

УДК 519.873: 62-50(047)

А.С. КУЛИК

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

СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ В НЕШТАТНЫХ РЕЖИМАХ

Рассмотрены особенности становления и развития в ХАИ исследований по диагностированию автоматических систем аэрокосмических объектов в нештатных режимах и по восстановлению их работоспособности. Приведены основные научные результаты. Дано определение рационального управления. Описаны результаты прикладных исследований.

диагностирование, восстановление работоспособности, системы автоматического управления, аэрокосмические объекты, диагностические модели, критерии диагностирования, сигнально-параметрический подход, рациональное управление.

Введение

Аэрокосмические объекты различного назначения на всех стадиях активного жизненного цикла подвержены целому ряду дестабилизирующих их работоспособность факторов, которые приводят к дефектам, неисправностям, отказам, сбоям и другим физическим аномалиям, порождающим многочисленные нештатные, аварийные режимы функционирования. Поэтому при создании аэрокосмической техники всегда разрабатывают и используют многочисленные информационные технологии, а также наземные и бортовые комплексы для оценки текущего технического состояния – *диагностирования* и парирования аварийных состояний – *восстановления работоспособности* летательных аппаратов.

1. Первые шаги в диагностировании

Аналитическим решением простых задач диагностирования автоматических систем управления (САУ) на кафедре «Автоматика» начали заниматься с 1970 года по инициативе В.Л. Грецова. На начальном этапе использовали первые формальные функционально-логические модели, с помощью которых описывали нештатные режимы

функционирования разомкнутых систем управления в статике при тестовых воздействиях. Под руководством В.Г. Рубанова были получены первые теоретические результаты по алгоритмизации процессов диагностирования [1, 2]. Настойчивое желание диагностировать системы в динамике привели к описанию аварийных режимов в форме линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. Поиск идей, а также инструментальных средств диагностирования динамических режимов на этом этапе успешно завершился благодаря диссертации R. Beard [3], возможность ознакомления с которой появилась после прохождения Ю.Н. Соколовым научной стажировки в Массачусетском технологическом институте. В этой сугубо теоретической работе было предложено новое использование тогда еще мало известных фильтров Д. Люенбергера, представляющих собой детерминированный вариант фильтров Р. Каллмана, для решения задачи диагностирования линеаризованного обобщенного объекта управления, содержащего сервоприводы, объект и датчики. Использование такого подхода позволило существенно продвинуться благодаря участию Ю.Н. Соколова как в понимании диагностирования в реальном масштабе времени и в принципах восстановления работоспособности

обобщенного объекта с помощью самоорганизации, так и в разработке на новой основе конструктивных алгоритмов диагностирования и восстановления. Результаты машинных экспериментов на ЭВМ «МИР-2» по моделированию процессов диагностирования и восстановления работоспособности космического летательного аппарата подтвердили эффективность разработанных инструментальных средств и получили одобрение Я.Е. Айзенберга (предприятие «Электроприбор»), а также на семинарах А.А Красовского (Военно-воздушная академия им. Н.Е. Жуковского), П.П. Пархоменко (Институт проблем управления), и опубликованы в ряде статей [4-7].

2. Новые диагностические модели

Дальнейшие практические и теоретические исследования в области диагностирования объектов и восстановления их работоспособности – *отказоустойчивости* привели к пониманию несовершенства разработанного подхода, заключающегося в существенном противоречии между требуемой в то время на практике глубиной диагностирования и возможной с помощью фильтров Люенбергера, а следовательно, и принципиальной невозможности эффективно использовать избыточные ресурсы для качественного восстановления работоспособности аэрокосмических объектов. Поиск адекватного подхода привел к необходимости разработки новой концепции диагностических моделей и на их основе – к разработке нового диагностического обеспечения с заданной глубиной. В результате проведенных исследований были разработаны новые классы диагностических моделей, отражающие связь прямых диагностических признаков с косвенными, доступными измерению. Это *диагностические функциональные модели* (ДФМ) и *диагностические логические модели*

(ДЛМ). В ДФМ используются прямые и косвенные признаки отказов в форме отклонений диагностических параметров от номинальных значений. Для формирования ДЛМ применяются признаки отказов в форме булевых переменных. Особенности ДФМ рассмотрим на примере простейших линеаризованных моделей. Наиболее общей формой аналитического описания в номинальном режиме функционирования САУ является описание в дискретном пространстве состояний

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + \xi(k); \\ x(k_0) &= x_0; \\ y(k) &= Cx(k) + v(k), \end{aligned} \quad (1)$$

где $x(k)$ – вектор состояния системы, $x(k) \in X^n$; $u(k)$ – вектор управления, $u(k) \in U^r$; $y(k)$ – вектор измеряемых переменных, $y(k) \in Y^m$; $\xi(k)$ и $v(k)$ – векторы ошибок моделирования, помех измерения; A, B и C – матрицы соответствующих размерностей, отражающие функциональные особенности САУ; k – номера дискрет, $k \in T$. В аргументах переменных для упрощения записи опущен параметр T_0 – период квантования сигналов.

При построении ДФМ используется множество возможных физических видов отказов $D = \{d_1, d_2, \dots, d_q\}$. В результате параметризации этого множества для каждой основной задачи диагностирования формируются свои прямые диагностические параметры, квазистационарные на интервале диагностирования. Для рассматриваемого общего случая вектор этих параметров $\lambda^T = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_\mu\}$, причем $\lambda_i \in \Omega_i$, $i = \overline{1, \mu}$. Тогда в общем случае линейную динамическую систему, отражающую влияние прямых диагностических параметров λ , можно описать в классе линейных конечно-разностных моделей следующим образом:

$$\tilde{x}(k+1) = A(\lambda)\tilde{x}(k) + B(\lambda)u(k) + \xi(k);$$

$$\tilde{x}(k_0) = \tilde{x}_0; \quad (2)$$

$$\tilde{y}(k) = C(\lambda)\tilde{x}(k) + D(\lambda)u(k) + F(\lambda) + v(k),$$

где $\tilde{x}(k)$ и $y(k)$ – векторы переменных, характеризующих возмущенное действие отказов движение системы; $D(\lambda)$ и $F(\lambda)$ – матрицы соответствующих размерностей, отражающих влияние прямых диагностических параметров отказов на доступный измерению выход системы.

В качестве прямых признаков отказа используем тогда $\Delta\lambda_i = \lambda_i - \lambda_{i_n}$, где λ_{i_n} – номинальное значение i -го диагностического параметра, а косвенные признаки представляют собой отклонения векторов $\tilde{y}(k)$ от вектора $\mathfrak{F}(k)$, характеризующего номинальное поведение САУ, т.е. $\Delta y(k) = \tilde{y}(k) - \mathfrak{F}(k)$.

При малых $\Delta\lambda_i \ll \Delta\lambda_i^2$ и $\Delta y(k) \ll \Delta y^2(k)$ можно проводить аналитическую линеаризацию уравнений (2) и получить в общем виде такие ДФМ для «малых» отказов:

$$\Delta x(k+1) = A\Delta x(k) + [A_i x(k) + B_i u(k)]\Delta\lambda_i + \eta(k);$$

$$\Delta x(k_0) = \tilde{x}_0; \quad (3)$$

$$\Delta y(k) = C\Delta x(k) + [C_i x(k) + D_i u(k) + F_i]\Delta\lambda_i + \mu(k),$$

названные MD – моделью. Здесь A_i, B_i, C_i, D_i и F_i – частные производные матрицы $A(\lambda), B(\lambda), C(\lambda), D(\lambda)$ и $F(\lambda)$ по параметру λ_i ; $\eta(k)$ и $\mu(k)$ – векторы ошибок и помех. Из системы уравнений (3) следует, что MD –модель описывается линейными конечно-разностными уравнениями с переменными коэффициентами, причем закон изменения коэффициентов определяется поведением вектора состояния $\mathfrak{F}(k)$ эталонной модели системы (1) и вектора управляющих воздействий $u(k)$.

В общем случае связь между признаками $\Delta y(k)$ и $\Delta\lambda_i$ можно представить с помощью уравнения

$$\Delta y(k) = \varphi_i(k)\Delta\lambda_i; i = \overline{1, \mu}, \quad (4)$$

где $\varphi_i(k)$ – функция чувствительности, соответствующая i -му признаку ДФМ по диагностическому параметру λ_i . Функция $\varphi_i(k)$ представляет собой временную дискретную функцию, и для перехода к логическим признакам вводятся различными способами ее числовые характеристики η_{ij} . Тогда для перехода от абсолютной шкалы признаков к шкале наименований появляется возможность использовать двузначное предикатное уравнение

$$Z_j = S_2(\eta_{ij} - \delta) = \begin{cases} 1, & \text{если } \eta_{ij} \geq \delta; \\ 0, & \text{если } \eta_{ij} < \delta, j = \overline{1, m}, \end{cases} \quad (5)$$

где $S_2(\bullet)$ – символ двузначного предиката; δ – пороговое значение, зависящее от точности представления и последующей обработки данных. Последовательно применяя это уравнение, получим прямоугольную булеву таблицу размером $\mu \times m$. Число строк таблицы соответствует числу прямых признаков отказа $\Delta\lambda_i$, а число столбцов – размерности вектора $\Delta y(k)$. Эта таблица представляет собой разновидность ДЛМ, названную *табличной логической моделью* – TL -моделью.

Аналогичные модели были разработаны для классов нелинейных систем с гладкими нелинейностями, а также систем с существенными нелинейностями как для «малых», так и для «больших» отказов [8].

При дальнейшем использовании ДФМ и ДЛМ для построения диагностического обеспечения САУ возникла принципиальная проблема применимости полученных уравнений. С математической точки зрения эту проблему можно было разрешить для линеаризованных ДФМ доказательством теорем о существовании и единственности решения, что можно было сделать по аналогии с результатами для линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. Для нелинейных систем с гладкими нелинейностями и с существенными нелинейностями доказательство

существования и единственности было проблематичным. С диагностической точки зрения эта проблема оказалась более общей и сложной, чем математическая, и для её разрешения потребовалось проводить многолетнее трудоёмкое самостоятельное исследование. Вначале было сформулировано принципиально новое свойство – *диагностируемость* – это свойство диагностических функциональных моделей, характеризующее возможность однозначного установления факта наличия прямого признака любого отказа из заданного множества по доступным наблюдениям, т.е. косвенным признакам в течение конечного интервала времени. Затем в результате проведенных аналитических исследований был доказан ряд теорем и получены конструктивные критерии диагностируемости. Например, для *MD*-моделей:

Критерий полной структурной диагностируемости. Для полной структурной диагностируемости в малом линейной динамической системы необходимо и достаточно, чтобы матрицы $L_i, i = \overline{1, \mu}$ были линейно независимыми во всех попарных сочетаниях

$$L_i = \begin{bmatrix} A_i & B_i & 0 \\ C_i & D_i & F_i \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Критерий полной сигнальной диагностируемости. Линейная диагностическая система, полностью структурно диагностируемая, будет полностью сигнально диагностируемой в малом тогда и только тогда, когда векторы $L_i^* v(k), i = \overline{1, \mu}$ линейно независимы во всех попарных сочетаниях.

Эти и аналогичные критерии для других моделей [9-11] позволили проводить конструктивную оценку качества построенных ДФМ и формировать условия их эффективного применения для построения диагностического обеспечения.

3. Сигнально-параметрический подход

Реализованная концепция диагностических моделей дала возможность сформировать новый, конструктивный сигнально-параметрический подход к разработке эффективного диагностического обеспечения с существенно большей глубиной оперативного и достоверного для компьютерного диагностирования систем управления аэрокосмическими объектами. Использование сигнально-параметрического подхода позволило аналитически решать такие основные задачи диагностирования, как *обнаружение отказов, поиск места их возникновения, установление класса отказа и определение его вида* [12].

Возникновение в САУ любого вида отказа $d_i \in D$ представляет собой неопределённое событие с точки зрения момента его появления, места возникновения, принадлежности к какому-то классу и конкретного вида проявления. Снятие неопределённости этого события связано с нахождением его характеристик, соответствующих задаче, на основе доступных измерению косвенных признаков системы. В качестве базовой структуры для последовательного снятия неопределённостей возникновения отказа выбрано дихотомическое дерево поиска соответствующих основным задачам признаков отказов. В узлах деревьев располагаются предикаты Z_i , использование которых позволяет перейти от временных косвенных признаков отказов к двоичным признакам отказов, что даёт возможность ставить и решать оптимизационные задачи нахождения конкретных видов отказов.

Формирование предикатов всех уровней иерархии решения основных задач диагностирования проводится с использованием ФДМ. В узлах дихотомического дерева находятся предикаты следующего вида:

$$Z_i = S_2 \{ h(\Delta y_j) \geq \delta_i \}, \quad (7)$$

здесь S_2 - символ двузначного предиката; $h(\bullet)$ - алгебраическая функция косвенного признака Δy_j , полученная из уравнения соответствующей ФДМ, путём разрешения относительно прямого признака отказа $\Delta \lambda_i$, отфильтрованного относительно сигналов ошибок и помех $\eta(k)$ и $\mu(k)$; δ_i - пороговое значение выходного сигнала диагностической модели.

Дихотомические деревья представляют собой основу для формирования компьютерной продукционной базы знаний процесса диагностирования САУ.

4. Восстановление работоспособности

Причинами аварийных, нештатных ситуаций при автоматическом управлении аэрокосмическими объектами являются всякие нарушения в работе таких основных функциональных элементов, как датчики, исполнительные органы и объект управления. Возникновение отказов в датчиках приводит к искажению или потере измерительной информации, поэтому парирование отказов в этом случае заключается в восстановлении измерений с помощью имеющихся аппаратно-программных избыточных ресурсов. При нештатном режиме исполнительных органов восстанавливается работоспособность всей системы управления посредством целевого использования избыточных исполнительных органов, параметрической и сигнальной подстроек. Поломки в объекте управления могут компенсироваться алгоритмическими средствами, реализованными в соответствующих программах бортовых вычислительных машин и обеспечивающими восстановление работоспособности всей САУ.

Возникающие в САУ отказы можно представить двумя основными классами – *компенсируемые* и *некомпенсируемые*. Для парирования компенсируемых отказов разработаны методы и

средства сигнальной и параметрической подстроек. Некомпенсируемые отказы парируются посредством реконфигурации алгоритмов управления и избыточной аппаратуры. Для таких критических режимов функционирования разработаны соответствующие методы и средства парирования. Для синтеза алгоритмов парирования не только компенсируемых, но и некомпенсируемых отказов использовался дискретный аналог второго метода А.М. Ляпунова [13], позволяющий осуществлять как структурный, так и параметрический синтез алгоритмов восстановления работоспособности САУ и обеспечивать классически необходимое условие работоспособности – устойчивость.

5. Рациональное управление

В классической парадигме автоматического управления заложено необходимое условие работоспособности САУ – *устойчивость* и достаточное условие – *качество управления*. В современной парадигме устойчивость и качество рассматриваются как необходимое условие работоспособности САУ, а достаточное – *живучесть*. Исходя из такого представления термин *отказоустойчивость* и его производные оказываются не вполне адекватными сути решаемых задач управления в нештатных ситуациях. Приведем классическое определение устойчивости: «Невозмущённое движение $x_0(t)$ » называется *устойчивым по Ляпунову*, если для любого положительного числа ε , как бы мало оно ни было, можно указать положительное число δ , такое, что из неравенства $\|\Delta x(t_0)\| < \delta$ следует при $t > t_0$ неравенство $\|\Delta x(t)\| < \varepsilon$ [14].

Но в определении ничего не говорится о причинах отклонения от невозмущённого движения. А это значит, что причинами отклонения от невозмущённого движения могут быть различные

дестабилизирующие факторы и, в частности, отказы, которые приводят к появлению $\Delta x(t_0) \gg 0$. Принятие эффективных мер по парированию отказов приводит с течением времени к выполнению условия $|\Delta x(t_0)| < \varepsilon$, следовательно, к обеспечению классической устойчивости САУ. Поэтому для отражения способности САУ оценивать своё техническое состояние, т.е. способности самодиагностироваться, а также возможности парировать отказы – самовосстанавливать свою работоспособность нужен другой термин. Наиболее близким к сути и методам решаемых задач в нештатных ситуациях, а также к уровню понимания аварийных процессов и способов локализации представляется термин *рациональное управление*. Слово *рациональный* (от лат. *rationalis* – разумный) означает разумно обоснованный, целесообразный [15]. Имеющийся исторический аэрокосмический опыт свидетельствует о том, что при анализе нештатных ситуаций обязательно восстанавливают причинно-следственные связи развития аварийных событий, а при локализации их последствий формируются на базе полученной информации процедуры восстановления работоспособности САУ. И вся эта деятельность базируется на использовании опыта, разума и здравого смысла, а результаты должны быть разумно обоснованными. Ряд этапов разработки диагностического обеспечения и восстановления работоспособности САУ на текущий момент не формализован, и задачи этих этапов решаются, как правило, эвристически. Только отдельные этапы формализованы и могут быть разрешены с помощью оптимизационных подходов. В целом общая задача диагностирования и восстановления САУ на сегодня не может быть поставлена и решена как классическая оптимизационная задача.

Поэтому термин *рациональное управление* в наибольшей степени отражает содержание общей задачи диагностирования технического состояния

САУ и восстановление ее работоспособности, а также особенностей её разрешения на формально-эвристической основе.

6. Результаты прикладных исследований

Значительный объём первых прикладных исследований по рациональному управлению был выполнен в НИИ проблем физического моделирования при разработке диагностического обеспечения САУ динамически подобных летающих моделей в условиях стендовых испытаний и предполетной подготовки. Была создана контрольно-испытательная станция, позволяющая проводить глубокое диагностирование САУ летающей модели СЛМТ-10ЛЛ самолёта Су-27 [16, 17].

В числе первых был создан стенд исследования блока гироскопических датчиков, включающий в себя датчик угла и два датчика угловой скорости. Для этого блока было разработано и испытано алгоритмическое и программное обеспечение, обеспечивающее инвариантность к типовым видам отказов [18, 19].

Другим направлением прикладных исследований были нештатные режимы исполнительных органов. Наибольших результатов удалось достичь для пневматических сервоприводов. Был создан исследовательский стенд, на котором проводилась разработка и отработка как диагностического обеспечения, так и обеспечения восстановления работоспособности [20, 21, 22].

Важным функциональным элементом САУ, потребовавшим исследовательского внимания, явился планер, поскольку повреждения планера часто являются причиной лётных происшествий. Проведенные исследования позволили разработать диагностическое обеспечение, дающее возможность в реальном масштабе времени оценивать размеры повреждений аэродинамических органов

управления и поверхностей и осуществлять автоматический выход из аварийных режимов. Было исследовано 30 сценариев для машинной модели Су-27 [23]. Исследование по диагностированию системы с неопределённой динамикой проводилось на физической модели беспилотного летательного аппарата в виде инвертированного маятника с подвижным основанием. Был изготовлен лабораторный стенд, на котором осуществлён комплекс работ, связанных с диагностированием замкнутого контура управления и восстановлением его работоспособности [24, 25].

Новым направлением в последние годы стали прикладные исследования по диагностированию и восстановлению баз данных автоматизированных систем организационного управления [26], а также исследования по рациональному управлению процессом овладения студентами профессиональных навыков для решения учебных задач [27]. Разработано несколько обучающих компьютерных программ с элементами рационального управления [28, 29, 30], которые используются в учебных дисциплинах кафедры систем управления летательными аппаратами.

Литература

1. Рубанов В.Г., Кулик А.С. Построение минимального диагностического теста для сложного технического объекта // Системы управления летательных аппаратов. – Х., 1974. – Вып. 2. – С. 132-136.
2. Рубанов В.Г., Кулик А.С. Синтез оптимального алгоритма контроля работоспособности САУ по её функционально-логической модели // Автоматика.– 1975.– № 4.– С. 9-14.
3. Beard R. Failure Accommodation in Linear System Through Self – Reorganization //Ph.D.Thesis – Massachusetts Institute of Technology, 1971.– 376 p.
4. Соколов Ю.Н., Рубанов В.Г., Кулик А.С. О диагностике непрерывных автоматических систем с помощью фильтра обнаружения // Автоматика.– 1976.– № 4.– С.3-8.
5. Кулик А.С. Алгоритм управления резервом при отказах приборного оборудования в системах // Радиоэлектроника летательных аппаратов.– Х., 1976. – Вып. 8.– С. 106-111.
6. Кулик А.С. , Рубанов В.Г., Соколов Ю.Н. Синтез систем, приспособляющихся к изменениям параметров элементов и их отказам // Автоматика и телемеханика. – 1978. – № 1. – С. 96-107.
7. Кулик А.С., Рубанов В.Г. Формально-логическая модель синтеза систем, приспособляющихся к неисправностям // Адаптивные системы автоматического управления. – К.: Техника. – 1978.–Вып. 6. – С. 97-101.
8. Кулик А.С. , Сироджа И.Б., Шевченко А.Н. Построение диагностических моделей при разработке диагностического обеспечения динамических систем. Ч. 1. – Х., 1989. –56 с., Ч. II. – Х., 1990. – 61 с. (Препр. / АН УССР. Институт проблем машиностроения, № 302, 312).
9. Кулик А.С. Диагностируемость непрерывных систем // Автоматика и телемеханика. – 1987. – № 6. – С. 148-155.
10. Кулик А.С. Диагностируемость линейных динамических систем // Доклады АН УССР, серия А. – 1990. – № 11. – С. 68-71.
11. Кулик А.С. Оценка диагностируемости линейных систем // Автоматика и телемеханика. – 1992. – № 1. – С. 185-187.
12. Кулик А.С. Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления. – Х.: Гос. аэрокосм. ун-т, «ХАИ»; Бизнес-Информ, 2000. –260 с.
13. Кулик А.С. Обеспечение отказоустойчивости систем управления. – Х.: ХАИ, 1991. – 90 с.

14. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Краковского. – М.: Наука, 1987. –712 с.
15. Словарь иностранных слов. – 13-е изд., стереотипное. – М.: Русский язык, 1986 – 608 с.
16. Черановский О.Р., Кулик А.С., Садовничий С.Н. Автоматизация диагностирования систем управления летающих моделей при стендовых испытаниях. – Х: Харьк. авиац. ин-т, «ХАИ», 1990. –84 с.
17. Алгоритмические и программные средства диагностирования систем управления летательных аппаратов / О.Р. Черановский, А.С. Кулик и др. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, «ХАИ», 1992. –95 с.
18. Разинькова Н.П. Обеспечение отказоустойчивости гироскопических измерителей угловых положений беспилотных самолётов: Дис. ... канд. техн. наук. – Х.: ХАИ, 1998. – 164 с.
19. Кулик А.С., Козий А.П., Отрадна Н.П. Стендовое компьютерное диагностирование блока гироскопических датчиков. – Х.: ХАИ, 1995. – 63 с.
20. Кулик А.С., Козий А.П., Отрадна Н.П. Стендовое компьютерное диагностирование пневматических сервоприводов. –Х.: ХАИ, 1995. – 90 с.
21. Кулик А.С., Пищухина О.А., Фирсов С.Н. Отказоустойчивое управление пневматическим сервоприводом. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2004. – 126 с.
22. Фирсов С.Н. Обеспечение активной отказоустойчивости пневматического сервопривода беспилотного летательного аппарата: Дис. ... канд. техн. наук. –Х.: ХАИ, 2004. – 223 с.
23. Кулик А.С. Отказоустойчивое управление: состояние и перспективы // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2000. – Вып. 15. – С.18-31.
24. Кулик А.С., Гавриленко О.И. Обеспечение отказоустойчивости линеаризуемых систем автоматического управления. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2003. – 94 с.
25. Кулик А.С., Гавриленко О.И. Обеспечение отказоустойчивости систем управления статически неустойчивыми динамическими объектами // Успехи современной радиоэлектроники. – 2004. – № 2. – С. 32-75.
26. Чухрай А.Г. Методы и средства повышения качества данных в автоматизированных системах организационного управления : Дис. ... канд. техн. наук. -Х.: ХАИ, 2003. – 173 с.
27. Kulik A., Chukhray A., Chukhray M. Diagnostic models of intelligent tutor system for teaching skills to solve algebraic equations // International Journal of Emerging Technologies in Learning.– 2007. –Vol. 2. – № 1, [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.i-jet.org>.
28. Информационно-аналитические модели управления техническими высшими учебными заведениями / А.Н. Гуржий, В.С. Кривцов, А.С. Кулик и др. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2004. – 387 с.
29. Навчаюча комп'ютерна програма «Побудова часових характеристик замкненої системи автоматизованого керування за задаючим впливом»: А.с./ Кулік А.С., Чухрай А.Г., Корелова Т.А., Гайтан О.М., Лемківський В.А. – №18580. – Зареєстр. 10.11.2006.
30. Навчаюча комп'ютерна програма «Знаходження рішень характеристичного рівняння методом Лобачевського-Греффе-Денделена»: А.с./ Чухрай А.Г., Кулік А.С., Шевченко М.О., Плоткін С.В. – №17273. – Зареєстр. 17.07.2006.

Поступила в редакцію 21.02.2007

Рецензент: лауреат Государственной премии Украины, д-р техн. наук, проф. Н.Д. Кошевой, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.