

УДК 629.735.017.1.004.6

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОТКАЗОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ С ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

А.Д. БАРАБАШ, И.Н. МЕРЗЛИКИН

Статья посвящена обнаружению и идентификации отказов органов управления типа "увод и клинение" в идеальной постановке (атмосфера - невозмущенная, датчики - идеальные). Актуальность рассмотрения данных вопросов обуславливается проблемой дефицита времени для обнаружения, идентификации и парирования отказов АТ, в частности, системы управления как системы наиболее чувствительной к отказам её функциональных элементов. В статье изложена оригинальная методика идентификации отказов, приведены результаты моделирования, иллюстрирующие высокую точность идентификации отказа руля высоты.

Ключевые слова: идентификация отказов, функции чувствительности, система управления, модель системы управления.

Введение

Развитие гражданской авиации как транспортной отрасли невозможно без постоянной модернизации и совершенствования состава вводимых в эксплуатацию воздушных судов (ВС). Как правило, этому процессу сопутствует повышение уровня автоматизации технического оснащения новых машин, обеспечивающего их успешное использование в качестве транспортных средств. Сказанное безусловно касается и таких ответственных устройств, как системы управления (СУ) самолетом. При этом необходимо иметь в виду, что внедрение в них автоматики ни в коем случае не означает снижения уровня внимания к проблеме обеспечения безопасности полетов.

Ключевым фактором для выполнения названного жизненно важного условия является надежность функционирования СУ как важнейших систем самолета. Задачи, которые должна с высочайшей надежностью решать система управления воздушным судном, таковы:

- обеспечение требуемой устойчивости и управляемости ВС;
- целенаправленное управление траекторией, то есть осуществление сложных траекторных маневров;
- стабилизация тех или иных параметров движения.

Следует также отметить необходимость соответствия СУ следующим требованиям:

1. Система управления должна обеспечивать управление ВС на всех режимах, определяемых его назначением, с необходимой точностью, при допустимой психофизиологической нагрузке экипажа.

2. СУ должна обеспечивать высокую безопасность полетов. Для удовлетворения этому комплексному требованию необходимо:

- обладать практической безотказностью, что достигается высокой надежностью элементов СУ и резервированием;
- обеспечивать возможность парирования отказов системы и аварийного перехода с автоматического режима работы на ручной.

3. СУ должна удовлетворять таким общим требованиям, предъявляемым ко всем агрегатам и системам ВС, как высокие эксплуатационная технологичность и ремонтпригодность, минимальные масса, габариты и стоимость и др.

В результате внедрения новых технологий вероятность отказов современных систем управления самолетов гражданской авиации снижается до минимума, но в то же время, несмотря на высокую надежность элементов, стопроцентной гарантии надёжности системы в целом добиться невозможно.

Поэтому актуальным вопросом для гражданской авиации является своевременное обнаружение и идентификация возможных отказов в системе управления ВС, для чего необходимо получение или уточнение по экспериментальным данным модели функционирования реального объекта, выраженной в тех или иных терминах.

1. Обнаружение отказов органов управления

Для выявления факта отказа органов управления использован метод аналитической избыточности [1], который реализован с помощью линейного стационарного наблюдателя, соответствующего нелинейному в общем случае объекту. Блок-схема обнаружения отказа приведена на рис. 1.

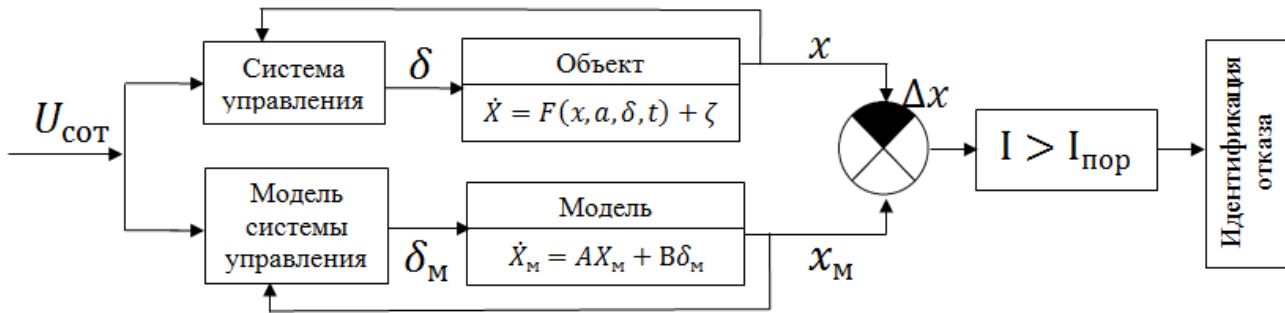


Рис. 1

На рис. 1 U_{cot} – вектор задающих командных управлений; δ_M, δ – m -мерные векторы отклонения органов управления; x, x_M – n -мерные векторы состояния объекта и модели соответственно (в общем случае их размерность может не совпадать); Δx – n -мерный вектор невязки; I – функционал, характеризующий невязку между выходными координатами объекта и модели при возникновении отказа органов управления. Данный функционал сформулирован в виде нормы вектора невязок

$$I = \sqrt{(x - x_M)^T R^{-1} (x - x_M)}, \quad (1)$$

где $R = \text{diag}(r_1 \dots r_n)$ – погрешности оценки вектора x ; $I_{\text{пор}}$ – пороговое значение функционала I выбирается из условия возможности распознавания отказа органа управления за минимальное время.

Для уменьшения влияния неточностей описания модели, а также устранения эффекта накопления ошибок параметры пространственной модели циклично обновляются и подстраиваются по режимам полёта.

В случае появления невязки Δx такой, что $I > I_{\text{пор}}$, производится идентификация следующих параметров отказа в последовательности:

- 1) время возникновения отказа ($t_{\text{отк}}$);
- 2) отказавший орган (j);
- 3) угол клиннения отказавшего органа ($\Delta\delta_j^{\text{отк}}$).

2. Идентификация отказов органов управления

Для идентификации отказов органов управления дополнительное движение $\Delta x = x - x_M$, возникающее из-за отказа, представим в виде

$$\Delta x(t) = z(t) \Delta\delta^{\text{отк}}, \quad (2)$$

где $z(t) = \partial X(t) / \partial \delta$ – матрица ($n \times m$) функций чувствительности, удовлетворяющая матричному дифференциальному уравнению [2]

$$\dot{z} = Az + B, z(0) = 0, \quad (3)$$

которое получается из уравнения модели

$$\dot{X}_M = Ax_M + B\delta_M \quad (4)$$

путем дифференцирования его по δ_M как по параметру.

Решая уравнение (2) относительно $\Delta\delta^{\text{отк}}$, получим следующую зависимость

$$\Delta\delta^{\text{отк}} = \begin{cases} (z^T z)^{-1} z^T \Delta x, & m \leq n \\ z^T (z z^T)^{-1} \Delta x, & m > n \end{cases} \quad (5)$$

Трудность решения (5) заключается в том, что матрица $z(t)$ не совмещена по времени с невязкой $\Delta x(t)$, поэтому определение $\Delta\delta^{\text{отк}}$ проводится в последовательности, указанной в п. 1.

2.1. Определение времени возникновения отказа ($t_{\text{отк}}$)

На интервале $\Delta t = t_2 - t_1$ имеем заранее рассчитанную функцию чувствительности $z(t)$, и известно, что $t_{\text{отк}} \in [t_1, t_2]$ (причем t_2 – время обнаружения невязки Δx , при которой $I > I_{\text{пор}}$). Воспользовавшись допущением, что одновременно возникает не более одного отказа, запишем

$$\Delta x(t) = z_j(t) \Delta\delta_j^{\text{отк}}, \quad (6)$$

где Z_j – вектор чувствительности, соответствующий j -му органу.

Из (6) видно, что функции $\Delta x(t)$ и $z_j(t)$ подобны.

Свойство подобных функций можно графически отобразить следующим образом (рис. 2).

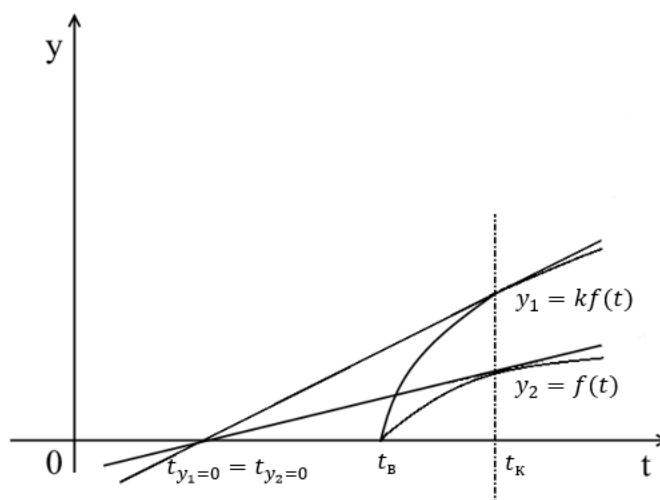


Рис. 2

Если подобные функции выходят из одной точки t_B , то касательные к ним в любой точке t_K либо пересекаются между собой, при этом точка пересечения лежит на оси Ot , либо параллельны с осью Ot . Перейдем от векторов Δx и Z_j как функций от времени к их модулям в функции времени:

$$\begin{aligned} R_{\Delta x}(t) &= \sqrt{\Delta x^T \Delta x}; \\ R_{Z_j}(t) &= \sqrt{z_j^T z_j}. \end{aligned} \quad (7)$$

Причём, если подобны $\Delta x(t)$ и $z_j(t)$, то подобны $R_{\Delta x}(t)$ и $R_{Z_j}(t)$.

Применим свойство подобных функций для $R_{\Delta x}(t)$ и $R_{Z_j}(t)$. Для этого построим к данным функциям касательные в точке обнаружения отказа. Их уравнения будут иметь вид:

$$\begin{aligned} y_{R_{\Delta x}} &= R_{\Delta x}(t_2) + \dot{R}_{\Delta x}(t_2)(t_2 - t_1); \\ y_{R_{z_j}} &= R_{z_j}(t_2) + \dot{R}_{z_j}(t_2)(t_2 - t_1), \end{aligned} \quad (8)$$

где производные $\dot{R}_{\Delta x}$ и \dot{R}_{z_j} получаются путём дифференцирования (7) по t как квадратичной формы:

$$\begin{aligned} \dot{R}_{\Delta x} &= (\sqrt{\Delta x^T \Delta x})' + \frac{1}{2} (\Delta x^T \Delta x)^{-\frac{1}{2}} \left[\frac{d\Delta x^T}{dt} (E^T + E) \Delta x \right] = \frac{\Delta \dot{x}^T \Delta x}{\sqrt{\Delta x^T \Delta x}}; \\ \dot{R}_{z_j} &= (\sqrt{z_j^T z_j})' + \frac{1}{2} (z_j^T z_j)^{-\frac{1}{2}} \left[\frac{dz_j^T}{dt} (E^T + E) z_j \right] = \frac{z_j^T \dot{z}_j}{\sqrt{z_j^T z_j}}, \end{aligned} \quad (9)$$

где E – единичная матрица.

Для каждой касательной (8) определим t , при котором $y_{R_{\Delta x}} = y_{R_{z_j}} = 0$. Соответственно имеем:

$$\begin{aligned} t_{\Delta x} &= t_2 - (\Delta x^T \Delta x)^{-1} \Delta x^T \Delta x; \\ t_{z_j} &= t_2 - (z_j^T z_j)^{-1} z_j^T z_j. \end{aligned} \quad (10)$$

Совмещая $t_{z_j}(t)$ с фиксированной точкой $t_{\Delta x}$, предполагаем, что совмещаются и начальные точки функций $R_{\Delta x}(t)$ и $R_{z_j}(t)$, то есть находим искомое $t = t_{\text{отк}}$, при котором появляется дополнительное движение Δx . Прделав данную процедуру для всех $R_{z_j}(t)$, имеется возможность исключить из дальнейшего рассмотрения на предмет отказа те j -е органы, для которых не удовлетворяется условие принадлежности $t_{\text{отк}j}$ интервалу $[t_1, t_2]$. Из оставшихся $t_{\text{отк}j}$ истинным может быть только одно время отказа, соответствующее j -му отказавшему органу.

2.2. Определение отказавшего органа управления

Критерий определения отказавшего органа управления сформулирован в виде $\min(\Delta x(t_2), \widehat{z_j}(t_2 - t_{\text{отк}}))$.

Воспользуемся известной в аналитической геометрии формулой

$$\varphi_j = \arccos \frac{\Delta x^T(t_2) z_j(t_2 - t_{\text{отк}})}{|\Delta x(t_2)| |z_j(t_2 - t_{\text{отк}})|}. \quad (11)$$

Минимальный по модулю φ_j будет определять отказавший орган управления.

2.3. Определение угла клинениа отказавшего органа

При известном отказавшем органе управления и времени возникновения отказа, воспользовавшись соотношением (5), без особого труда можно определить угол клинениа отказавшего органа

$$\Delta \delta_j^{\text{отк}} = (z_j^T z_j)^{-1} z_j^T \Delta x.$$

Предложенный подход позволяет провести надежную идентификацию отказов органов управления как при горизонтальном полёте, так и при выполнении пространственных маневров. Погрешность идентифицируемых параметров отказа удовлетворительная.

3. Результаты моделирования

На рис. 3-14 представлены переходные процессы при уводе правой половины руля высоты самолета типа Ту-204 (рис. 9) в положение $\varphi_{\text{пр}}^{\text{отк}} = -5$ из балансировочного. Время отказа $t=0,05$ с. Режим полета: $H=1000$ м, $M=0,6$. Знаками “о” показаны результаты распознавания данного отказа по описанной методике. Интервал контроля $t=0,25$ с. Можно наблюдать высокую точность идентификации отказа.

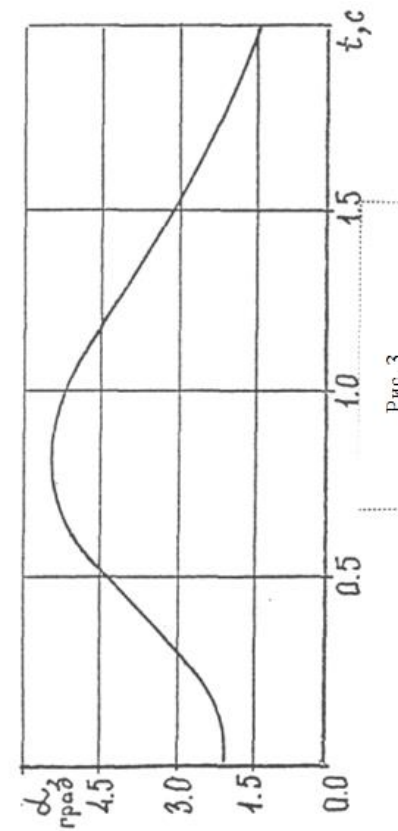


Рис. 3

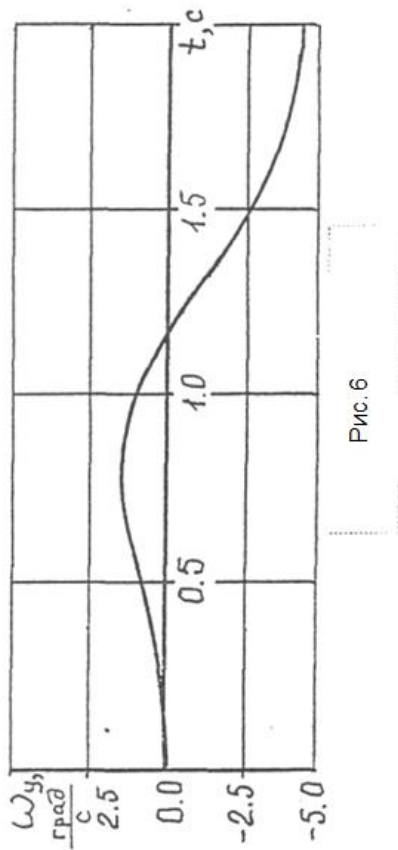


Рис. 6

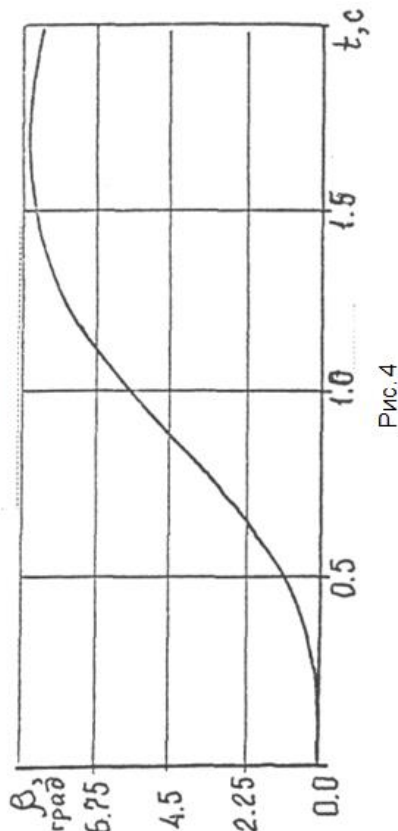


Рис. 4

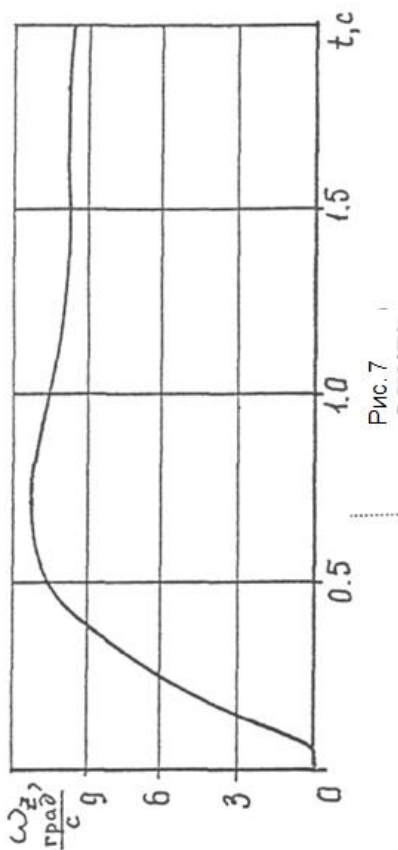


Рис. 7

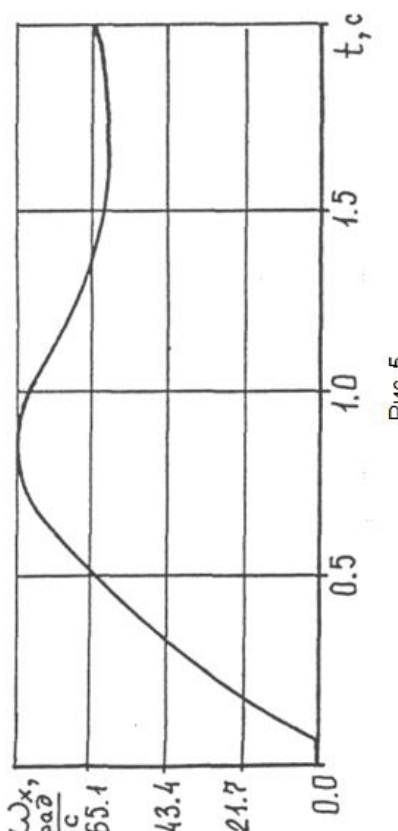


Рис. 5

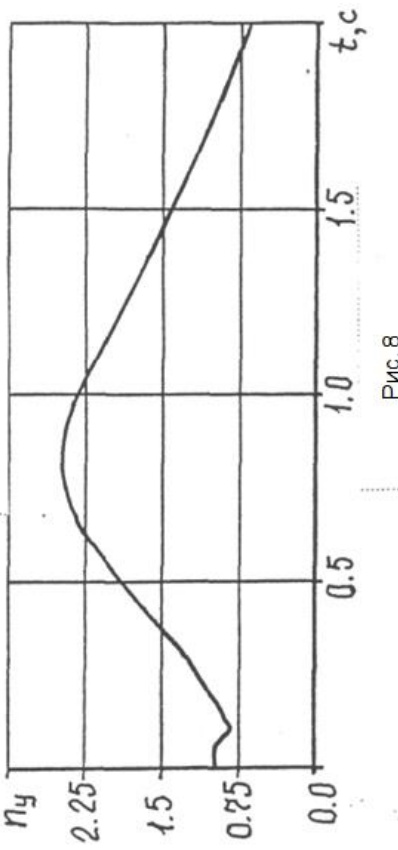


Рис. 8

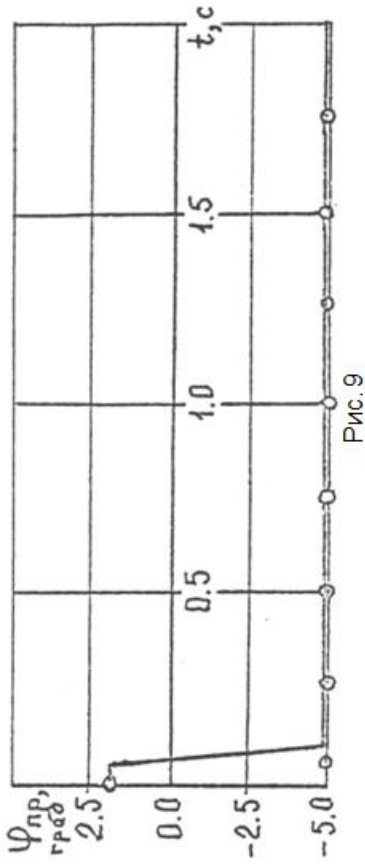


Рис. 9

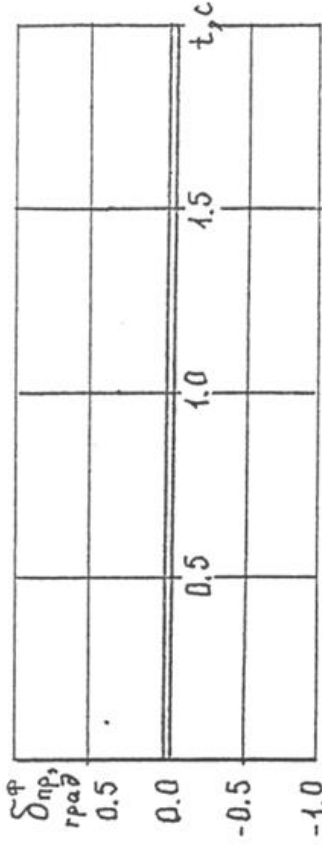


Рис. 12

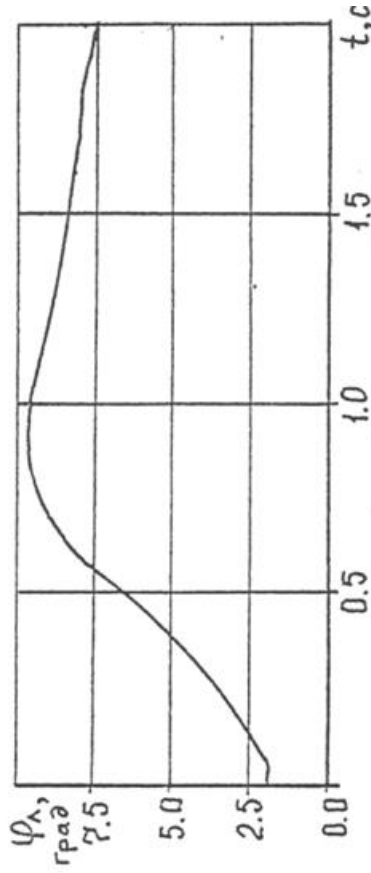


Рис. 10

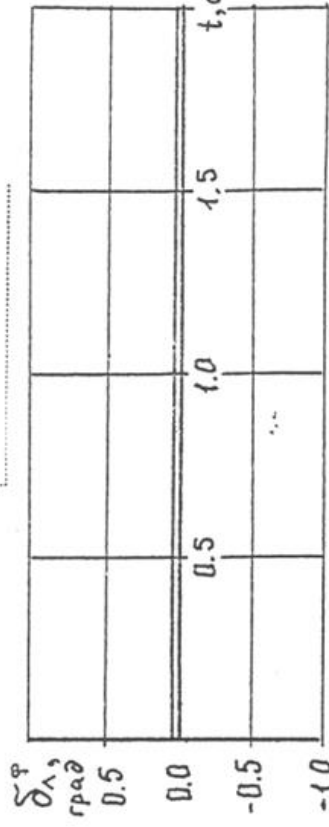


Рис. 13

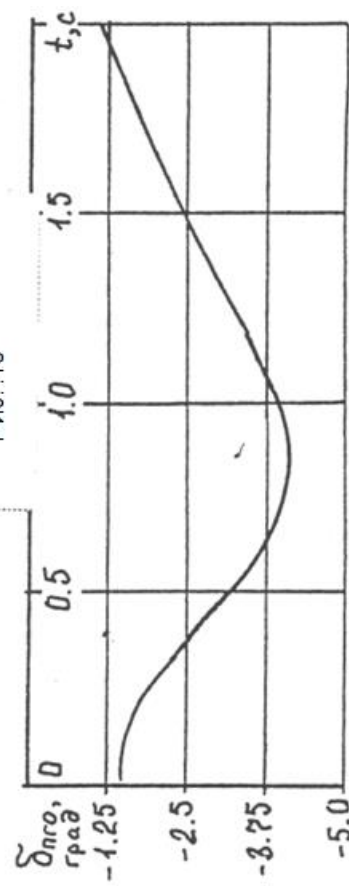


Рис. 11

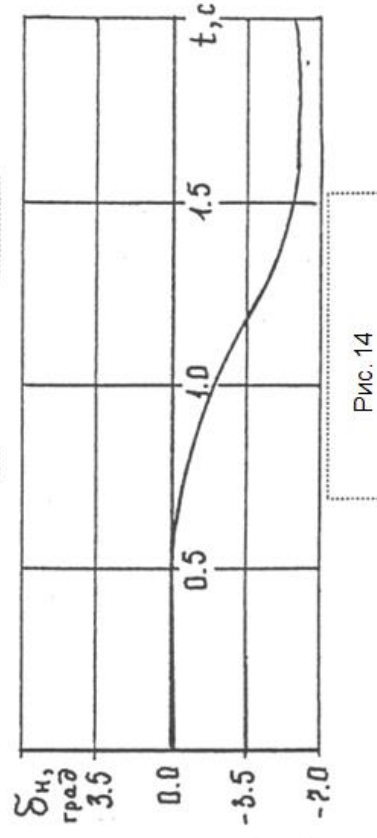


Рис. 14

ЛИТЕРАТУРА

1. **Воробьев В.В.** Модифицированный метод идентификации отказов в динамических системах // *Автоматика и телемеханика*. 2000. № 11. С. 168-174.
2. **Vorob'ev V.V.** Modified method of identification of faults in dynamic systems // *Automation and Remote Control*. 2000. T. 61. № 1998. Pp. 1912-1918.

IDENTIFICATION OF REFUSALS OF CONTROL SYSTEMS OF AIRCRAFTS BY MEANS OF SENSITIVITY FUNCTIONS

Barabash A.D., Merzlikin I.N.

Article is devoted to detection and identification of refusals of governing bodies like "withdrawal and a klineniye" in ideal statement (the atmosphere - not indignant, sensors - ideal). Relevance of consideration of the matters is caused by a problem of deficiency of time for detection, identification and parrying of refusals of AT, in particular a control system, as systems of the most sensitive to refusals of its functional elements. In article the original technique of identification of refusals is stated, the results of modeling illustrating high precision of identification of refusal of an elevator are given.

Keywords: identification of refusals, sensitivity functions, control system, control system model.

REFERENCES

1. **Vorob'ev V.V.** Modificirovannoj metod identifikacii otkazov v dinamicheskikh sistemah. *Avtomatika i telemehanika*. 2000. № 11. Pp. 168-174. (In Russian).
2. **Vorob'ev V.V.** Modified method of identification of faults in dynamic systems. *Automation and Remote Control*. 2000. T. 61. № 1998. Pp. 1912-1918.

Сведения об авторах

Барабаш Антон Дмитриевич, 1992 г.р., студент МГТУ ГА, область научных интересов – безопасность полетов, обнаружение и идентификация отказов летательных аппаратов гражданской авиации.

Мерзликин Игорь Николаевич, 1985 г.р., окончил МГТУ ГА (2007), кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности полетов и жизнедеятельности МГТУ ГА, автор 13 научных работ, область научных интересов – инженерная экология, медицина, безопасность технологических процессов и производств, профайлинг, безопасность в чрезвычайных ситуациях, экологические последствия аварий (катастроф).