

УДК 681.5.09:681.518.2

О.А. ЛУЧЕНКО, О.И. ГАВРИЛЕНКО, А.С. КУЛИК

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина*

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ АКТИВНОЙ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В статье анализируются известные подходы к обеспечению отказоустойчивости, базирующиеся на технологиях диагностирования и восстановления функционального состояния технических систем. Рассматриваются особенности адаптивного подхода, обеспечивающего активную отказоустойчивость посредством взаимосвязанных технологий глубокого диагностирования и гибкого восстановления функционального состояния различных классов технических систем.

**адаптивный подход, активная отказоустойчивость, глубокое диагностирование, гибкое восстановление, диагностическая модель, замкнутое диагностирование**

### Введение

В любых технических системах в процессе эксплуатации возникают неисправности из-за ошибок проектирования, нарушения технологии изготовления, выработки ресурса, неправильных действий персонала, превышения установленных нагрузок. Некоторые неисправности перерастают в отказы, аварии, катастрофы. Все это свидетельствует о недостаточном внимании, уделяемом уровню безопасности, живучести и отказоустойчивости создаваемых технических систем, и, в первую очередь, их систем автоматического управления (САУ).

Рассмотрим и классифицируем существующие подходы к обеспечению отказоустойчивости. Известные подходы к обеспечению отказоустойчивости САУ можно представить такими двумя: пассивный и активный.

В основе *пассивного* подхода лежит идея обеспечения робастности замкнутой САУ к параметрической и сигнальной неопределенностям, вызванным неконкретными видами отказов. Его характерными особенностями являются использование неинтеллектуальных управляющих устройств, которые избирательно нечувствительны к конкретным видам отказов, отсутствие процедур получения конструктивной диагностической информации (факт возникновения вида отказа, характеристики вида отказа),

что позволяет говорить об отказоустойчивости в узком смысле [1 – 3].

Методы *активной отказоустойчивости* обеспечивают „приспосабливание” САУ к возникающим в ней видам отказов в режиме реального времени. Подходы к обеспечению активной отказоустойчивости характеризуются использованием развитых процедур диагностирования и восстановления функционального состояния систем [3].

*Под активной отказоустойчивостью системы авторы понимают ее способность осуществлять автоматическое диагностирование с требуемой глубиной и гибкое восстановление функционального состояния, удовлетворяющего заданным показателям качества.*

По способам формирования управления методы активной отказоустойчивости можно разделить на следующие группы: off-line формирования законов управления, „приспособление” к отказам в реальном масштабе времени.

Предварительное (off-line) формирование законов управления является простейшим способом обеспечения активной отказоустойчивости, недостатками которого является жесткая структура закона, глубина диагностирования до места отказа, отсутствие элементов адаптации к изменяющимся внешним условиям [3].

„Приспособление” к отказам в реальном масштабе времени лишено этих недостатков [3]. В последнее время появилось большое количество подходов к формированию активного отказоустойчивого управления в реальном масштабе времени. Основное достоинство этих подходов заключается в использовании результатов диагностирования для реструктуризации или реконфигурации управления. Тем не менее, эти подходы не лишены недостатков, а именно: использование разомкнутой системы диагностирования, не рассматриваются вопросы анализа ресурсов системы и управления ими, отсутствие описания форм и особенностей моделей восстановления (за исключением реконфигурации управления), рассмотрение только отдельных элементов САУ. **Цель работы** – анализ методов обеспечения активной отказоустойчивости.

### **Методы обеспечения активной отказоустойчивости**

Как было сказано, при использовании активной отказоустойчивости первым этапом является диагностирование функционального состояния. Рассмотрим существующие методы диагностирования.

По принципу диагностирования методы можно разделить на три больших группы – методы, опирающиеся на теорию инвариантов, на применение моделей и на введение и использование аналитической избыточности.

*Методы, основанные на применении теории инвариантов.* Данная группа методов требует знания инвариантов объекта диагностирования, т.е. некоторых характеристик объекта, остающихся неизменными при нормальном функционировании объекта и изменяющихся при появлении дефектов. Эти характеристики (инварианты) используются далее в качестве прямых или косвенных диагностических признаков. Инварианты могут быть двух типов – параметрические и сигнальные. Для определения значений параметрических инвариантов обычно используют результаты теории идентификации. При кон-

троле по сигнальным инвариантам осуществляется проверка некоторых контрольных условий, которым должны удовлетворять выходные сигналы объекта при отсутствии дефектов.

*Методы, основанные на использовании моделей.* Данная группа методов является одной из наиболее часто используемых в технической диагностике. Достоинства этих методов – их универсальность и наглядность.

В простейшем случае в качестве эталонной модели выступает второй экземпляр объекта (модель объекта), на который подаются те же входные сигналы. Контроль производится сравнением выходов объекта диагностирования и модели. Ряд методов контроля подвижных объектов основан на использовании так называемых наблюдателей состояния. В теории оптимального управления и фильтрации этим термином объединяют фильтры Калмана, наблюдатели Люенбергера и другие устройства, предназначенные для оценки вектора состояния линейных динамических систем.

*Методы, основанные на использовании аналитической избыточности.* Третий принцип контроля связан с использованием аналитической избыточности (analytical redundancy) [3]. Согласно этому принципу диагностирование системы осуществляется на основе проверки аналитических зависимостей (контрольных условий, или уравнений, или соотношений паритета), существующих между измеряемыми входами и выходами системы. Данные методы весьма чувствительны к не измеряемым возмущениям объекта.

Важно заметить, что все три выделенных принципа являются не изолированными, а выступают в тесном взаимодействии.

К недостаткам рассмотренных методов можно отнести следующее: авторы не рассматривают возможности „приспособления” моделей и методов диагностирования к решению задач восстановления, в большинстве рассматривают диагностирование разомкнутых САУ, используют линейные модели, рассмотренные методы обеспечивают небольшую

глубину диагностирования (обычно обнаружение или место отказа).

Проведенные авторами исследования позволили сформировать новый адаптивный подход к обеспечению активной отказоустойчивости технических систем (рис. 1) [3]. Особенность этого подхода заключается в том, что для решения проблемы отказоустойчивости применяются основные принципы и результаты современной ТАУ, а также методы сигнально-параметрического диагностирования систем [8]. Современные методы ТАУ также базируются на использовании моделей объекта или процесса управления. Однако эти модели носят чисто информационный характер – зависимость выхода объекта

от входного воздействия. Модели, используемые в адаптивном подходе, являются более полными, позволяющими моделировать объект, как в номинальном, так и в аварийном режиме. Методы парирования отказов включают в себя методы анализа и управления имеющейся избыточностью. При использовании методов управления избыточностью синтез алгоритмов ведется с использованием диагностических моделей, применяемых на первом этапе. Таким образом, адаптивный подход к обеспечению отказоустойчивости обеспечивает адаптацию, структурное и смысловое единство моделей и, соответственно, алгоритмов, используемых на всех этапах активного отказоустойчивого управления.

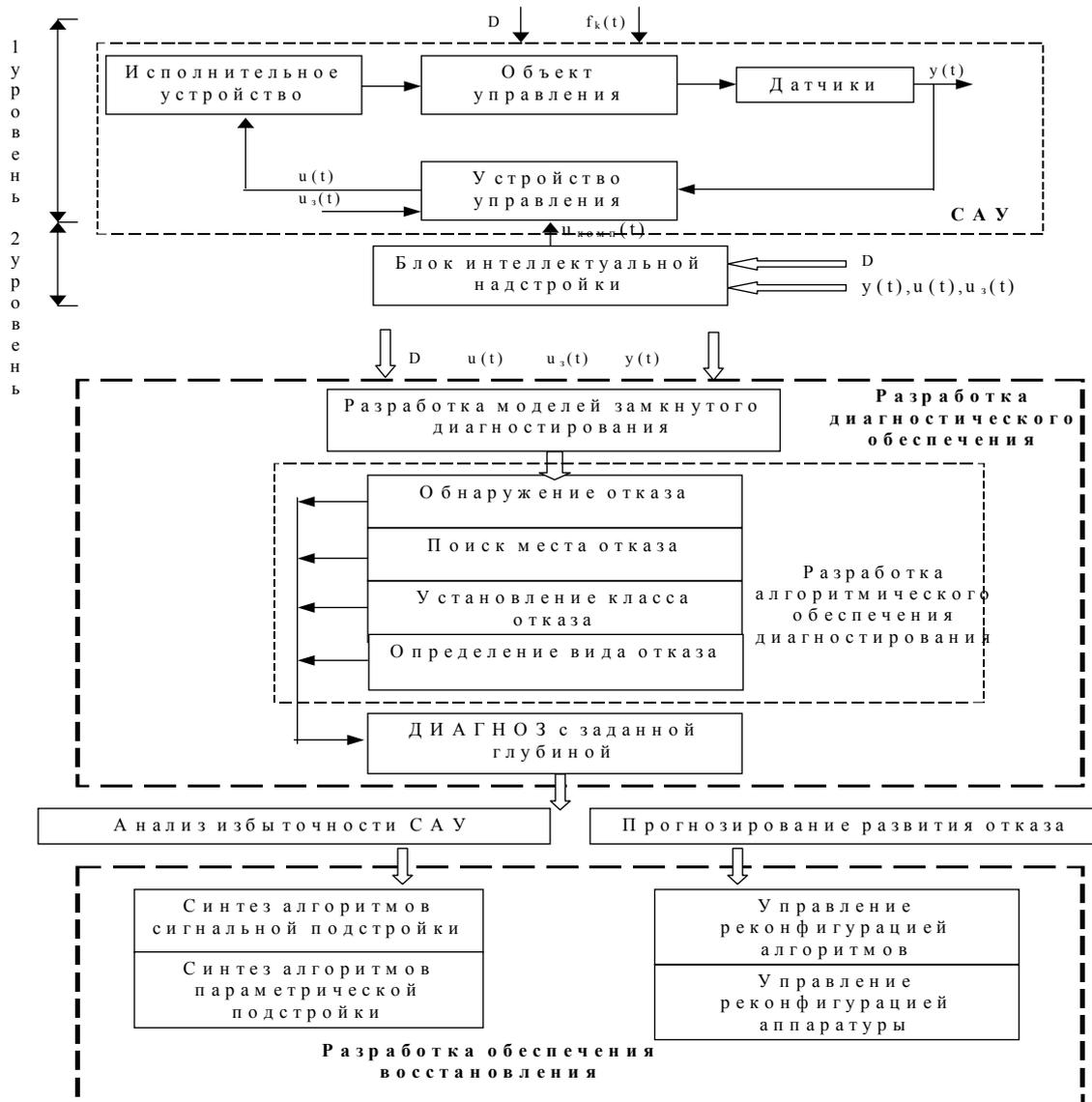


Рис. 1. Обобщенная схема адаптивного подхода

Учет влияния отказов на работоспособность САУ привел к необходимости рассмотрения системы с отказами как одного из множества ее возможных состояний. В результате исследования САУ для рассматриваемого множества видов отказов  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_q\}$  необходимо установить прямые диагностические признаки для каждой основной задачи диагностирования, а именно:  $\alpha_i$  – для задачи установления класса;  $\beta_i$  – для задачи поиска места;  $\gamma_i$  – для задачи обнаружения.

Для каждого обобщенного диагностического параметра  $\lambda_i \in \{\alpha_i, \beta_i, \gamma_i\}$  устанавливается множество его возможных значений и строится модель, описывающая определенный аварийный режим функционирования.

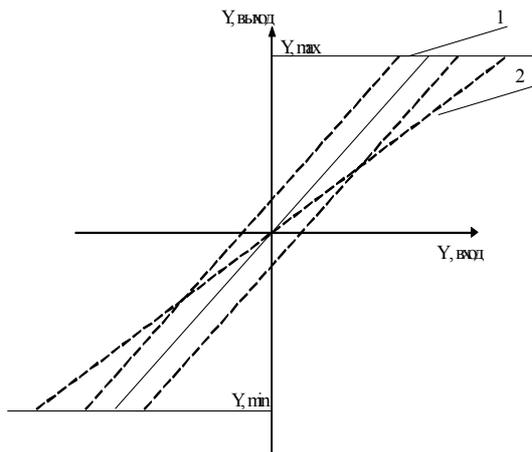


Рис. 2. Статическая характеристика

Определение прямых диагностических признаков  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  и множества их возможных значений осуществляется путем анализа статических и динамических характеристик элементов и всей САУ в целом.

Так, например, анализ статической характеристики, представленной на рис. 2, позволяет для рассматриваемого элемента ввести следующие классы отказов: 1 – дрейф нуля (положительный, отрицательный); 2 – изменение коэффициента передачи (включая случаи, когда характеристика располагается параллельно осям абсцисс и ординат).

Для эффективного парирования отказов прово-

дится оценка естественной избыточности и требуемой глубины диагностирования САУ с помощью конструктивных критериев восстанавливаемости структурно-аналитического метода анализа САУ [2].

Построение адекватной математической модели объекта диагностирования является одной из основных задач разработчика диагностического обеспечения. В аварийных и номинальных режимах САУ в общем виде описывается в пространстве состояний следующими уравнениями:

$$\begin{cases} \tilde{x}(k+1) = \phi[\tilde{x}(k), u(k), \lambda, \xi(k)] \\ \tilde{y}(k) = g[\tilde{x}(k), u(k), \lambda, \eta(k)] \end{cases} \quad (1)$$

где  $\tilde{x}(k)$  – вектор состояния объекта диагностирования с отказами;  $u(k)$  – вектор входных воздействий;  $\tilde{y}(k)$  – вектор измеряемых переменных объекта;  $\xi(k)$  и  $\eta(k)$  – векторы помех и ошибок моделирования;  $\phi[\cdot]$  и  $g[\cdot]$  – нелинейные функции,  $\lambda$  – недоступный измерению обобщенный диагностический параметр.

Тогда модель, описывающая аварийный режим функционирования, обусловленный дрейфом (рис. 2), будет иметь вид

$$Y_{вых}(k+1) = \underset{Y_{min}, Y_{max}}{sat} (KY_{ex}(k) + U_0), \quad (2)$$

где  $U_0$  – величина смещения характеристики.

Анализируя характеристику (рис. 2), можно определить диапазон изменения  $U_0$   $[0, Y_{max}]$  для положительного дрейфа и  $[Y_{min}, 0]$  – для отрицательного.

Для аварийного режима функционирования, обусловленного изменением коэффициента передачи (рис. 2), модель примет вид

$$Y_{вых}(k+1) = \underset{Y_{min}, Y_{max}}{sat} \tilde{K}Y_{ex}(k), \quad (3)$$

где диапазон изменения  $\tilde{K}$   $[0, 1]$ .

Выбор типа диагностической модели зависит от задачи, которая решается, и требований, которые выдвигают к временным, качественным и количественным характеристикам процесса диагностирования.

В рамках *адаптивного подхода* разработаны сигнално-параметрические методы замкнутого диаг-

ностирования, позволяющие обеспечить адаптированную к имеющимся ресурсам глубину диагностирования и требуемую достоверность диагноза [2]. При этом процесс диагностирования ведется поэтапно. На первом этапе проводится обнаружение факта возникновения вида отказа (*обнаружение вида отказа – этап диагностирования, заключающийся в установлении факта нарушения работоспособности*); на втором – поиск места вида отказа (*поиск места вида отказа – этап диагностирования, связанный с нахождением конструктивно законченной части системы – элемента, в котором произошёл вид отказа из заданного множества*); на третьем –

определяется класс вида отказа (*установление класса вида отказа – этап диагностирования, связанный с однозначным выявлением класса появившегося вида отказа из заданного множества; класс вида отказа – группа видов отказов, характеризующаяся однотипным проявлением*); на четвертом этапе устанавливается вид отказа (*определение вида отказа – этап диагностирования, связанный с однозначным выявлением конкретного физического проявления отказа*). Заключительным этапом является проверка полученной оценки функционального состояния САУ после реализации процедур диагностирования (рис. 3).

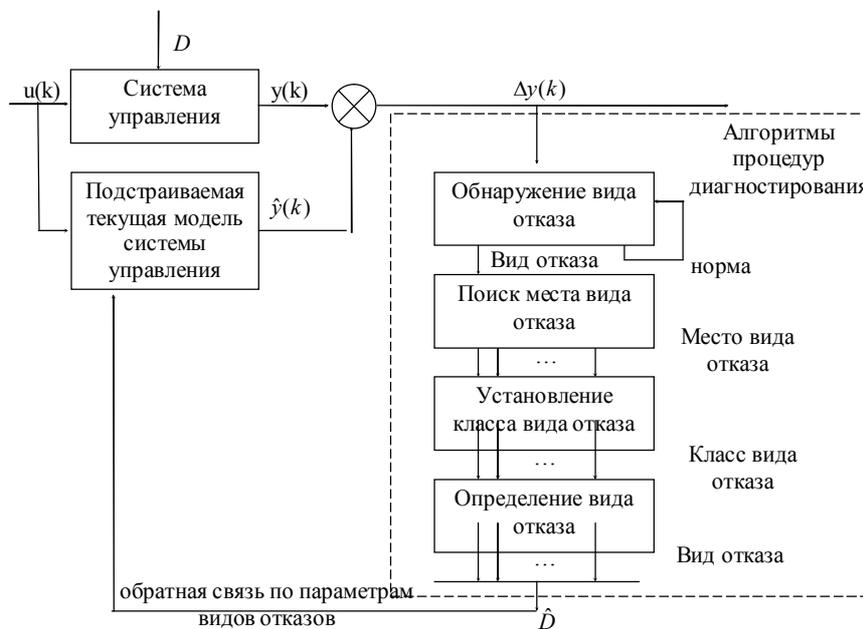


Рис. 3. Замкнутая система диагностирования

Подстраиваемая текущая модель предназначена для реализации эталонной реакции САУ на управляющее воздействие  $u(k)$  в соответствии с текущими представлениями системы диагностирования о функциональном состоянии САУ. В случае если текущее представление о функциональном состоянии САУ (вектор параметров видов отказов  $\hat{D}$ ) не соответствует реальному (вектор  $D$ ) из-за возникновения вида отказа в САУ или ошибочного диагноза, то при условии обеспечения диагностируемости САУ возникает рассогласование выходов системы

управления и подстраиваемой текущей модели –  $\Delta y(k)$ , приводящее к инициализации процедур диагностирования, которые устраняют существующую ошибку диагноза.

Для повышения достоверности диагноза и снижения времени обнаружения вида отказа (особенно в случае постепенной деградации САУ) необходимо дополнительно оценивать  $grad [\Delta y(k+1) - \Delta y(k)]$ .

Для осуществления диагностирования создаются специальные диагностические модели. *Диагностическая модель (ДМ) – формализованное описание*

объекта, необходимое для решения задач диагностирования, связывающее прямые неизмеряемые признаки объекта с косвенными измеряемыми.

В общем случае диагностическая модель имеет вид

$$\begin{cases} \Delta x(k+1) = \Psi[\tilde{x}(k), \Delta x(k), u(k), \Delta \lambda_i, v(k)]; \\ \Delta y(k) = \Theta[\tilde{x}(k), \Delta x(k), u(k), \Delta \lambda_i, \tau(k)] \end{cases} \quad (4)$$

где  $\Psi[\cdot]$  и  $\Theta[\cdot]$  – нелинейные функции, вид которых зависит от используемого метода построения модели;  $v(k)$  и  $\tau(k)$  – векторы помех и ошибок моделирования;  $\Delta x(k) = \tilde{x}(k) - \hat{x}(k)$ ,  $\hat{x}(k)$  – номинальное значение вектора состояния;  $\Delta y(k) = \tilde{y}(k) - \hat{y}(k)$ ,  $\Delta \lambda_i(k) = \tilde{\lambda}_i(k) - \hat{\lambda}_i(k)$ .

Следует отметить, что на каждом из вышеуказанных этапов используют свой тип ДМ, отражающий особенности только данной задачи. Причем данные ДМ связаны между собой в иерархическую систему.

Принципиальным вопросом при разработке диагностического обеспечения является обеспечение условий диагностируемости. Свойства объекта диагностирования и восстановления зависят как от его структуры, так и от состояний, обусловленных внешними управляющими и возмущающими воздействиями, поэтому целесообразно анализировать как структурные, так и сигнальные свойства САУ с помощью соответствующих конструктивных критериев [1].

Результаты решения основных задач диагностирования должны быть представлены в форме машинно-реализуемых алгоритмов, а весь процесс диагностирования САУ – в виде древовидной продукционной базы знаний. В узлах дерева размещаются соответствующие признаки, представляющие собой двузначные предикатные уравнения на множестве массивов дискретных значений доступных измерению сигналов системы:

$$\mu_j = S_2[\Delta y(k), V_\lambda(k), \sigma_j], \quad (5)$$

где  $V_\lambda(k)$  – функция чувствительности по диагно-

стическому параметру  $\lambda_i$ ;  $\sigma_j$  – пороговое значение выполнения соотношения под знаком предиката  $S_2[\cdot]$ .

Такие уравнения решаются на соответствующих массивах дискретных значений с использованием определенного коэффициента доверия, уменьшающего влияние дестабилизирующих факторов (помех измерения, шумов, ошибок моделирования) на качество решения. В результате решения предикатного уравнения получается значения, определяющие направление дальнейшего прохождения по дереву. Заканчивается дерево листьями, которые соответствуют возможным состояниям и заданным видам отказов САУ.

Решая задачи диагностирования и последовательно снимая неопределенности, связанные со временем возникновения, местом возникновения и величиной, устанавливают характеристики вида отказа. Восстановление работоспособности необходимо производить таким образом, чтобы свести к минимуму последствия возникновения вида отказа. Основным результатом этого этапа является решение задачи определения эффективного ресурса восстановления как оптимизационной задачи многокритериального выбора. При этом для формирования частных критериев предлагается использовать важнейшие (для данной задачи) свойства рассматриваемой системы, такие, как качество восстановления работоспособности данным ресурсом, время восстановления с помощью данного ресурса, возможность дополнительного использования данного ресурса.

Количественные значения весовых коэффициентов важности частных критериев определяются разработчиком, исходя из требований задачи и опыта эксплуатации систем рассматриваемого класса. Следует учитывать, что ресурсы обладают конечной возможностью дополнительного использования.

Множество возможных значений коэффициентов моделей восстановления определяется путем по-

строения областей устойчивости в плоскости соответствующего коэффициента и прямого признака отказа. При этом рассматривается лишь та часть кривых  $D$ -разбиения, которая отвечает за границы устойчивости. Рассмотрение отказоустойчивой САУ как системы с запаздыванием позволяет определить допустимый временной ресурс диагностирования и восстановления.

### Заключение

Разработанный адаптивный подход к обеспечению активной отказоустойчивости САУ был ис-

пользован для решения задачи обеспечения активной отказоустойчивости системы стабилизации космического летательного аппарата (КЛА). Для обеспечения отказоустойчивости использовалась интеллектуальная микропроцессорная система, реализующая разработанные алгоритмы.

Разработанное и исследованное диагностическое обеспечение для измерительных и исполнительных элементов позволяет обнаруживать и восстанавливать за счет реконфигурации алгоритмов управления более 15 видов отказов датчиков угловой скорости, двигателей-маховиков, самого КЛА [4].

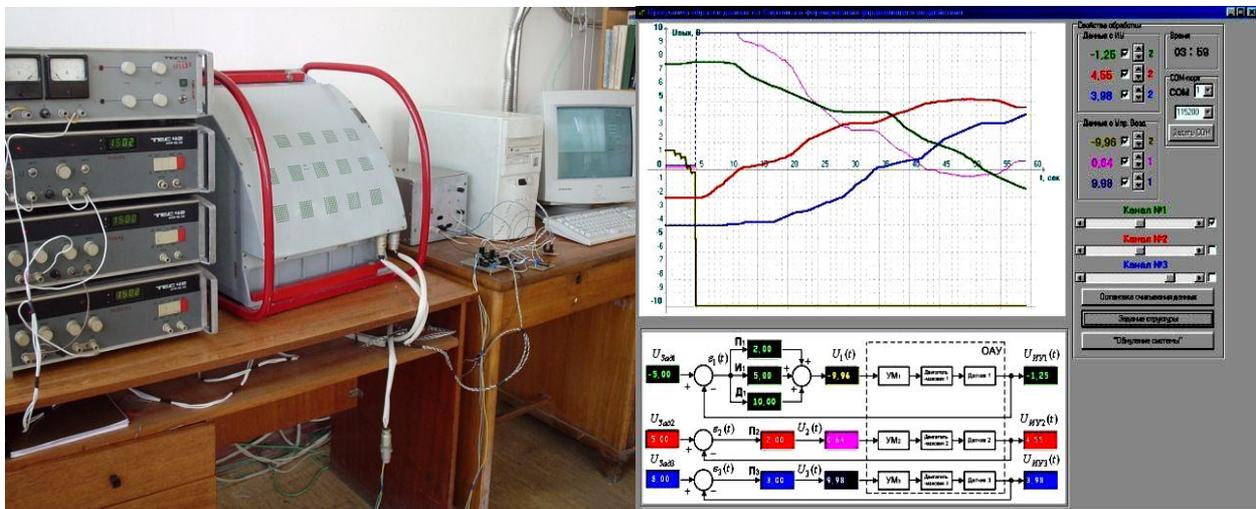


Рис. 4. Стенд исследования отказоустойчивой САУ КЛА

### Литература

1. Кулик А.С. Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления. – Х: Гос. аэрокосм. ун-т "ХАИ"; Бизнес-Информ, 2000. – 260 с.
2. Кулик А.С., Гавриленко О.И. Обеспечение отказоустойчивости систем управления статически неустойчивых динамических объектов // Успехи современной радиоэлектроники. – 2004. – № 2. – С. 52-75.
3. Gavrilenko O., Kulik A., Luchenko O. The Adaptive Approach to Active Fault Tolerance Maintenance

of Automatic Control Systems // Proceedings of IEEE EWDTW'05. – Odessa: KNURE, 2005. – P. 195-200.

4. Кулик А.С., Лученко О.А., Гавриленко О.И. Решение задачи прецизионной ориентации космического летательного аппарата // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2005. – № 2. – С. 69-78.

Поступила в редакцию 31.01.2006

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г.Ф. Кривуля, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.