковых систем стабилизации и ориентации [Текст] / С. Н. Фирсов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 1 (98). – С. 31–38.

4. Firsov, S. N. Forming of fault-tolerant flywheel engine blocks in satellite systems of orientation and stabilization [Text] / S. N. Firsov // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2014. – № 4 (53). – P. 601–609.

5. Фирсов, С. Н. Формирование устойчивой к отказам структуры измерителей параметров движения систем ориентации и стабилизации [Текст] / С. Н. Фирсов // Гироскопия и навигация. – 2013. – № 4 (83). – С. 72–83.

6. Reznikova, Olga Fuzzy Resource Selection for the Functional State Recovery of the Fault System [Text] / Olga Reznikova, Sergey Firsov // East West Fuzzy Colloquium 2013 20th Zittau Fuzzy Colloquium. – IP: PAM, 2013. – P. 183–189.

7. Фирсов, С. Н. Аппаратно-программный комплекс экспериментальной отработки процессов управления, диагностирования и парирования отказов малых космических аппаратов [Текст] / С. Н. Фирсов, О. В. Резникова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2014. – № 6. – С. 60–69.

8. Труды совещания “Управление движением малогабаритных спутников” [Текст] / Под редакцией М.Ю. Овчинникова. – М.: ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, 2005. – 32 с.

9. Труды 3-го совещания “Управление движением малогабаритных спутников” [Текст] / Под

редакцией М. Ю. Овчинникова. – М.: ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, 2007. – 26 с.

10. Любимов, В. В. Об особенностях в возмущенном вращательном движении спутника с сильным магнитом на борту [Текст] / В. В. Любимов. – Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2009. – № 2. – С. 29–31.

11. Мещанов, А. С. Метод эквивалентных преобразований для управления спутником наблюдения инерционными приводами при неопределенности [Текст] / А. С. Мещанов. – Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2008. – № 3. – С. 258–268.

12. Мещанов, А. С. Высокоточное управление спутником наблюдения с малыми энергетическими затратами [Текст] / А. С. Мещанов. – Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2008. – № 1 – С. 17–23.

13. Афанасьев, В. А. Управление разворотами космического аппарата за назначенное время с помощью ракетных двигателей [Текст] / В. А. Афанасьев, Г. Л. Дегтярев, А. С. Мещанов, Т. К. Сиразетдинов. – Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2013. – № 1.

14. Фирсов, С. Н. Обеспечение функциональной устойчивости измерителей параметров движения спутниковых систем стабилизации и ориентации [Текст] / С. Н. Фирсов // Радиоелектроніка, інформатика, управління. – 2013. – №1 (28). – С. 144–150.

15. Пат. 87065 Україна, МКІ В 64 G 1/24. Спосіб демпфірування кутових швидкостей космічного літального апарату [Текст] / І. М. Бандурв, С. М. Фірсов, С. В. Локай (Україна) // Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковський "ХАІ". – №87065; Заявл. 10.06.13; Опубл. 27.01.14, Бюл №2. – 3 с.

16. Фирсов, С. Н. Методология обеспечения функциональной устойчивости спутниковых систем [Текст] / С. Н. Фирсов. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 208 с.

17. Лученко, О. А. Определение параметров установки двигателей-маховиков системы ориентации и стабилизации несимметричного малогабаритного космического аппарата [Текст] / О. А. Лученко, А. Н. Таран, С. Н. Фирсов, В.Н. Постников // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 1 (78). – С. 63–68.

18. Фирсов, С. Н. Формирование устойчивых к отказам блоков двигателей маховиков спутниковых систем Стабилизации и ориентации [Текст] / С. Н. Фирсов // Теория и системы управления. – 2014. – № 4 (83). – С. 83–104.

19. Постников, В. Н. Критерии оценки свойств избыточных маховичных систем [Текст] / В. Н. Постников, А. Н. Таран, С. Н. Фирсов // Радиоелектроніка, інформатика, управління. – 2011. – № 4. – С. 82–87.

20. Таран, А. Н. Концепция обеспечения живучести спутниковых систем управления ориентацией и стабилизацией [Текст] / А. Н. Таран,

С. Н. Фирсов, И. В. Бычкова // Системы обработки информации. – 2011. – № 8 (98). – С. 127–129.

21. Фирсов, С. Н. Аналитический метод определения параметров управления системы ориентации космического аппарата [Текст] / С. Н. Фирсов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 4 (91). – С. 55–59.

References

1. Sevastyanov, N. N. (2009). Analysis of current opportunities to create small space up preparations for remote sensing. PROCEEDINGS MIPT, 1 (3), 14–22.

2. Kulik, A. S., Luchenko, O. A., Firsov, S. N. (2011). The concept of survivability of satellite attitude control systems and stabilization. Journal of Radioelektronika, informatika, upravlinnya, 2 (25), 47–41.

3. Firsov, S. N. (2013). Complex indices of functional stability SAT stabilization systems and orientation. Journal of Aerospace and Technology, 1 (98), 31–38.

4. Firsov, S. N. (2014). Forming of fault-tolerant flywheel engine blocks in satellite systems of orientation and stabilization. Journal of Computer and Systems Sciences International, 4 (53), 601–609.

5. Firsov, S. N. (2013). Formation of a stable fault structure measuring motion parameters teley orientation and stabilization systems. Journal of Gyroscopes and Navigation, 4 (83), 72–83.

6. Reznikova, O., Firsov, S. (2013). Fuzzy Resource Selection for the Functional State Re-recovery of the Fault System. East West Fuzzy Colloquium 2013 20th Zittau Fuzzy Colloquium, 183–189.

7. Firsov, S. N., Reznikov, O. V. (2014). Hardware-software complex experimental development management processes, diagnosing failures and parry of small spacecraft. Journal of Devices and Systems. Management, monitoring, diagnostics, 6, 60–69.

8. Ovchinnikov, M. (2012). Proceedings of the meeting "Motion control of small satellites". Moskov, Keldysh RAS, 32.

9. Ovchinnikov, M. (2011) Proceedings of the 3rd meeting of the "Motion control of small satellites". Moskov, Keldysh RAS, 26.

10. Lyubimov, V. V. (2009). On peculiarities in the perturbed rotational motion of a satellite with a strong magnet on board. Proceedings of the higher educational institutions. Aviation equipment, 2, 29–31.

11. Meschanov, A. S. (2008). The method of equivalent transformations to control observation satellite inertial actuators with uncertainty. Proceedings of the higher educational institutions. Aeronautics, 3, 258–268.

12. Meschanov, A. S. (2009). Precision control observation satellite with low energy costs. Proceedings of the higher education institutions. Aeronautics, 1, 17–23.

13. Afanasiev, V. A. (2013). Manage reversals spacecraft for the appointed time using rocket engines. Proceedings of the higher education institutions. Aeronautics 1, 21–26.

14. Firsov, S. N. (2013) Ensuring functional stability parameter meter motion satellite systems

stabilization and orientation. Journal of Radioelektronika, informatika, upravlinnya, 1 (28), 144–150.

15. Banduriv, I., M., Firsov, S. M., Locale, S. V. (2014). Patent 87065 Ukraine, MKI B 64 G 1/24. A method of damping the angular velocity spacecraft. National Aerospace University. ME Zhukovsky "hai". № 87 065; Appl. 6/10/13; Publish. 01.27.14, Bull number 2, 3.

16. Firsov, S. N. (2014). Methodology for ensuring the stability of functional satellite systems. LAP LAMBERT Academic Publishing, 208.

17. Luchenko, O. A., Taran, A. N., Firsov, S. N. (2011). Determination of parameters of the installation of motor flywheel system orientation and stabilization of asymmetric malogaba–ritnogo spacecraft. Journal of Aerospace and Technology, 1 (78), 63–68.

18. Firsov, S. N. (2014). Formation resistant to failure of engine blocks flywheels satellite systems stabilization and orientation. Journal of Theory and Control Systems, 4 (83), 83–104.

19. Postnikov, V. N., Taran, A. N., Firsov, S. N. (2011). Criteria for evaluating the properties of redundant systems flywheel. Journal of Radioelektronika, informa–teak upravlinnya, 4, 87–82.

20. Taran, A. N., Firsov, S. N., Bychkova, I. V. (2011). The concept of survivability of satellite attitude control systems and stabilization. Journal of Information Processing Systems, 8 (98), 127–129.

21. Firsov, S. N. (2012). Analytical method for determining the parameters of the control system of the spacecraft orientation. Journal of Aerospace and Technology, 4 (91), 55–59.

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук Кошовий М. Д.
Дата надходження рукопису 24.07.2014 року.*

Фирсов Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент, докторант, кафедра систем управления летательными аппаратами. Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», ул. Чкалова 17, г. Харьков, Украина, 61070.
E-mail: sn.firsov@gmail.com

УДК 528.85

ПОРІВНЯННЯ КЛАСИФІКАТОРІВ РОСЛИННИХ ОБ'ЄКТІВ ПОБУДОВАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ТА ДИСКРИМІНАНТНОГО МЕТОДА ФІШЕРА

© Є. О. Шама

В статті приводиться порівняння методів розпізнавання рослинних об'єктів за результатами дистанційного зондування. Для побудови розпізнавальної моделі був використаний множинний лінійний дискримінантний аналіз Фішера та нейромережні методи. Для побудови класифікаторів на основі нейронної мережі та на основі дискримінантного аналізу використовувалися дані, які отримані в польових умовах за допомогою спектрометра.

Ключові слова: розпізнавання, спектральні коефіцієнти яскравості, ознаки, класифікатор, нейронна мережа, перцептрон, ознаки.

In the article comparison methods of recognition of vegetable objects is given on results the remote sensing. For the construction of identification mode was used linear discriminant analysis of Fisher and neural networks methods. The construction of neural networks and classifier built by means of discriminant analysis were made on the basis of experimental data obtained in the field with the help of a spectrometer.

Keywords: recognition, spectral brightness coefficients, signs, classifier, neural network, perceptron, signs.

1. Вступ

Для оцінки стану рослинних об'єктів (рівня вмісту мінеральних речовин, наявність або відсутність захворювань) та їх класифікації за видовою ознакою часто застосовують методи дистанційного зондування рослинних об'єктів. За допомогою дистанційних методів можна оцінювати динаміку розвитку і стан рослин на контрольованій площі при мінімальній участі людини або, взагалі, без неї. Тому питання автоматизації дистанційного зондування рослин і класифікація за видом рослинного об'єкту є актуальним.

2. Постановка проблеми

Мета роботи полягає у порівнянні методів розпізнавання, які можуть бути використані при побудові класифікатора рослин. У якості параметра порівняння методів використана ймовірність вірного розпізнавання рослини. Класифікація рослин проводилась на три класи: корисна культура – соняшник, бур'яни – мишій та амброзія, які на момент вимірювання коефіцієнтів відбиття складали понад 80 % рослин. Для боротьби з вищенаведеними бур'янами (амброзія – дводольний бур'ян, мишій – однодольний бур'ян), використовують різні гербіциди. Так один різновид гербіциду ефективно використовується для боротьби з