

УДК 621.397.6

**В.Ф. СИМОНОВ, Е.А. БОЙКО, Д.В. ГАРМАШ**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## **ПОВЫШЕНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ РЕНТГЕНОСКОПИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ RAPISCAN MVXR5000**

*На базе анализа литературных источников рассмотрены различные досмотровые установки. Описано понятие отказоустойчивости. Рассмотрена и решена проблема хранения изображений на жестком диске досмотровой установки Rapiscan MVXR5000, при заполнении которого вся последующая информация не сохраняется, этим самым приводя к сбою системы. Написана программа, с помощью которой оператор может постоянно видеть состояние заполнения диска. На основе метода холодного резервирования в систему введены делитель напряжения, два ключа и блок обнаружения отказов. Данные средства существенно повышают отказоустойчивость рентгеноскопической установки Rapiscan MVXR5000.*

**Ключевые слова:** рентгеноскопическая установка, интроскоп, отказоустойчивость, переполнение, архив, хранение изображений.

### **Введение**

Безопасность в аэропортах, государственных и общественных учреждениях, исправительных заведениях, почтовых отделениях, воинских частях, морских портах и пограничных контрольно-пропускных пунктах имеет большое значение. В 1978 году в СССР возникла проблема, связанная с обеспечением безопасности, когда в рамках подготовки к Московской Олимпиаде было обнаружено, что аэропорты страны, которые должны были принимать гостей и участников Олимпиады, не оборудованы средствами защиты от террористических и других вандальных актов [1]. Поэтому таможенные органы страны начали оснащаться досмотровыми рентгеноаппаратами в конце 70-х годов. Промышленность СССР не выпускала рентгеновскую технику, способную с высоким качеством, достаточной производительностью, обеспечением требуемой культуры и гарантированной безопасностью обеспечивать таможенный контроль перемещаемых через госграницу объектов. В связи с этим руководством ГТУ МВТ и впоследствии ГУГТК СССР было принято решение о приобретении её за рубежом. Уже в то время на западном рынке были представлены образцы флюороскопов, удовлетворяющие по многим параметрам требования организации и технологии таможенного контроля. Оптимальным в тот период было решение о закупке досмотровых рентгеноаппаратов у Венгерской республики. Производственный кооператив "Тракис" в то время освоил серийный выпуск настольных флюороскопов прямого наблюдения типа "ВХ-150-І", их модернизиро-

ванной модели "ВХ-150-ІІ" и стационарных флюороскопов со светозащитной кабиной типа "ВХ-150-31", которыми и оснащались таможенные службы. Модель "ВХ-150-ІІ" являлась наиболее распространённой, лишённой многих недостатков первой модели и на её основе проводилась разработка флюороскопа отечественного образца [2]. За относительно короткое время по техническому заданию службы безопасности гражданской авиации отечественной компанией была проведена конструктивная разработка и обеспечен промышленный выпуск рентгенотелевизионных интроскопов "Луч-1", в которых формирование рентгеновского изображения содержимого досматриваемых объектов, установленных на транспортёре, производилось с помощью синхронного вращения рентгеновских генераторов и приемников. Установка этих рентгенотелевизионных интроскопов в олимпийских аэропортах позволила обеспечить безопасный прием, а затем и отправку зарубежных участников и гостей Олимпиады-80. После проведения Олимпиады работы по совершенствованию и разработке технических средств досмотровой техники продолжились. Была поставлена задача: досматривать не только проносимые личные вещи, но и багаж, и владельцы этих предметов. Учитывая широту и разнообразие средств, используемых для осуществления террористических и контрабандных акций, появилась необходимость обнаружения наряду со штатным огнестрельным и холодным оружием типа пистолетов, револьверов, толовых шашек, штык-ножей, финок и взрывчатых закладок, стреляющих ручек, различных заточек и других всевозможных стреляющих,

колющих, режущих и взрывающихся предметов [3]. В наше время многие страны производят подобные установки. В Украине с 1993 года в НТ СКБ "Полисвет" выполняется комплекс работ по проектированию, изготовлению и монтажу рентгеноинтроскопических систем досмотра "Полискан" [4]. Достаточно известными на мировом рынке являются такие фирмы, как: ФГУП НПП "Дельта" (Россия), "Хайман" (ФРГ), "Курт Миттерфельнер" (ФРГ), "Джи энд Джи Астрофизикс" (США), "Меторекс" (Финляндия), "Гаррет" (США), "ЧИА" (Италия), НИЦ "Охрана", СНПО "Элерон", "Гротек", НИИИИ МНПО "Спектр" (Россия).

Одним из мировых лидеров производства досмотровых установок является компания Rapiscan Systems (Англия). С 1993 года компания установила более 70000 своих изделий более чем в 100 странах мира. Компания выпускает различную продукцию от систем досмотра багажа и посылок и металлодетекторов до автоматизированных систем обнаружения взрывчатых веществ, установок сканирования воздушных грузов и систем досмотра контейнеров.

Rapiscan MVXR5000 (рис. 1) – последняя разработка из постоянно расширяющейся линейки оборудования досмотра багажа пассажиров (именно эту систему используют в Харьковском аэропорту).



Рис. 1. Рентгеноскопическая установка Rapiscan MVXR5000

Многопроекционная двухэнергетическая рентгеновская установка, в которой используются усовершенствованные алгоритмы обнаружения взрывчатых веществ, обладает очень высокой вероятностью обнаружения, обеспечивает хорошее качество изображения и имеет крайне низкий уровень ложных тревог. Стопроцентный досмотр багажа осуществляется благодаря высокой пропускной способности (до 1800 предметов в час) и возможности автоматического обнаружения взрывчатых веществ. Система обладает возможностью передавать гигабайты данных, что позволяет группе объединенных в сеть удаленных операторов анализировать содержимое подозрительного багажа (уровень 2) почти в режиме реального времени. Анализ, выполняемый удаленными операторами, облегчается за счет идентификации потенциально опасных предметов с помощью алгоритмов обнаружения. Затем изображения могут быть переданы на пункты ручного дос-

мотра (уровень 3) для облегчения поиска опасных предметов или на компьютер главного администратора для проведения дополнительного анализа [5].

## Постановка задачи исследования

Обращение к вопросам отказоустойчивых систем не является случайным, и в последние годы данная проблема становится все более актуальной. Это связано с рядом причин. К числу основных можно отнести:

- 1) большие технико-экономические затраты, связанные с эксплуатацией ненадежных объектов;
- 2) экономические, социальные, экологические и политические потери при авариях ответственных систем управления ядерными реакторами, аэрокосмическими аппаратами, транспортными средствами, комплексами производства и другими объектами;
- 3) потребность в высоком профессиональном уровне обслуживающего отказавшую технику персонала;
- 4) существенное усложнение функций и высокие требования к качеству их выполнения для систем управления ответственными, крупномасштабными объектами [6].

На всех этапах жизненного цикла автоматических и автоматизированных систем управления (СУ) – при разработке, производстве и эксплуатации – наблюдается существенное влияние на их работоспособность различных отказов. Работоспособностью системы управления называется такое её состояние, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют нормативно-технической документации. Тогда отказ – это событие, заключающееся в нарушении работоспособности системы. Основной причиной отказов являются различные физические дефекты и неисправности в элементах, компонентах, устройствах систем, обусловленные низкой надежностью, неправильной эксплуатацией и рядом других дестабилизирующих факторов [6, 7].

Для рентгеноскопических установок Rapiscan MVXR5000 отказоустойчивость имеет большое значение, поскольку при некоторых отказах система может оказаться не работоспособной. Это приведет к задержке регистрации пассажиров и задержке рейса. Соответственно авиакомпания должна заплатить неустойку. Но более опасной является ситуация, при которой досмотровая техника не может определить запрещенные предметы. Это приведет к перевозу контрабанды, а также террористическим актам, как в аэропорту, так и на борту самолета.

Целью данной статьи является разработка методов повышения отказоустойчивости рентгеноскопических установок.

## Решение проблемы

Повышению отказоустойчивости систем управления посвящен ряд работ [5 – 14]. На рис. 2 представлена функциональная схема подсистемы управления анодным напряжением рентгеноскопической установки Rapiscan MVXR5000.

Передаточная функция фильтра имеет вид

$$W_{\Phi}(s) = \frac{U_{\Phi}(s)}{U_{\text{шим}}(s)} = \frac{1}{L_1 C_1 s^2 + R_1 C_1 s + 1} = \frac{1}{T^2 s^2 + 2\xi T s + 1}, \quad (1)$$

где  $U_{\Phi}$  – напряжение фильтра;  $U_{\text{шим}}$  – напряжение, поступающее на фильтр.

Передаточная функция инвертора имеет вид

$$W_{\text{ин}}(s) = \frac{U_{\text{и}}(s)}{U_{\Phi}(s)} = k_{\text{ин}} = 1, \quad (2)$$

где  $U_{\text{ин}}$  – напряжение инвертора.

Передаточная функция трансформатора имеет вид:

$$W_{\text{тр}}(s) = \frac{U_{\text{тр}}(s)}{U_{\text{ин}}(s)} = \frac{k_{\text{тр}}}{T_{\text{тр}} s + 1} = \frac{15}{s + 1}, \quad (3)$$

где  $U_{\text{тр}}$  – напряжение трансформатора.

Объектом управления (ОУ) в данной системе является умножитель напряжения и рентгеновская трубка. Передаточная функция ОУ имеет вид:

$$W_{\text{оу}}(s) = \frac{U_{\text{а}}(s)}{U_{\text{тр}}(s)} = k_{\text{оу}} = \frac{150000}{150} = 1000, \quad (4)$$

где  $U_{\text{а}}$  – анодное напряжение РТ.

Передаточная функция замкнутой системы с регулятором по задающему воздействию:

$$\Phi(s) = \frac{U_{\text{а}}(s)}{U_{\text{зад}}(s)} = \frac{W(s)}{1 + W_{\text{дн}}(s) \cdot W(s)} = \frac{33597s^2 + 27945s + 8302,5}{s^4 + 2s^3 + 5,359s^2 + 3,795s + 0,83}. \quad (5)$$

Передаточная функция замкнутой системы по возмущающему воздействию:

$$\Phi_f(s) = \frac{U_{\text{а}}(s)}{U_{\text{ф}}(s)} = \frac{15000(s^2 + s + 1)}{(s^2 + s + 1)(s + 1) + 1,5}. \quad (6)$$

Существуют такие подходы к созданию отказоустойчивых систем: структурный, алгоритмический, системный, сигнально-параметрический.

Структурный подход является достаточно простым, поскольку в его основе лежит принцип структурной избыточности.

Исходную систему, которая состоит только из функционально-необходимых элементов и связей, дополняют новыми элементами и связями, т.е. избыточной структурой. Введение структурной избыточности производится таким образом, чтобы при появлении отказов из множества заданных, работоспособность системы не изменялась. Характерной особенностью структурно-избыточных СУ является отсутствие диагностирования, т.е. обнаружения отказов, поиска их места, определение класса и вида. Игнорирование процедур диагностирования приводит к использованию для восстановления работоспособности СУ не изменяющихся при появлении отказов алгоритмов управления. Известно несколько способов введения избыточности. Ряд способов заключается в использовании постоянного (статического) резервирования функциональных элементов [7 – 14].

Традиционные математические модели систем отражают особенности их номинального режима функционирования. Диагностические модели (ДМ) представляют собой специфические математические модели СУ. Данные модели описывают существенные свойства аварийных режимов, вызванных различными отказами. Диагностирование СУ состоит из решения ряда взаимосвязанных основных задач.

Форма диагностической модели существенно зависит от класса системы управления и характера отказа. При построении диагностических моделей для каждой основной задачи устанавливаются, исходя из особенностей СУ и множества D, прямые и косвенные диагностические параметры, на основании которых формируют как количественные, так и качественные прямые и косвенные признаки отказов.

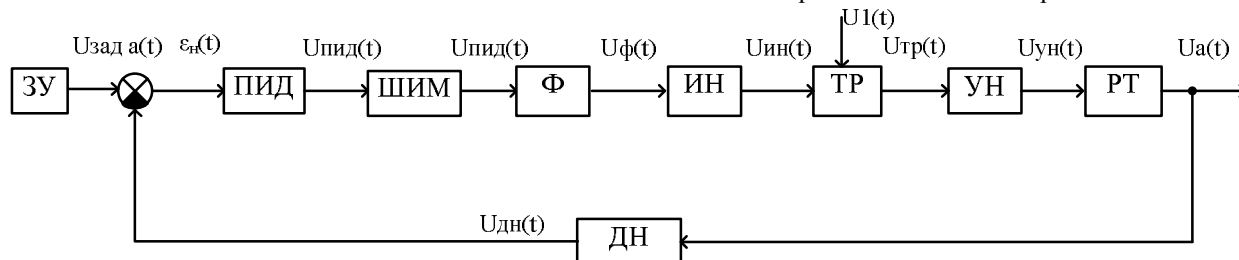


Рис. 2. Функциональная схема системы управления установкой Rapiscan MVXR5000: ЗУ – задающее устройство; ПИД – регулятор; ШИМ – широтно-импульсный модулятор; Ф – фильтр; ИН – инвертор; ТР – трансформатор; УН – умножитель напряжения; РТ – рентгеновская трубка; ДН – датчик напряжения

Диагностическими моделями объекта называются математические модели, связывающие косвенные признаки отказов с прямыми [9].

В целях построения ДМ для определения вида отказа рассматривается такой функциональный элемент, как ДН.

Подмножество видов отказов состоит из

$$D_{дн} = \{d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_q\},$$

где  $d_i$  –  $i$ -й физический отказ.

Для ДН в качестве элементов множества  $D_{дн}$  выступают:

- $d_1$  – обрыв питающего провода,
- $d_2$  – обрыв заземляющего провода,
- $d_3$  – короткое замыкание,
- $d_4$  – механическое повреждение,
- $d_5$  – полный износ компонента,
- $d_6$  – необратимые процессы в деталях и материалах,
- $d_7$  – неопределенный отказ.

В результате исследования СУ для этого множества видов отказов устанавливаются для каждой основной задачи диагностирования свои прямые диагностические параметры. Для рассматриваемого общего случая вектор этих параметров  $\lambda^T = [\lambda_1, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_\mu]$  и для каждого параметра  $\lambda_i$  известно множество его возможных значений  $\lambda_i \in \Omega_i$ . Тогда в общем случае линейную динамическую систему, отражающую влияние прямых диагностических параметров  $\lambda$ , можно описать в классе линейных конечно-разностных моделей следующим образом:

$$\begin{aligned} \tilde{x}(k+1) &= A(\lambda) \tilde{x}(k) + B(\lambda) u(k) + \xi(k); \\ \tilde{x}(k_0) &= \tilde{x}_0; \end{aligned} \quad (7)$$

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

где  $\tilde{x}(k)$  и  $\tilde{y}(k)$  – векторы переменных, характеризующие возмущенное действие отказов движения системы;  $D(\lambda)$  и  $F(\lambda)$  – матрицы соответствующих размерностей, отражающие влияние параметризованных свойств отказов на выход системы.

Для заданной системы управления множество параметров классов имеет вид:

$$\begin{aligned} \lambda_{су}^T &= \\ &= [\lambda_p, \lambda_{шим}, \lambda_{ис}, \lambda_{инв}, \lambda_{тр}, \lambda_{ун}, \lambda_{рт}, \lambda_{дн}]. \end{aligned} \quad (8)$$

Для использования метод аналитической линеаризации необходимо рассмотреть уравнения возмущенного движения СУ при отсутствии ошибок и помех. При практическом использовании полученных для точных измерений диагностических моделей необходимо учитывать размытость их сигналов с по-

мощью аддитивных векторов с соответствующими реальным условиям диапазонами изменений.

Возмущенное движение СУ описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \tilde{x}(k+1) &= A(\lambda) \tilde{x}(k) + B(\lambda) u(k); \quad \tilde{x}(k_0) = \tilde{x}_0; \\ \tilde{y}(k) &= C(\lambda) \tilde{x}(k) + D(\lambda) u(k) + F(\lambda). \end{aligned} \quad (9)$$

Уравнения выхода системы имеют вид:

$$\begin{aligned} U_a(s) &= \frac{k_i \cdot k_{ин} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу}}{T^2 \cdot T_{тр}} \cdot s^{-4} \cdot U_{аз}(s) + U_{азад}(s) \times \\ &\times \frac{k_p \cdot k_{ин} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу}}{T^2 \cdot T_{тр}} \cdot s^{-3} + \frac{k_d \cdot k_{ин} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу}}{T^2 \cdot T_{тр}} \times \\ &\times s^{-2} \cdot U_{азад}(s) - \frac{T^2 + 2\xi \cdot T_{тр} \cdot T}{T^2 \cdot T_{тр}} s^{-1} U_a(s) - \\ &- \frac{2\xi T + T_{тр} + k_d \cdot k_{ин} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу} \cdot k_{дн}}{T^2 \cdot T_{тр}} s^{-2} U_a(s) - \\ &- \frac{1 + k_p \cdot k_{ин} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу} \cdot k_{дн}}{T^2 \cdot T_{тр}} \cdot s^{-3} \cdot U_a(s) - \\ &- \frac{k_i \cdot k_{ин} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу} \cdot k_{дн}}{T^2 \cdot T_{тр}} \cdot s^{-4} U_a(s). \end{aligned} \quad (10)$$

Структурная схема системы управления представлена на рис. 3.

Уравнения состояния имеют вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = -\frac{T^2 + 2\xi \cdot T_{тр} \cdot T}{T^2 \cdot T_{тр}} \cdot x_1(t) + x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) = -\frac{2\xi T + T_{тр} + k_d \cdot k_{ин} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу} \cdot k_{дн}}{T^2 \cdot T_{тр}} \cdot x_1(t) + x_3(t) + \\ + \frac{k_d \cdot k_{инв} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу}}{T^2 \cdot T_{тр}} \cdot U_{азад}(t), \\ \dot{x}_3(t) = -\frac{1 + k_p \cdot k_{ин} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу} \cdot k_{дн}}{T^2 \cdot T_{тр}} \cdot x_1(t) + \\ + x_4(t) + \frac{k_p \cdot k_{ин} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу}}{T^2 \cdot T_{тр}} \cdot U_{азад}(t), \\ \dot{x}_4(t) = -\frac{k_i \cdot k_{ин} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу} \cdot k_{дн}}{T^2 \cdot T_{тр}} \cdot x_2(t) + \\ + \frac{k_i \cdot k_{ин} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу}}{T^2 \cdot T_{тр}} \cdot U_{азад}(t). \end{cases} \quad (11)$$

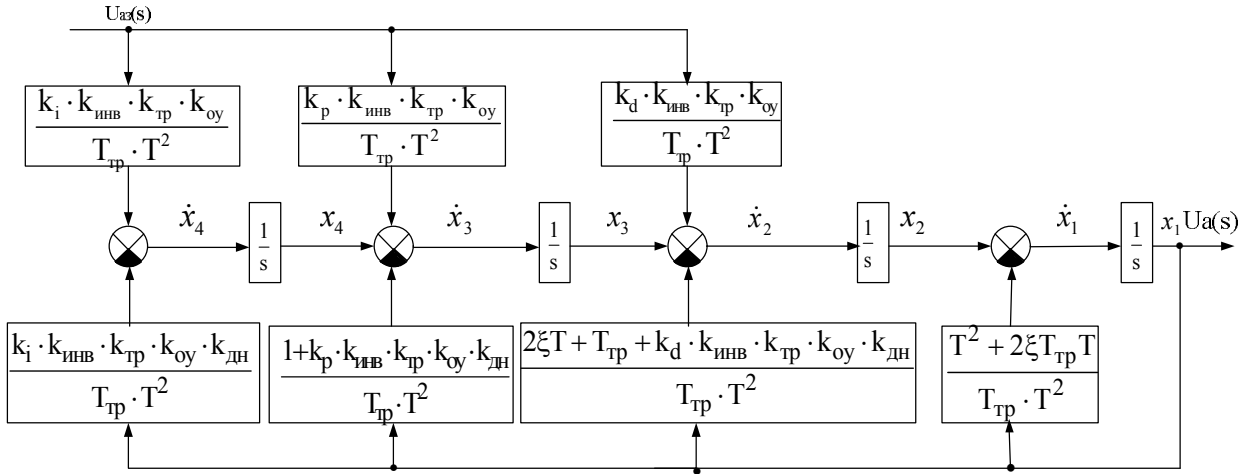


Рис. 3. Структурная схема системы управления

Собственная (динамическая) матрица, матрицы входа и выхода (измерительная) имеют вид:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{T^2 + 2\xi \cdot T_{тр} \cdot T}{T^2 \cdot T_{тр}} & 1 & 0 & 0 \\ \frac{2\xi T + T_{тр} + k_d \cdot k_{инв} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу} \cdot k_{дн}}{T^2 \cdot T_{тр}} & 0 & 1 & 0 \\ \frac{1 + k_p \cdot k_{инв} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу} \cdot k_{дн}}{T^2 \cdot T_{тр}} & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_i \cdot k_{инв} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу} \cdot k_{дн}}{T^2 \cdot T_{тр}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_d \cdot k_{инв} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу}}{T^2 \cdot T_{тр}} \\ \frac{k_p \cdot k_{инв} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу}}{T^2 \cdot T_{тр}} \\ \frac{k_i \cdot k_{инв} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу}}{T^2 \cdot T_{тр}} \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Уравнение возмущенного движения системы таково:

$$\begin{aligned} \tilde{x}(k+1) &= [A + \Delta A(\Delta\lambda_i)]\tilde{x}(k) + [B + \Delta B(\Delta\lambda_i)]u(k); \\ \tilde{x}(k_0) &= \tilde{x}_0; \\ \tilde{y}(k) &= [C + \Delta C(\Delta\lambda_i)]\tilde{x}(k) + [D + \Delta D(\Delta\lambda_i)]u(k) + F + \Delta F(\Delta\lambda_i). \end{aligned} \quad (13)$$

Матрицы чувствительности имеют вид:

$$A_{k_{дн}} = \frac{\partial A}{\partial k_{дн}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_d \cdot k_{инв} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу}}{T^2 \cdot T_{тр}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_p \cdot k_{инв} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу}}{T^2 \cdot T_{тр}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_i \cdot k_{инв} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу}}{T^2 \cdot T_{тр}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_{k_{дн}} = \frac{\partial B}{\partial k_{дн}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$C_{k_{дн}} = \frac{\partial C}{\partial k_{дн}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Для описания номинального поведения объекта диагностирования применяется эталонная модель.

Для получения новой  $\Delta A$  матрицы из матрицы (12) вычитается матрица (14).

Очевидно, что динамика ВД-модели определяется собственными числами матрицы А и описывается уравнениями:

$$\Delta A = \begin{bmatrix} \frac{T^2 + 2\xi \cdot T_{\text{ТР}} \cdot T}{T^2 \cdot T_{\text{ТР}}} \\ \frac{2\xi T + T_{\text{ТР}} + k_d \cdot k_{\text{ин}} \cdot k_{\text{ТР}} \cdot k_{\text{оу}} \cdot (k_{\text{дн}} - 1)}{T^2 \cdot T_{\text{ТР}}} \\ \frac{1 + k_p \cdot k_{\text{ин}} \cdot k_{\text{ТР}} \cdot k_{\text{оу}} \cdot (k_{\text{дн}} - 1)}{T^2 \cdot T_{\text{ТР}}} \\ \frac{k_i \cdot k_{\text{ин}} \cdot k_{\text{ТР}} \cdot k_{\text{оу}} \cdot (k_{\text{дн}} - 1)}{T^2 \cdot T_{\text{ТР}}} \end{bmatrix},$$

$$\Delta B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_d \cdot k_{\text{ин}} \cdot k_{\text{ТР}} \cdot k_{\text{оу}}}{T^2 \cdot T_{\text{ТР}}} \\ \frac{k_p \cdot k_{\text{ин}} \cdot k_{\text{ТР}} \cdot k_{\text{оу}}}{T^2 \cdot T_{\text{ТР}}} \\ \frac{k_i \cdot k_{\text{ин}} \cdot k_{\text{ТР}} \cdot k_{\text{оу}}}{T^2 \cdot T_{\text{ТР}}} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$\Delta C = [1 \ 0 \ 0 \ 0].$$

$$\Delta y(k) = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} \Delta x_1(k) & \Delta x_2(k) & \Delta x_3(k) & \Delta x_4(k) \end{bmatrix} \times \Delta x(k) + [1 \ 0 \ 0 \ 0] \times (\Delta k_{\text{дн}}) \times \begin{bmatrix} \tilde{x}_1(k) & \tilde{x}_2(k) & \tilde{x}_3(k) & \tilde{x}_4(k) \end{bmatrix}.$$

Новая модель имеет вид:

$$\Delta y(k) = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} \Delta x_1(k) & \Delta x_2(k) & \Delta x_3(k) \end{bmatrix} + [0 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \tilde{x}_1(k) & \tilde{x}_2(k) & \tilde{x}_3(k) \end{bmatrix} \Delta k_{\text{дн}}. \quad (17)$$

Новая модель соответствует МД-модели. Следовательно, ВД-модель является более общей по отношению к МД-модели.

Следует отметить, что при линейной зависимости коэффициентов матриц А(λ), В(λ), С(λ), D(λ) и F(λ) от прямых диагностических параметров отказа λ<sub>i</sub> МД- и ВД-модели совпадают.

Диагностируемость – это свойство СУ, характеризующее возможность однозначного установления в ней факта наличия соответствующего прямого признака любого отказа из заданного множества по доступным наблюдениям, косвенным признакам в течение конечного интервала времени [9].

Динамическая система называется диагностируемой относительно заданного множества прямых признаков отказов

$$\Lambda = \{\Delta\lambda_1, \dots, \Delta\lambda_i, \dots, \Delta\lambda_\mu\},$$

если факт наличия каждого из них может быть однозначно установлен по доступным измерению косвенным признакам

$$\Delta y^T(k) = [\Delta y_1(k), \dots, \Delta y_i(k), \dots, \Delta y_m(k)]$$

на конечном интервале времени.

В рамках решения первой комплексной задачи исследования требуется формирование таких диагностических моделей, которые бы обеспечили успешное определение всех характеристик отказа в целях установления истинной причины аварийного состояния СУ.

Для оценки диагностируемости системы требуется сформировать все попарные сочетания косвенных признаков системы Δy<sub>i</sub>(k), i = 1, μ и далее в каждом попарном сочетании выявлять эквивалентные признаки.

Для определения диагностируемости системы воспользуемся теоремой и следствием данной теоремы профессора А.С. Кулика [9].

**Теорема.** Линейная динамическая система полностью диагностируема в малом тогда и только тогда, когда характеристические векторы

$$\psi_i(k), \quad i = \overline{1, \mu}$$

линейно независимы во всех попарных сочетаниях. Характеристический вектор описывается выражением:

$$\psi_i(k) = \begin{bmatrix} A_i & B_i & 0 \\ C_i & D_i & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Для использованной системы характеристический вектор имеет вид:

$$\psi_{\text{дн}}(k) = \begin{bmatrix} A_{\text{дн}} & B_{\text{дн}} & 0 \\ C_{\text{дн}} & D_{\text{дн}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Для оценки диагностируемости линейной динамической системы в малом, т.е. вблизи окрестности точки

$$k_{\text{днн}}, \quad i = \overline{1, \mu},$$

требуется сформировать векторы ψ<sub>i</sub>(k) для каждого признака отказа Δλ<sub>i</sub>

Для получения матриц структурной диагностируемости по некоторым элементам рассматриваются матрицы чувствительности данных элементов.

Характеристический вектор отражает как структурные, так и сигнальные свойства системы при  $i$ -м признаке отказа.

Для раздельного анализа этих свойств представим вектор  $\psi_i(k)$  в виде произведения составной матрицы

$$L_i = \begin{bmatrix} A_i & B_i & 0 \\ C_i & D_i & F_i \end{bmatrix}$$

и составного вектора

$$v^T = [x(k) \quad u(k) \quad 1].$$

Матрицы чувствительности имеют вид:

$$A_{k_{ин}} = \frac{\partial A}{\partial k_{ин}} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{k_d \cdot k_{тр} \cdot k_{оу} \cdot k_{дн}}{\Gamma^2 \cdot \Gamma_{тр}} \\ -\frac{k_p \cdot k_{тр} \cdot k_{оу} \cdot k_{дн}}{\Gamma^2 \cdot \Gamma_{тр}} \\ -\frac{k_i \cdot k_{тр} \cdot k_{оу} \cdot k_{дн}}{\Gamma^2 \cdot \Gamma_{тр}} \end{bmatrix},$$

$$B_{k_{ин}} = \frac{\partial B}{\partial k_{ин}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_d \cdot k_{тр} \cdot k_{оу}}{\Gamma^2 \cdot \Gamma_{тр}} \\ \frac{k_p \cdot k_{тр} \cdot k_{оу}}{\Gamma^2 \cdot \Gamma_{тр}} \\ \frac{k_i \cdot k_{тр} \cdot k_{оу}}{\Gamma^2 \cdot \Gamma_{тр}} \end{bmatrix},$$

$$C_{k_{ин}} = \frac{\partial C}{\partial k_{ин}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

$$A_{\tau_{тр}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\Gamma_{тр}^2} \\ \frac{2\xi\Gamma + k_d \cdot k_{ин} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу} \cdot k_{дн}}{\Gamma^2 \cdot \Gamma_{тр}^2} \\ \frac{1 + k_p \cdot k_{ин} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу} \cdot k_{дн}}{\Gamma^2 \cdot \Gamma_{тр}^2} \\ \frac{k_i \cdot k_{ин} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу} \cdot k_{дн}}{\Gamma^2 \cdot \Gamma_{тр}^2} \end{bmatrix},$$

$$B_{\tau_{тр}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_d \cdot k_{ин} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу}}{\Gamma^2 \cdot \Gamma_{тр}^2} \\ -\frac{k_p \cdot k_{ин} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу}}{\Gamma^2 \cdot \Gamma_{тр}^2} \\ -\frac{k_i \cdot k_{ин} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу}}{\Gamma^2 \cdot \Gamma_{тр}^2} \end{bmatrix},$$

$$C_{\tau_{тр}} = \frac{\partial C}{\partial \tau_{тр}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

$$A_{k_{тр}} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{k_d \cdot k_{ин} \cdot k_{оу} \cdot k_{дн}}{\Gamma^2 \cdot \Gamma_{тр}} \\ -\frac{k_p \cdot k_{ин} \cdot k_{оу} \cdot k_{дн}}{\Gamma^2 \cdot \Gamma_{тр}} \\ -\frac{k_i \cdot k_{ин} \cdot k_{оу} \cdot k_{дн}}{\Gamma^2 \cdot \Gamma_{тр}} \end{bmatrix},$$

$$B_{k_{тр}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_d \cdot k_{ин} \cdot k_{оу}}{\Gamma^2 \cdot \Gamma_{тр}} \\ \frac{k_p \cdot k_{ин} \cdot k_{оу}}{\Gamma^2 \cdot \Gamma_{тр}} \\ \frac{k_i \cdot k_{ин} \cdot k_{оу}}{\Gamma^2 \cdot \Gamma_{тр}} \end{bmatrix},$$

$$C_{k_{тр}} = \frac{\partial C}{\partial k_{тр}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Матрицы структурной диагностируемости имеют вид:

$$L_{k_{тр}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{k_d \cdot k_{ин} \cdot k_{оу} \cdot k_{дн}}{\Gamma^2 \cdot \Gamma_{тр}} & \frac{k_d \cdot k_{ин} \cdot k_{оу}}{\Gamma^2 \cdot \Gamma_{тр}} \\ -\frac{k_p \cdot k_{ин} \cdot k_{оу} \cdot k_{дн}}{\Gamma^2 \cdot \Gamma_{тр}} & \frac{k_p \cdot k_{ин} \cdot k_{оу}}{\Gamma^2 \cdot \Gamma_{тр}} \\ -\frac{k_i \cdot k_{ин} \cdot k_{оу} \cdot k_{дн}}{\Gamma^2 \cdot \Gamma_{тр}} & \frac{k_i \cdot k_{ин} \cdot k_{оу}}{\Gamma^2 \cdot \Gamma_{тр}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$L_{k_{ин}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{k_d \cdot k_{тр} \cdot k_{оу} \cdot k_{дн}}{T^2 \cdot T_{тр}} & \frac{k_d \cdot k_{тр} \cdot k_{оу}}{T^2 \cdot T_{тр}} \\ -\frac{k_p \cdot k_{тр} \cdot k_{оу} \cdot k_{дн}}{T^2 \cdot T_{тр}} & \frac{k_p \cdot k_{тр} \cdot k_{оу}}{T^2 \cdot T_{тр}} \\ -\frac{k_i \cdot k_{тр} \cdot k_{оу} \cdot k_{дн}}{T^2 \cdot T_{тр}} & \frac{k_i \cdot k_{тр} \cdot k_{оу}}{T^2 \cdot T_{тр}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Для полной диагностируемости системы требуется, чтобы характеристические векторы были линейно независимы во всех попарных сочетаниях, т.е. выполнялось неравенство  $\psi_i(k)\Delta\lambda_i \neq \psi_j(k)\Delta\lambda_j$ , для любых  $i, j = 1..m, i \neq j$ . Это условие с учетом новых обозначений представим как:  $(L_i\Delta\lambda_i - L_j\Delta\lambda_j)v(k) \neq 0$ .

Соотношение будет верным, если выполняются следующие зависимости:

а)  $(L_i\Delta\lambda_i - L_j\Delta\lambda_j) \neq 0$ ;

б)  $v(k) \neq 0$ ;

в) в результирующей матрице, есть хотя бы одна строка, не ортогональная вектору  $v(k)$ .

Все полученные матрицы отличаются друг от друга структурой, поэтому в попарных сочетаниях они будут линейно независимы, следовательно, и система полностью структурно диагностируема относительно признаков места отказов на основании используемых диагностических MD-моделей.

Необходимо получить характеристические векторы  $\psi_i$  для делителя напряжения, трансформатора, инвертора.

Характеристические векторы  $\psi_i$  описываются выражениями (24).

$$\Psi_{k_{дн}} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{k_d \cdot k_{ин} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу}}{T^2 \cdot T_{тр}} \hat{x}_1(k) \\ -\frac{k_p \cdot k_{ин} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу}}{T^2 \cdot T_{тр}} \hat{x}_1(k) \\ -\frac{k_i \cdot k_{ин} \cdot k_{тр} \cdot k_{оу}}{T^2 \cdot T_{тр}} \hat{x}_1(k) \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\Psi_{k_{тр}}(k) = \begin{bmatrix} -\frac{k_d \cdot k_{ин} \cdot k_{оу} \cdot k_{дн}}{T^2 \cdot T_{тр}} \hat{x}_1(k) + \frac{k_d \cdot k_{ин} \cdot k_{оу}}{T^2 \cdot T_{тр}} U_{азад}(k) \\ -\frac{k_p \cdot k_{ин} \cdot k_{оу} \cdot k_{дн}}{T^2 \cdot T_{тр}} \hat{x}_1(k) + \frac{k_p \cdot k_{ин} \cdot k_{оу}}{T^2 \cdot T_{тр}} U_{азад}(k) \\ -\frac{k_i \cdot k_{ин} \cdot k_{оу} \cdot k_{дн}}{T^2 \cdot T_{тр}} \hat{x}_1(k) + \frac{k_i \cdot k_{ин} \cdot k_{оу}}{T^2 \cdot T_{тр}} U_{азад}(k) \end{bmatrix}, \quad (24)$$

Следовательно, данная система является диагностируемой.

Следующей задачей является обеспечение парирования отказов.

К примеру, если в данной системе отказал датчик напряжения, то для того чтобы установка продолжала функционировать и дальше, в систему вводим дополнительный датчик напряжения ДН2, блок обнаружения отказов (БОО), два ключа (КЛ1, КЛ2) и сумматор (рис. 4).

Если на БОО с ДН1 поступает сигнал, то КЛ1 остается открытым, следовательно данный сигнал поступает на сравнивающее устройство и открывается ключ КЛ2.

На сравнивающее устройство поступает напряжение с ДН2.

На сравнивающее устройство поступает напряжение с ДН2.

Отказоустойчивая система, полученная резервированием, была исследована с помощью полунатурного моделирования (рис. 5).

На рис. 6 представлена переходная характеристика отказоустойчивой системы управления рентгеноскопической установкой по задающему воздействию.

На рисунке видно, как при отказе одного из датчиков срабатывает второй. Таким образом, осуществляется парирование отказов.

Выше был рассмотрен отказ одного из элементов рентгеноскопических установок и был приведен один из вариантов возможных решений данной проблемы.



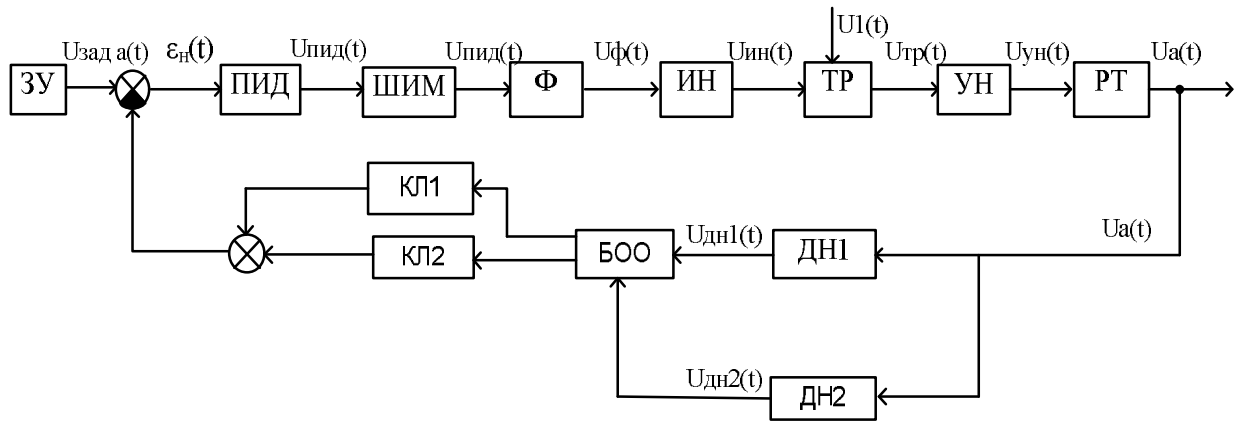


Рис. 4. Функциональная схема отказоустойчивой системы управления рентгеноскопической установкой Rapiscan MVXR5000

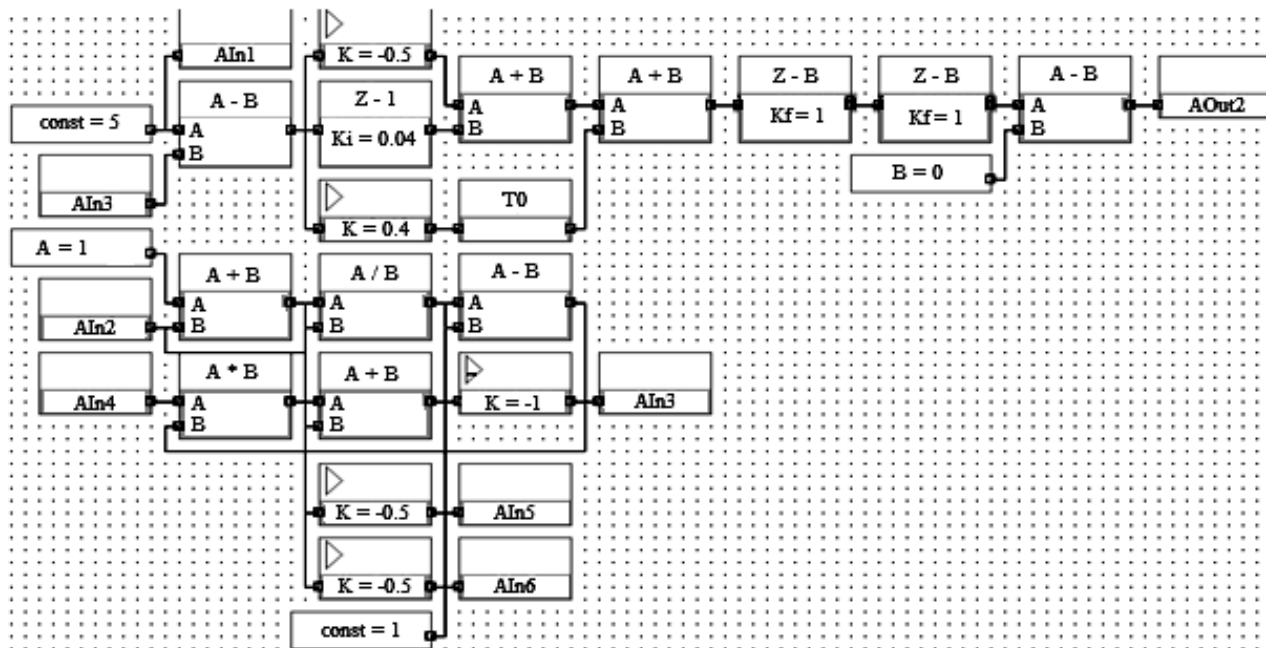


Рис. 5. Структурная схема алгоритма управления отказоустойчивой системой

На данный момент в существующих установках Rapiscan MVXR5000 есть достаточно актуальная проблема, которая может привести к отказам. Изображения, полученные при досмотре багажа во время регистрации пассажиров, хранятся на назначенном жестком диске для последующего просмотра с указанием даты, времени сканирования и идентификационного номера багажа. Проблемой данных систем является то, что при переполнении памяти архива новые изображения багажа не сохраняются и это может привести к сбою всей системы.

## Заклучение

Таким образом, с помощью метода резервирования повышена отказоустойчивость системы управления рентгеноскопической установки Rapiscan MVXR5000.

Сформирована программа для контроля состояния памяти диска, на котором сохраняются изображения сканированного багажа пассажиров при таможенном досмотре.

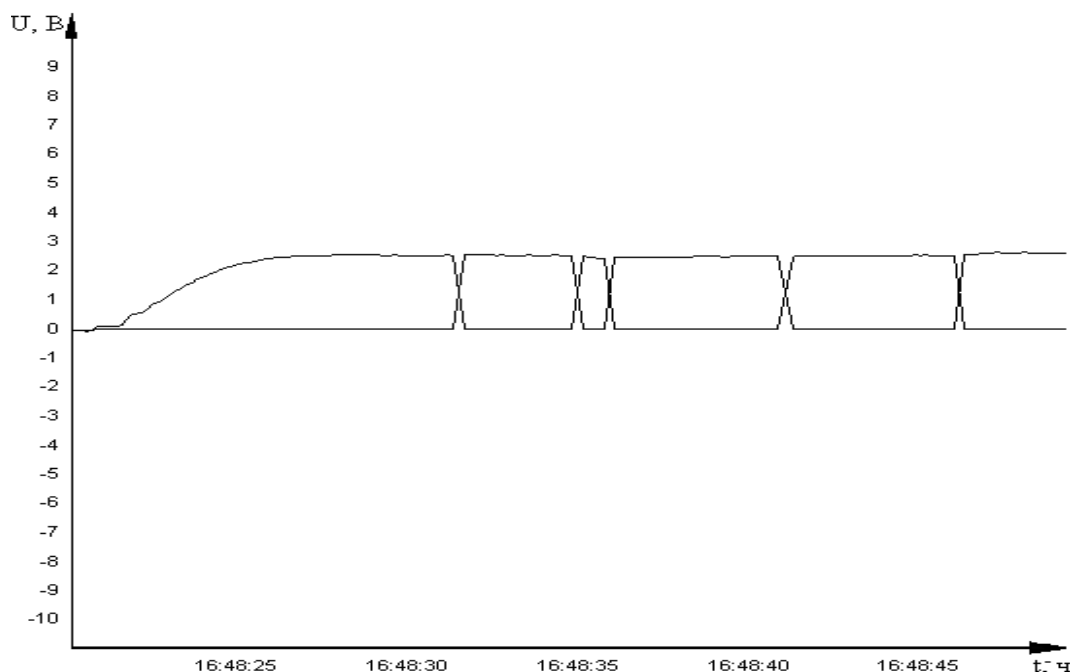


Рис. 6. Переходная характеристика отказоустойчивой системы управления рентгеноскопической установкой по задающему воздействию

### Литература

1. Антонов, К.А. *Этапы развития отечественной досмотровой техники* [Текст] / К.А. Антонов, О.Ф. Андрияшин, А.П. Ахматов // *Специальная техника*. – 2002. – № 3. – С. 7 – 15.
2. *Рентгенотехника: Справочник в 2-х кн. Кн.1* / Ф.Р. Соснин., В. Аертс. и др.; под общ. ред. В.В. Клюева. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1992. – 480 с.
3. Ахматов, А.П. *Возможности использования рентгеновских систем досмотра для обнаружения террористических закладок взрывчатых веществ* [Текст] / А.П. Ахматов, С.Е. Клейменов // *материалы между. семинара НАТО "Обнаружение закладок взрывчатых веществ, развитие техники против терроризма"*. – 2003. – С. 1 – 3.
4. Пат. 25646 Украина, МПК<sup>7</sup> G0N23/02. *Рентгеноскопическая установка* [Текст] / Шумейко Н.А., Петренко В.И., Симонов В.Ф., Михайлова М.А., Грищенко М.В.; Заявитель и патентообладатель Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – № 200704709, заявл. 27.04.07; опубл. 10.08.07, Бюл. №12. – 4 с.
5. *Руководство по эксплуатации установки Rapiscan MVXR5000* [Текст]. – 56 с.
6. Кулик, А.С. *Обеспечение отказоустойчивости систем управления* [Текст]: Монография / А.С. Кулик. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 1991. – 90 с.
7. Кулик, А.С. *Сигнально-параметрическое диагностирование СУ* [Текст] / А.С. Кулик. – Х.: Бизнес Информ, 2000. – 259 с.
8. Кулик, А.С. *Обеспечение отказоустойчивости линеаризируемых систем автоматического управления* [Текст]: учеб. пособие / А.С. Кулик, О.И. Гавриленко. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2003. – 93 с.
9. Кулик, А.С. *Оценка диагностируемости линейных динамических систем* [Текст] / А.С. Кулик // *Автоматика и телемеханика*. – 1991. – №11. – С. 37 – 38.
10. Iserman, R. *Fault-diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance* [Text] / R. Iserman. – Berlin: Springer, 2006. – 475 p.
11. *Diagnosis and Fault-Tolerant Control* [Text] / M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, M. Staroswecki. – 2<sup>nd</sup> Edition. – Berlin: Springer, 2006. – 690 p.
12. Пат. 2047899 Российская Федерация МПК<sup>7</sup> G06F11/18. *Способ обеспечения отказоустойчивости вычислительных систем* [Текст] / Козлов В.С., Листенгорт Ф.А., Меркулов В.А., Сиренко В.Г., Смаглий А.М., Щагин А.В.; Заявитель и патентообладатель Научно-исслед. ин-т "Научный центр". – № 4947483/24, заявл. 21.06.91, опубл. 10.11.95, Бюл. № 12. – 5 с.: ил.
13. Пат. 2010315 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G06F11/18. *Резервированная система* [Текст] / Родин В.И., Михайлов Ю.В.; Заявитель и патентообладатель Гос. научно-исслед. и конструктор. ин-т систем контр. и упр-я "Система". – № 4931230/24, заявл. 24.04.91; опубл. 30.03.94, Бюл. №23. – 7 с.
14. Пат. 2108621 Российская Федерация МПК<sup>7</sup> G06F15/16, G06F11/20. *Отказоустойчивая вычислительная система и способ ее формирования* [Текст] / Дрю Мейдже, Кайл Пауэлл, Дейл Нейбаур.; Заявитель и патентообладатель Новелл, Инк. (US) – № 93005211/09, заявл. 09.08.91; опубл. 10.04.98, Бюл. №16. – 24 с.

Поступила в редакцію 27.02.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., заведуючий каф. «Авиационные приборы и измерения» Н.Д. Кошевой, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», Харьков.

### **ПІДВИЩЕННЯ ВІДМОВОСТІЙКОСТІ РЕНТГЕНОСКОПІЧНОЇ УСТАНОВКИ RAPISCAN MVXR5000**

***В.Ф. Симонов, Є.А. Бойко, Д.В. Гармаш***

На базі аналізу літературних джерел, розглянені різні оглядові установки. Описано поняття відмовостійкості. Розглянута та вирішена проблема зберігання зображення на жорсткому диску установки Rapiscan MVXR5000, при заповненні якого вся інформація не зберігається, цим самим спричиняє збій системи. Написана програма за допомогою якої, оператор може постійно бачити стан заповнення диску. В систему введені резервний дільник напруги, два ключі та блок виявлення відмов. За допомогою цього створена відмовостійка система управління рентгеноскопичною установкою Rapiscan MVXR5000.

**Ключові слова:** рентгеноскопична установка, інтроскоп, відмовостійкість, переповнення, архів, зберігання зображення.

### **FAULT TOLERANCE INCREASING OF X-RAY INSTALLATION RAPISCAN MVXR5000**

***V.F. Symonov, Ju.A. Boyko, D.V. Garmash***

The problem of the fault-tolerance increasing of the X-Ray installation Rapiscan MVXR5000 for airports is considered and solved. The mathematical diagnosis models and the fault-tolerant system are developed. The reserve voltage divider, two keys and fault detection block were inserted in the system. Moreover the problem of the hard disk overfilling at the images storage is solved. The program warning about overfilling is written. These means increase the fault tolerance the X-Ray installation Rapiscan MVXR5000.

**Key words:** X-Ray installation, an introscope, fault tolerance, overflow, archive, storage of images.

**Симонов Владимир Федорович** – канд. техн. наук, доцент, доцент каф. «Системы управления летательными аппаратами», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Бойко Евгения Анатольевна** – магистрант каф. «Системы управления летательными аппаратами», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: 7tria@mail.ru.

**Гармаш Денис Викторович** – студент каф. «Системы управления летательными аппаратами», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.