

УДК 621.828.3-83-52

doi: 10.32620/aktf.2020.4.06

А. С. КУЛИК, К. Ю. ДЕРГАЧЕВ, С. Н. ПАСИЧНИК, Ю. А. НЕМШИЛОВ

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

## АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ УГЛОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ КОРОМЫСЛА С ВИНТОВЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

**Предметом** изучения в статье является процесс формирования алгоритмов управления угловым движением коромысла с винтовыми электроприводами. **Целью** является разработка подходов к формированию алгоритмов управления угловым движением коромысла с винтовыми электроприводами как объекта автоматического управления. **Задачи:** конкретизировать процесс синтеза алгоритма управления по состоянию для линейного математического описания объекта автоматического управления в пространстве состояний по критерию минимума интеграла от взвешенного модуля ошибки. Сформировать структурную схему системы автоматического управления по состоянию. Усовершенствовать подход к разработке алгоритмов управления объектами автоматического управления по выходу для математического описания в частотной области. Проиллюстрировать особенности подхода на конкретном примере объекта автоматического управления, представленного передаточными функциями по задающему и возмущающему воздействиям. Разработать схему моделирования в среде Simulink и исследовать реакции на ступенчатые задающее и возмущающее воздействия. Разработать подход к формированию алгоритмов управления по диагнозу коромыслом как объектом автоматического управления. Описать процедуру и средства глубокого диагностирования нештатных ситуаций объекта автоматического управления. Разработать средства восстановления работоспособности объекта автоматического управления. Используемыми **методами** являются: метод пространства состояний, метод передаточных функций, интегральные критерии оптимальности, методы диагностирования и восстановления работоспособности. Получены следующие **результаты:** сформированы подходы к формированию алгоритмов управления угловым движением коромысла с винтовыми электроприводами с использованием линейных математических описаний во временной и частотной областях. **Выводы.** Научная новизна заключается в формировании подходов к разработке алгоритмов управления угловым положением коромысла с винтовыми электроприводами, отличающихся от известных учетом структурных и функциональных особенностей объекта автоматического управления.

**Ключевые слова:** коромысло; винтовой электропривод; объект автоматического управления; управление по состоянию; управление по выходу; управление по диагнозу.

### Введение

**Постановка проблемы.** Создание нового класса летательных аппаратов – конвертопланов, обусловило появление целого ряда научно-технических проблем. Значительный интерес среди них представляют проблемы автоматизации новых специфических режимов полета, а именно, вертикального взлета и посадки, перехода из режимов висения в другие режимы полета. Для изучения сложных движений в этих режимах используется принцип декомпозиции, заключающийся в разбиении таких движений на ряд простейших. Изучение простейших движений позволяет построить линейные математические модели, для которых можно использовать ряд известных методов синтеза алгоритмов автоматического управления.

Одним из простейших движений конвертоплана является угловое движение по крену относительно центра масс. На кафедре была создана макетная

установка динамически подобно углового движения конвертоплана с использованием коромысла с винтовыми электроприводами (рис. 1).



Рис. 1. Экспериментальная установка

Управленческие модели коромысла с винтовыми электроприводами как объекта автоматического управления были получены и описаны в работе [1].

В теории автоматического управления представлено множество разнообразных методов синтеза алгоритмов управления для различных обобщенных и абстрактных математических моделей, описывающих процессы, как во временной, так и в частотной областях.

При использовании конкретных математических моделей появляется возможность учитывать как структурные, так и параметрические особенности. Это обстоятельство позволяет более целенаправленно выбрать конструктивные методы и сформировать продуктивные подходы к разработке алгоритмов управления.

Данная статья посвящена описанию подходов к разработке алгоритмов управления угловым движением коромысла с винтовыми электроприводами посредством использования линейных математических моделей во временной и частотной областях.

### 1. Алгоритмы управления по состоянию

В современной теории автоматического управления значительные результаты получены с использованием алгебраических методов анализа и синтеза систем автоматического управления во временной области, а именно в пространстве состояний [2-7].

Угловое движение коромысла с винтовыми электроприводами как объекта автоматического управления в пространстве его состояний [1], представим с помощью векторно-матричных уравнений, отражающих структурные особенности:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \\ \dot{x}_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{23} & a_{24} \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ b_{31} & 0 \\ 0 & b_{42} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} x_1(t_0) \\ x_2(t_0) \\ x_3(t_0) \\ x_4(t_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{10} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{22} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

В компактной форме эти уравнения будут иметь такой вид:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t); x(t_0) = x_0; y(t) = Cx(t), \quad (3)$$

здесь A, B и C – матрицы коэффициентов;

$x(t)$ ,  $u(t)$ ,  $y(t)$  – векторы размерностей, соответствующих уравнениям (1) и (2).

Исходным положением для формирования алгоритмов управления по состоянию служит выполнение таких условий:

- 1) объект автоматического управления должен быть полностью управляем;
- 2) объект автоматического управления должен быть полностью наблюдаем;
- 3) вектор состояния  $x(t)$  должен быть доступен измерению.

Анализ уравнений движения объекта автоматического управления по критериям Р. Калмана, представленный в работе [1], свидетельствует о полной управляемости и наблюдаемости объекта автоматического управления. Третье условие, связанное с доступностью измерения всех компонент вектора состояния  $x(t)$  не выполняется, что следует из структуры уравнения (2), а именно, только две компоненты вектора состояния  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  доступны измерениям –  $y_1(t)$  и  $y_2(t)$ .

Недостающие компоненты вектора состояния  $x_3(t)$  и  $x_4(t)$  можно идентифицировать с помощью различных фильтров Р. Калмана [3-7]. Применительно к структуре уравнения (1) фильтр может быть неполного порядка, так как две компоненты вектора состояния доступны измерению. Очевидно и следующее свойство из уравнения (1): начальные условия для компонент  $x_3(t)$  и  $x_4(t)$  – нулевые. Это обстоятельство позволяет сформировать простейший фильтр второго порядка, описываемый следующим векторно-матричным уравнением:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_3(t) \\ \dot{\hat{x}}_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{33} & 0 \\ 0 & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_3(t) \\ \hat{x}_4(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{31} & 0 \\ 0 & b_{42} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} \hat{x}_3(t) \\ \hat{x}_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

здесь  $\hat{x}_3(t)$  и  $\hat{x}_4(t)$  – оценки соответствующих компонент вектора состояния.

С учетом уравнения (4), уравнение объекта автоматического управления с доступными измерениями переменными состояниями можно представить в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1(t) \\ \dot{y}_2(t) \\ \dot{\hat{x}}_3(t) \\ \dot{\hat{x}}_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{22}a_{23} & c_{22}a_{24} \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \hat{x}_3(t) \\ \hat{x}_4(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ b_{31} & 0 \\ 0 & b_{42} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} y_1(t_0) \\ y_2(t_0) \\ \hat{x}_3(t_0) \\ \hat{x}_4(t_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Представим в компактной форме это уравнение

$$\dot{\hat{x}}(t) = A^* \hat{x}(t) + Bu(t); \hat{x}(t_0) = x_0, \quad (6)$$

здесь  $\hat{x}(t)$  – вектор идентифицированного состояния объекта;  $A^*$  – новая матрица коэффициентов.

Для управления объектом относительно нулевого состояния формируются управляющие воздействия в соответствии с уравнением

$$u(t) = K\hat{x}(t), \quad (7)$$

где  $K$  –  $(2 \times 4)$  – матрица коэффициентов обратной связи.

Подставив выражение управляющих воздействий в уравнение (6), получим

$$\dot{\hat{x}}(t) = A^* \hat{x}(t) + BK\hat{x}(t) = D\hat{x}(t). \quad (8)$$

Необходимое условие работоспособности замкнутого контура заключается в выполнении следующего условия, чтобы корни характеристического уравнения

$$\det[Is - D] = s^4 + d_3s^3 + d_2s^2 + d_1s + d_0 = 0 \quad (9)$$

располагались в левой полуплоскости комплексной плоскости  $s$ . Это условие устойчивости системы автоматического управления.

Достаточное условие работоспособности системы состоит в выполнении требований к качеству переходного процесса: времени переходного процесса, перерегулированию, точности и других показателей реакции на ступенчатое входное воздействие. Достаточное условие работоспособности накладывает ограничение на область размещения корней в левой полуплоскости плоскости  $s$ . Необходимое и достаточное условия работоспособности представляют собой противоречивые условия. Удо-

влетворить их можно посредством нахождения приемлемого компромисса. Процесс нахождения компромисса, как правило, итерационный. Количество итерационных шагов можно сократить, воспользовавшись оптимальными интегральными оценками качества для ошибки и нормированными переходными характеристиками на ступенчатый входной сигнал [6]. Так, для интеграла от взвешенного модуля ошибки

$$I = \int_0^t t |e(t)| dt, \quad (10)$$

где  $t$  – время;  $e(t)$  – сигнал ошибки, определяемый разностью между входным сигналом и сигналом обратной связи.

Характеристический полином с оптимальными значениями коэффициентов будет таким:

$$s^4 + 2,1\omega_n s^3 + 3,4\omega_n^2 s^2 + 2,7\omega_n^3 s + \omega_n^4 = 0, \quad (11)$$

здесь  $\omega_n$  – собственная частота колебаний замкнутого контура.

Задаваясь собственной частотой колебаний  $\omega_n$ , определяют численные значения оптимальных коэффициентов.

Так как коэффициенты характеристического уравнения (9) зависят от коэффициентов матрицы  $K$ , которые нужно определить, то из следующих соотношений

$$d_3 = 2,1\omega_n; d_2 = 3,4\omega_n^2; d_1 = 2,7\omega_n^3; d_0 = \omega_n^4 \quad (12)$$

находят их численные значения. Это первый шаг. Второй итерационный шаг состоит в моделировании системы автоматического управления в среде Simulink и получении реакций на ступенчатые входные воздействия. Полученные переходные характеристики дают информацию как о характере реакции, так и качественных показателей. Целенаправленно варьируя величиной  $\omega_n$ , можно получить численные значения коэффициентов матрицы  $K$ , обеспечивая приемлемый для решаемой задачи компромисс и оптимальное значение интегрального критерия (10).

Систему автоматического управления по состоянию углового движения коромысла с винтовыми электроприводами можно представить графически с помощью структурной схемы (рис. 2).

Система автоматического управления состоит из двух подсистем: объекта автоматического управления (ОАУ) и устройства автоматического управ-

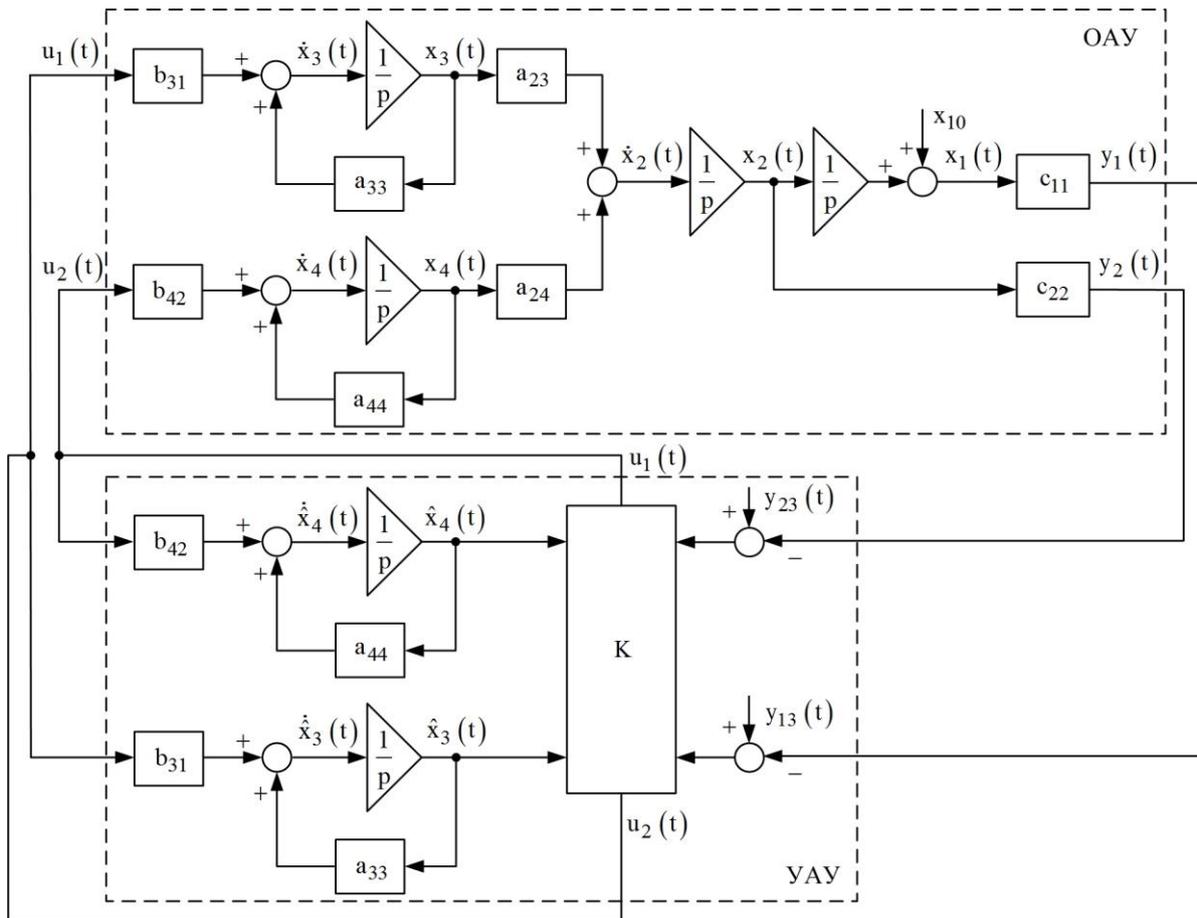


Рис. 2. Структурная схема системы автоматического управления коромыслом с винтовыми электроприводами

ления (YAУ). OAU включает математические модели двух винтовых электроприводов, отрабатывающих сигналы управления  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$ , математическую модель коромысла, и математические модели датчиков угла и угловой скорости с соответствующими входами  $y_1(t)$  и  $y_2(t)$ . Сигналы с датчиков поступают в YAУ, где сравниваются в общем случае с задающими воздействиями  $y_{13}(t)$  и  $y_{23}(t)$ . Разностные сигналы поступают на модуль, реализующий преобразования в соответствии с матрицей  $K$ . На этот же модуль поступают сигналы фильтра, восстанавливающего недоступные измерения компоненты  $\hat{x}_3(t)$  и  $\hat{x}_4(t)$  вектора состояния  $x(t)$ . Полученные в результате преобразования в модуле  $K$  сигналы  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$  поступают на входы OAU и на входы фильтра YAУ, обеспечивая устойчивое и качественное угловое движение коромысла в соответствии с задающими воздействиями  $y_{13}(t)$  и  $y_{23}(t)$ .

## 2. Алгоритмы управления по выходу

В классической теории автоматического управления для формирования управляющих воздействий традиционно используются сигналы с датчиков-выходов объекта автоматического управления [3, 8].

Угловое движение коромысла с винтовыми электроприводами измеряется с помощью двух датчиков: угла и угловой скорости [1]. В частотной области для одного канала управления можно представить объект автоматического управления следующими передаточными функциями:

$$W_1(s) = \frac{U_{д1}(s)}{U_1(s)} = \frac{\kappa_1}{s^2(T_1s + 1)}; \quad (13)$$

$$W_3(s) = \frac{U_{д2}(s)}{U_1(s)} = \frac{\kappa_3}{s(T_1s + 1)}; \quad (14)$$

$$W_1^f(s) = \frac{U_{д1}(s)}{F(s)} = \kappa_{д1}. \quad (15)$$

Качественный вид логарифмических частотных характеристик объекта показан на рис. 3.

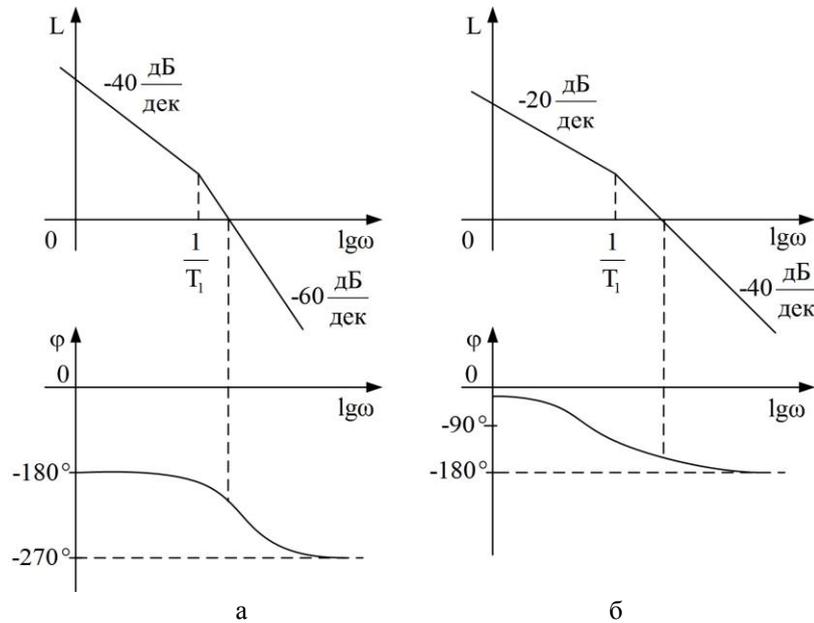


Рис. 3. Логарифмические частотные характеристики: а – для  $W_1(s)$ ; б – для  $W_2(s)$

Вид логарифмических частотных характеристик свидетельствует о неустойчивости углового движения коромысла с винтовыми электроприводами по углу и устойчивости по угловой скорости. Для обеспечения, как устойчивого движения, так и апериодического характера управления – без перерегулирования, а также с нулевой установившейся ошибкой требуется коррекция.

Синтезировать корректирующие звенья можно с помощью метода синтеза по логарифмическим амплитудно-частотным характеристикам [8], представляющий, по сути, инженерный итерационный метод. Более современный и продуктивный метод – аналитический, заключается в использовании стандартных переходных характеристик по интегральному критерию от взвешенного модуля ошибки [3]. Рассмотрим его подробнее. Итак, используемый объект автоматического управления располагает двумя выходами: сигналом с датчика угла –  $U_{д1}(s)$  и сигналом с датчика угловой скорости –  $U_{д2}(s)$ . Это обстоятельство позволяет применить простейший алгоритм коррекции в форме следующей передаточной функции:

$$W_k(s) = \frac{U_1(s)}{\Delta U(s)} = k_\phi + k_\dot{\phi}s, \quad (16)$$

где  $\Delta U(s) = U_{д1}(s) - U_{д1}^*(s)$  – отклонение изображения сигнала датчика угла от задающего его значения  $U_{д1}^*(s)$ .

Структура приведенной передаточной функции

соответствует структуре коррекции с помощью пропорционально-дифференциальных звеньев. На рис. 4 представлена структурная схема замкнутой системы управления коромыслом.

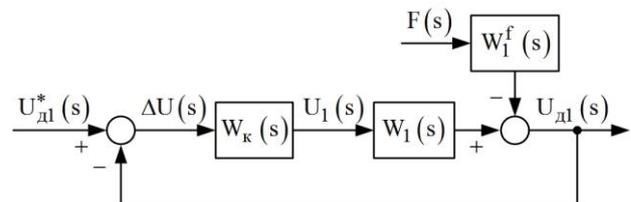


Рис. 4. Структурная схема замкнутой системы управления

Для определения численных значений  $k_\phi$  и  $k_\dot{\phi}$  сформируем передаточную функцию замкнутой системы управления

$$\begin{aligned} \Phi(s) &= \frac{U_{д1}(s)}{U_{д1}^*(s)} = \frac{W_k(s)W_1(s)}{1 + W_k(s)W_1(s)} = \\ &= \frac{(k_\phi + k_\dot{\phi}s)k_1}{T_1s^3 + s^2 + k_\dot{\phi}k_1s + k_\phi k_1}. \end{aligned} \quad (17)$$

Вынесем  $T_1$  из полинома знаменателя, тогда

$$\Phi(s) = \frac{U_{д1}(s)}{U_{д1}^*(s)} = \frac{(k_\phi + k_\dot{\phi}s) \frac{k_1}{T_1}}{s^3 + \frac{s^2}{T_1} + \frac{k_\dot{\phi}k_1s}{T_1} + \frac{k_\phi k_1}{T_1}}. \quad (18)$$

Полином знаменателя передаточной функции по интегральному критерию взвешенного модуля отклонения

$$I = \int_0^1 t |\Delta u(t)| dt, \quad (19)$$

где  $t$  – время;  $\Delta u(t)$  – отклонение сигнала датчика от задающего значения, должен соответствовать следующему оптимальному полиному

$$s^3 + 1,75\omega_n s^2 + 2,15\omega_n^2 s + \omega_n^3, \quad (20)$$

здесь  $\omega_n$  – круговая частота, используемая в нормированном времени –  $\omega_n t$  при представлении оптимальных переходных характеристик.

Сопоставляя полином знаменателя передаточной функции замкнутой системы (18) с полиномом (20), получим следующие соотношения

$$\frac{1}{T_1} = 1,75\omega_n; \quad \frac{K_\phi K_1}{T_1} = 2,15\omega_n^2; \quad \frac{K_\phi K_1}{T_1} = \omega_n^3. \quad (21)$$

Пользуясь этими соотношениями, вычисляют

$$\omega_n = \frac{1}{1,75T_1}; \quad K_\phi = \frac{2,15\omega_n^2 T_1}{K_1}; \quad K_\phi = \frac{\omega_n^3 T_1}{K_1}. \quad (22)$$

При реализации корректирующего звена (16) дифференцирующая составляющая  $K_\phi s$  формируется с использованием сигнала с датчика угловой скорости  $u_{д2}(t)$ .

Пример 1. Рассмотрим коромысло с винтовыми электроприводами как объект автоматического управления для одного канала с передаточной функцией

$$W_1(s) = \frac{U_{д1}(s)}{U_1(s)} = \frac{10}{s^2(0,1s+1)}. \quad (23)$$

Для коррекции используем пропорционально-дифференцирующее звено (16). Передаточная функция замкнутой системы управления примет следующий вид:

$$\Phi(s) = \frac{U_{д1}(s)}{U_{д1}^*(s)} = \frac{100(K_\phi + K_\phi s)}{s^3 + 10s^2 + 100K_\phi s + 100K_\phi}. \quad (24)$$

Неизвестными параметрами в передаточной функции будут параметры корректирующего звена:  $K_\phi$  и  $K_\phi s$ . С помощью соотношений (22) вычислим их численные значения:

$$\omega_n = 5,7; \quad K_\phi = 0,69; \quad K_\phi = 1,85. \quad (25)$$

Подставим полученные значения в передаточную функцию и получим такое выражение:

$$\Phi(s) = \frac{U_{д1}(s)}{U_{д1}^*(s)} = \frac{185 + 69s}{s^3 + 10s^2 + 69s + 185}. \quad (26)$$

Решив характеристическое уравнение

$$s^3 + 10s^2 + 69s + 185 = 0, \quad (27)$$

получим следующие значения полюсов:

$$s_1 = -4,1; \quad s_2 = -2,9 + j6; \quad s_3 = -2,9 - j6. \quad (28)$$

Все полюса имеют отрицательные действительные части и согласно первому методу А. М. Ляпунова замкнутая система будет устойчива.

Передаточная функция замкнутой системы (26) в качестве нуля будет содержать нуль корректирующего звена (16). Наличие нуля в передаточной функции приводит к колебательному процессу с перерегулированием  $\sigma = 40\%$  (рис. 5).

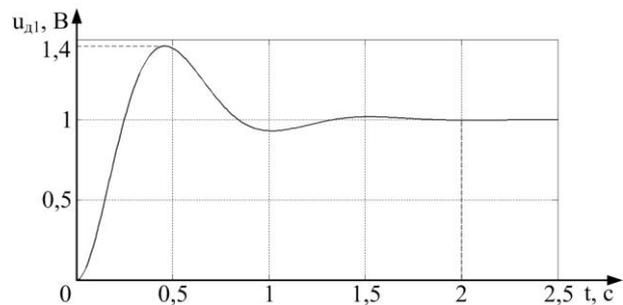


Рис. 5. Реакция замкнутой системы на единичное задающее воздействие

Такой переходный процесс не приемлем для управления коромыслом. Для обеспечения «мягкого» управления – апериодического, необходимо исключить существенное влияние нуля.

Это можно скорректировать с помощью предшествующего фильтра [3] с передаточной функцией вида:

$$W_\phi(s) = \frac{U_3(s)}{U_{д1}^*(s)} = \frac{185}{69s + 185}. \quad (29)$$

Структурная схема системы управления коромыслом по одному каналу примет вид (рис. 6).

В такой скорректированной системе реакция на единичное управляющее воздействие будет иметь апериодический характер с перерегулированием 2,5 %, временем переходного процесса 2 с и с нулевой ошибкой отработки задающего воздействия (рис. 7).

Реакция замкнутой системы на возмущающее воздействие будет иметь колебательный вид (рис. 8), с перерегулированием 25 %, временем переходного процесса 2,5 с и безошибочной отработкой задающего воздействия.

На рис. 9 представлена схема моделирования скорректированной системы в среде Simulink.

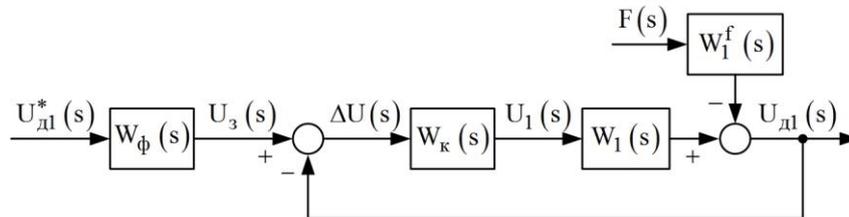


Рис. 6. Структурная схема скорректированной системы управления коромыслом

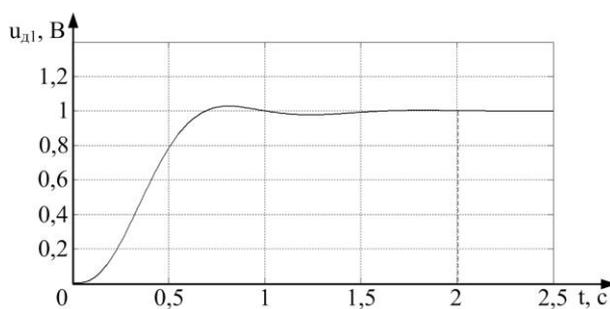


Рис. 7. Реакция скорректированной системы на управляющее воздействие

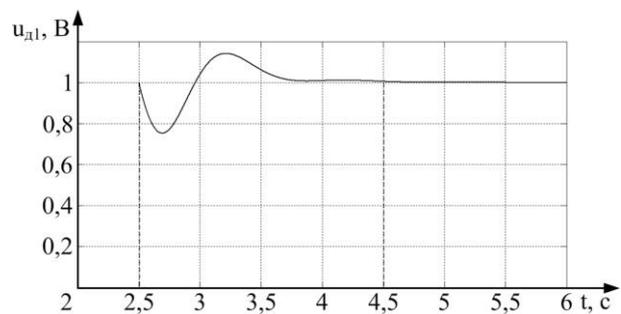


Рис. 8. Реакция скорректированной системы на возмущающее воздействие

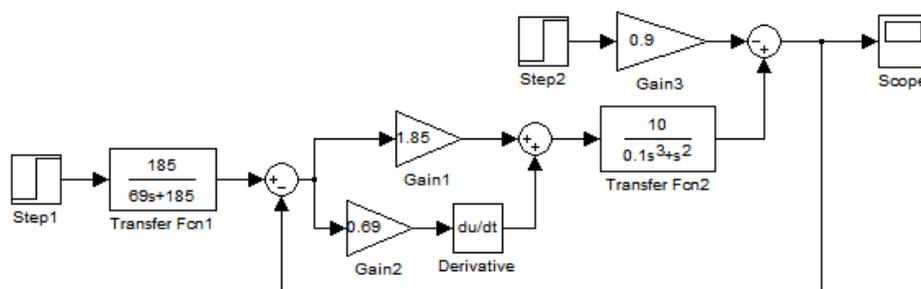


Рис. 9. Схема моделирования системы в среде Simulink

### 3. Алгоритмы управления по диагнозу

На объекты автоматического управления в процессе их функционирования действуют множество факторов, дестабилизирующих работоспособность. Перечень этих факторов зависит как от назначения и конструкции объекта, так и условий его функционирования. Как правило, эти факторы представляют собой дестабилизирующие воздействия, вызванные внешними возмущениями, помехами и шумами, а также внутренними неисправностями, поломками и отказами. Перспективным в современной теории автоматического управления представляется направление адаптации к текущим

нарушениям в работоспособности объектов автоматического управления. Адаптация посредством глубокого диагностирования и гибкого восстановления работоспособности позволяет реализовать современный принцип управления по диагнозу, обеспечивающий рациональное управление объектами автоматического управления [9].

Управление по диагнозу связано с необходимостью цифровой реализации процессов диагностирования и восстановления работоспособности.

Представим математическое описание (1) и (2) объекта автоматического управления в номинальном режиме функционирования с помощью формулы Эйлера в дискретной форме:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ x_3(k+1) \\ x_4(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T_0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & a_{23}T_0 & a_{24}T_0 \\ 0 & 0 & 1+a_{33}T_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1+a_{44}T_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \\ x_4(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ T_0 b_{31} & 0 \\ 0 & T_0 b_{42} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \end{bmatrix}; \quad (30)$$

$$\begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{22} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \\ x_4(k) \end{bmatrix}, \quad (31)$$

здесь  $x_i(k)$  – дискретные значения переменных состояния  $x_i(t)$ ,  $i = \overline{1,4}$ , в аргументах которых для упрощения описания опущен период квантования  $T_0$ ;

$u_i(k)$  и  $y_i(k)$ ,  $i = \overline{1,2}$  – дискретные значения соответствующих переменных описания в пространстве состояний.

Эти уравнения в компактной форме можно представить так:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k); \quad x(k_0) = x_0; \\ y(k) &= Cx(k), \end{aligned} \quad (32)$$

где  $A$ ,  $B$  и  $C$  – матрицы новых коэффициентов;

$x(k)$ ,  $u(k)$  и  $y(k)$  – дискретные значения переменных соответствующих размерностей.

Нештатные режимы функционирования объекта автоматического управления – коромысла с винтовыми электроприводами вызываются, как следует из работы [1], рядом дестабилизирующих воздействий, приводящих к изменению соответствующих коэффициентов матриц. Поставим в соответствие каждому дестабилизирующему воздействию параметр  $\lambda_i$ ,  $i = \overline{1,6}$ , тогда нештатные режимы функционирования можно представить с помощью следующего описания:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_i(k+1) &= A(\lambda_i)\tilde{x}_i(k) + B(\lambda_i)u(k); \\ \tilde{x}(k_0) &= x_0; \quad \tilde{y}_i(k) = C(\lambda_i)\tilde{x}_i(k), \quad i = \overline{1,6}, \end{aligned} \quad (33)$$

где  $\tilde{x}_i(k)$  – 4-мерный вектор дестабилизированных состояний объекта;

$\tilde{y}_i(k)$  – 2-мерный вектор выходных переменных объекта;

$u(k)$  – 2-мерный вектор управляющих воздействий;

$A(\lambda_i)$ ,  $B(\lambda_i)$  и  $C(\lambda_i)$  – матрицы соответствующих размерностей, коэффициенты которых зависят от параметров  $\lambda_i$ .

Для получения полного диагноза о причинах нештатного режима функционирования объекта требуется:

- 1) обнаружить факт появления дестабилизирующего воздействия;
- 2) локализовать фрагмент объекта, где появилось дестабилизирующее воздействие, т.е. найти место его возникновения;
- 3) идентифицировать вид дестабилизации [10].

Обнаружение факта появления дестабилизации осуществляется посредством сравнения выходных сигналов объекта  $\tilde{y}_i(k)$  с их эталонным поведением и последующей классификационной обработкой отклонений. Эталонное поведение в динамике генерируется с помощью эталонной модели. В качестве эталонной модели для коромысла с винтовыми электроприводами выберем дискретное математическое описание, соответствующее по структуре и параметрам номинальному режиму функционирования при нулевых начальных условиях:

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= A\hat{x}(k) + Bu(k); \quad \hat{x}(k_0) = x_0; \\ \hat{y}(k) &= C\hat{x}(k), \end{aligned} \quad (34)$$

где  $\hat{x}(k)$  – 4-мерный вектор эталонного состояния объекта;

$\hat{y}(k)$  – 2-мерный вектор эталонного поведения объекта.

Для классификационной обработки отклонения  $\Delta y(k) = \tilde{y}(k) - \hat{y}(k)$  выберем критерий вида:

$$I = \sum_{k=k_0}^{k_1} |\Delta y(k)|, \quad (35)$$

тогда для установления факта появления в объекте автоматического управления дестабилизации используем двузначный предикат  $z_0$ , обладающий следующим свойством:

$$z_0 = S_2(\delta_0 - I) = \begin{cases} 1, & \text{если } I \leq \delta; \\ 0, & \text{если } I > \delta, \end{cases} \quad (36)$$

где  $S_2(\cdot)$  – символ двузначного предиката;

$\delta_0$  – вектор допустимого порогового значения.

Для двумерного вектора отклонения предикат примет следующий вид:

$$z_0 = S_2 \left\{ \left[ \sum_{k=k_0}^{k_1} |\Delta y_1(k) - \delta_{01}| \right] \wedge \left[ \sum_{k=k_0}^{k_1} |\Delta y_2(k) - \delta_{02}| \right] \right\}, \quad (37)$$

здесь  $\wedge$  – символ конъюнкции.

Развернутую процедуру обнаружения можно представить с помощью структурной схемы (рис. 10).

В этой схеме объект автоматического управления (ОАУ) представлен графическим изображением системы уравнений (33) с векторным аргументом параметров  $\Lambda$ , а эталонная модель (ЭМ) – системой уравнений (34). Ключ Кл формирует подачу разностных сигналов на интервале  $[k_0, k_1]$ , далее формируются модульные значения и их суммирование. В блоке классификации, имеющем нелинейную характеристику, описываемую предикатным уравнением (37), формируется заключение о работоспособном или неработоспособном состоянии ОАУ.

После обнаружения дестабилизации в ОАУ требуется найти место ее возникновения, т.е. произвести локализацию конструктивного фрагмента, не выполняющего свои функции. Для реализации дихотомического поиска нужны диагностические модели [9], связывающие косвенные признаки локализации, доступные измерению, с прямыми признаками, недоступными измерению. Диагностическая модель для датчика угла будет следующей:

$$\Delta y_1(k) = \Delta c_{11} \hat{x}_1(k), \quad (38)$$

где  $\Delta c_{11}$  – прямой признак, соответствующий отклонению коэффициента передачи датчика.

Исходя из предположения о постоянстве признаков на интервале диагностирования, сформируем предикат булевого признака для датчика угла:

$$z_1 = S_2 \left\{ \delta_1 - \left[ \Delta y_1(k+1) \hat{x}_1(k) - \Delta y_1(k) \hat{x}_1(k+1) \right] \right\}; \quad k = \overline{k_1, k_2}; p = 0,9, \quad (39)$$

где  $p$  – коэффициент доверия.

При выполнении условия  $\delta_2 \geq |\cdot|$  в аргументе предиката  $z_2 = 1$ , что означает неработоспособное состояние датчика угла, а при  $\delta_1 < |\cdot|$  –  $z_2 = 0$ , что свидетельствует о работоспособном состоянии датчика угла.

Аналогичным образом, используя диагностические модели для датчика угловой скорости, электроприводов и начального отклонения коромысла, формируются соответствующие предикатные уравнения. Так, для датчика угловой скорости:

$$z_2 = S_2 \left\{ \delta_2 - \left[ \Delta y_2(k+1) \hat{x}_2(k) - \Delta y_2(k) \hat{x}_2(k+1) \right] \right\}; \quad k = \overline{k_2, k_3}; p = 0,9, \quad (40)$$

Булевый признак начального отклонения коромысла от нулевого положения равновесия можно сформировать с помощью следующего предикатного уравнения:

$$z_3 = S_2 \left\{ \delta_3 - \left[ \Delta y_1(k+1) - \Delta y_1(k) \right] \right\}; \quad k = \overline{k_3, k_4}; p = 0,8. \quad (41)$$

Признак изменения инерционных свойств коромысла выражается таким предикатным уравнением:

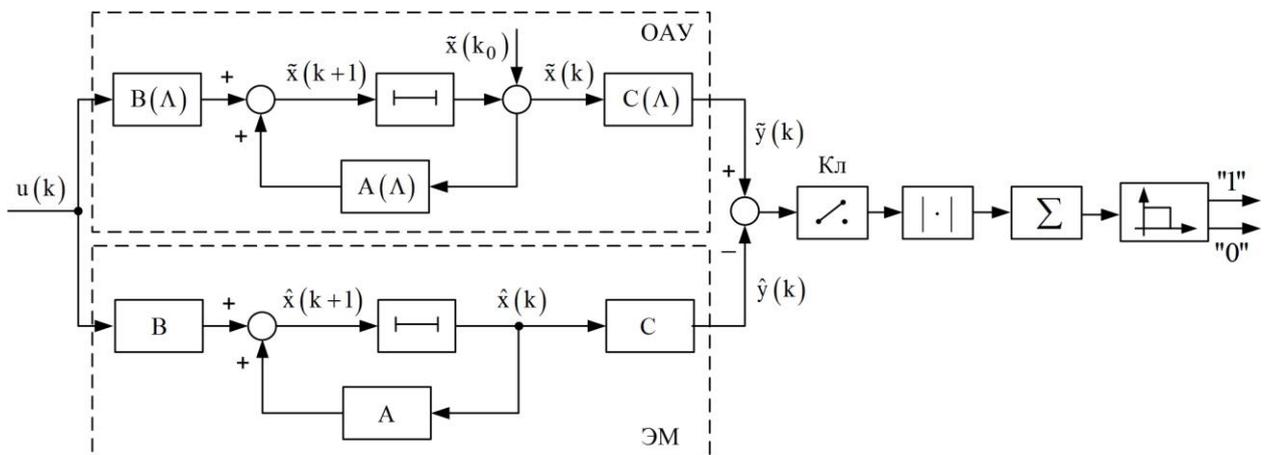


Рис. 10. Структурная схема процедуры обнаружения дестабилизации

$$z_4 = S_2 \left\{ \delta_4 - \left[ \Delta \tilde{y}_2(k+1) - \Delta \tilde{y}_2(k) \right] \times \right. \\ \left. \times \left[ a_{12} \Delta \hat{x}_3(k+1) + a_{13} \Delta \hat{x}_4(k+1) \right] - \right. \\ \left. - \left[ \Delta \tilde{y}_2(k+2) - \Delta \tilde{y}_2(k+1) \right] \times \right. \\ \left. \times \left[ a_{12} \Delta \hat{x}_3(k+1) + a_{13} \Delta \hat{x}_4(k+1) \right] \right\}; \\ k = \overline{k_4, k_5}; p = 0, 9. \quad (42)$$

В этом и в последующих уравнениях использованы коэффициенты математического описания (13), представленного в работе [1].

Для первого электропривода булевый признак формируется с помощью следующего предикатного уравнения:

$$z_5 = S_2 \left\{ \delta_5 - \left[ \Delta x_3(k+2) - \left( 1 - \frac{1}{a'_{21}} \right) \Delta x_3(k+1) \right] u_1(k) - \right. \\ \left. - \left[ \Delta x_3(k+1) - \left( 1 - \frac{1}{a'_{21}} \right) \Delta x_3(k) \right] u_1(k+1) \right\}; \\ k = \overline{k_5, k_6}; p = 0, 9. \quad (43)$$

И для второго электропривода:

$$z_6 = S_2 \left\{ \delta_6 - \left[ \Delta x_4(k+2) - \left( 1 - \frac{1}{a'_{31}} \right) \Delta x_4(k+1) \right] u_2(k) - \right. \\ \left. - \left[ \Delta x_4(k+1) - \left( 1 - \frac{1}{a'_{21}} \right) \Delta x_4(k) \right] u_2(k+1) \right\}; \\ k = \overline{k_6, k_7}; p = 0, 9. \quad (44)$$

После процедуры локализации дестабилизирующих воздействий необходимо перейти к процедурам идентификации их видов, которая заключается в формировании оценочных значений.

Так, при  $z_2 = 1$  необходимо для полного диагноза получить оценочное значение отклонения прямого признака  $\Delta c_{11}$  (38), соответствующего отключению коэффициента передачи датчика угла  $\Delta k_{д1}$ . Простейшей процедурой будет получение среднеарифметического значения отклонений в каждом такте квантования на фиксированном интервале:

$$\Delta \hat{k}_{д1} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{\Delta y_1(k)}{\hat{x}_1(k)}. \quad (45)$$

Аналогичным образом и для датчика угловой скорости:

$$\Delta \hat{k}_{д2} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{\Delta y_2(k)}{\hat{x}_2(k)}. \quad (46)$$

Оценка начального отклонения коромысла формируется так:

$$\hat{x}_0 = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{\Delta y_1(k)}{k_{д1}}.$$

Изменения инерционных свойств коромысла определяется с помощью такого соотношения:

$$\Delta \hat{a}_{11} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{a_{11}^2 [\tilde{y}_2(k+1) - \tilde{y}_2(k)]}{k_{д2} [a_{12} x_3(k) + a_{13} x_4(k)]}. \quad (47)$$

Уменьшение эффективности первого электропривода можно оценить следующим образом:

$$\Delta \hat{a}'_{23} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{a'_{21} \Delta x_3(k+1) - (a'_{21} - 1) \Delta x_3(k)}{a'_{21} u_1(k)}. \quad (48)$$

И для второго электропривода:

$$\Delta \hat{a}'_{33} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{a'_{31} \Delta x_4(k+1) - (a'_{31} - 1) \Delta x_4(k)}{a'_{31} u_2(k)}. \quad (49)$$

Итак, приведенные соотношения позволяют организовать процесс оперативного диагностирования ОАУ и получить полный диагноз: момент появления дестабилизации, дестабилизированный фрагмент и конкретное значение уменьшения эффективности функционирования фрагмента.

На рис. 11 представлена структура дихотомического дерева, позволяющего диагностировать ОАУ.

Приведенные алгоритмы диагностирования, по сути, представляют собой продукционную базу знаний нештатных ситуаций ОАУ. Эта база знаний может расширяться посредством соответствующей обработки появляющихся новых нештатных ситуаций.

После получения полного диагноза необходимо приступить к восстановлению работоспособности ОАУ.

Рассмотрим конкретно. При неисправности датчика угла, обусловленной уменьшением коэффициента передачи на величину  $\Delta k_{д1}$ , восстановить правильные измерения можно с помощью сигнальной подстройки выходного сигнала  $\tilde{y}_1(k)$  на вели-

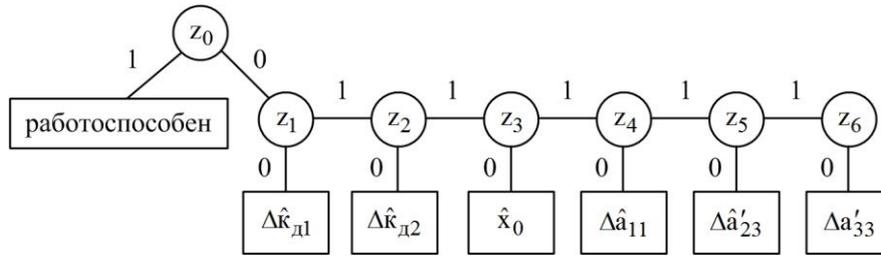


Рис. 11. Дихотомическое дерево диагностирования ОАУ

чину  $\Delta \hat{k}_{д1} \hat{x}_1(k)$  [11]. Аналогично для восстановления работоспособности датчика угловой скорости к выходному сигналу  $\tilde{y}_2(k)$  нужно добавить дополнительный сигнал  $\Delta \hat{k}_{д2} \hat{x}_2(k)$ .

Начальное отклонение коромысла  $x_{10}$  можно компенсировать подачей на соответствующий электропривод импульсное управляющее воздействие, амплитуда и длительность которого определяется знаком и величиной отклонения.

Второй способ компенсации связан с организацией управления по принципу отклонения, т.е. формированием замкнутого контура компенсации начального отклонения.

Изменение инерционных свойств коромысла с винтовыми электроприводами можно компенсировать с помощью формирования ступенчатых управляющих воздействий  $u_1(k)$  и  $u_2(k)$ , параметры которых зависят от величины  $\Delta \hat{a}_{11}$ .

При изменениях коэффициента передачи первого электропривода на величину  $\Delta \hat{a}'_{23}$  восстановить его работоспособность можно с помощью дополнительного воздействия  $\Delta \hat{a}'_{23} u_1(k)$ . Аналогично восстанавливается работоспособность второго электропривода с помощью дополнительного управляющего воздействия величиной  $\Delta \hat{a}'_{33} u_2(k)$ .

Рассмотрим еще один вариант организации рационального управления устройством коромысла с винтовыми электроприводами. Этот вариант связан с формированием двухуровневой системы автоматического управления на первом – нижнем уровне формируется традиционная замкнутая система управления, а на втором – верхнем уровне система управления работоспособностью ОАУ. На рис. 12 представлена функциональная схема такой системы.

В схеме использованы следующие обозначения:  $k$  – коромысло; ДУ – датчик угла; ДУС – датчик угловой скорости; УАУ – устройство автоматического управления; ВЭП<sub>1</sub> и ВЭП<sub>2</sub> – винтовые электроприводы; УДВ – устройство диагностирования и восстановления;  $d_i, i = \overline{1,6}$  – дестабилизирующие воздействия;  $u_{д1}(k)$  и  $u_{д2}(k)$  – корректирующие управляющие воздействия на ВЭПы.

Рациональная двухуровневая система управления функционирует по такой логике. Основной режим работы – это функционирование замкнутого контура, который управляет угловым положением коромысла и парирует малые дестабилизации. При появлении больших дестабилизирующих воздействий включается второй уровень управления, на котором производится диагностирование, т.е. поиск причин нарушения работоспособности в электро-механической части – в ОАУ, а затем по полученному диагнозу формируются в соответствующие

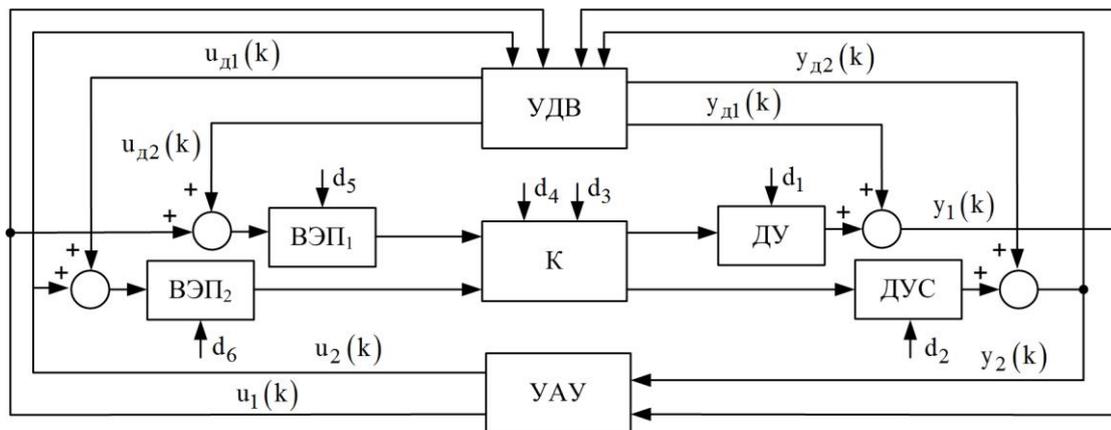


Рис. 12. Функциональная схема двухуровневой системы рационального управления

компоненты корректирующие воздействия, обеспечивающие восстановление работоспособности ОАУ и в целом системы автоматического управления.

#### 4. Аппаратная и программная реализация алгоритмов управления

Макетная установка (см. рис. 1) для исследования динамически подобного углового движения конверто-плана по углу крена представляет собой опору, в верхней точке которой закреплено подвижное коромысло с винтовыми электроприводами на концах.

На оси коромысла (рис. 13) закреплены датчик угла поворота типа SV01A103AE01R00, диск с прорезями и оптический датчик HOA901-12 для измерения угловой скорости коромысла.

Выходы датчиков подключены соответственно к аналоговому и цифровому входам контроллера ARDUINO-NANO-V3.0. Питание винтовых электроприводов – тип 716 осуществляется с помощью двухканального усилителя мощности. Драйвер выполнен с использованием транзисторов TIP122TUTO-220. Для формирования задающего значения угла поворота коромысла используется переменный резистор Epistar DET109, выход которого связан с аналоговым входом контроллера. Напряжение с выхода резистора и датчика угла оцифровывается в контроллере с помощью АЦП. Входные сигналы контроллера преобразовываются по соответствующим алгоритмам в ШИМ сигналы, которые подаются на входы усилителя мощности. Выходные сигналы с усилителя мощности поступают на входы винтовых электроприводов для управления угловым положением коромысла в соответ-

ствии с задающим воздействием. Питание установки осуществляется от аккумулятора BOSSMAN3FM1.3.

На рис. 14 представлена блок-схема программы управления коромыслом по выходу с помощью пропорционально-дифференциального алгоритма.

На рис. 15 приведена программа для контроллера ARDUINO-NANO-V3.0 на языке программирования С.

Макетная установка позволяет реализовать рассмотренные алгоритмы управления, производить их отладку, а также проводить дальнейшие исследования по совершенствованию структуры и параметров системы автоматического управления угловым положением коромысла с винтовыми электроприводами.

#### Заключение

В результате проведенных исследований для математических описаний процесса движения коромысла с винтовыми электроприводами, полученных в работе [1], предложено три подхода к формированию алгоритмов управления. Первый подход заключается в использовании оценок вектора состояния объекта автоматического управления и интегрального критерия взвешенного модуля ошибки. Второй подход базируется на использовании сигналов с датчика угла и угловой скорости и минимизации интегрального критерия от взвешенного модуля ошибки. Третий подход заключается в обеспечении рационального управления объектом автоматического управления, подверженного действию отказов и возмущений. Подход базируется на использовании процедур глубокого диагностирования и восстановления работоспособности.

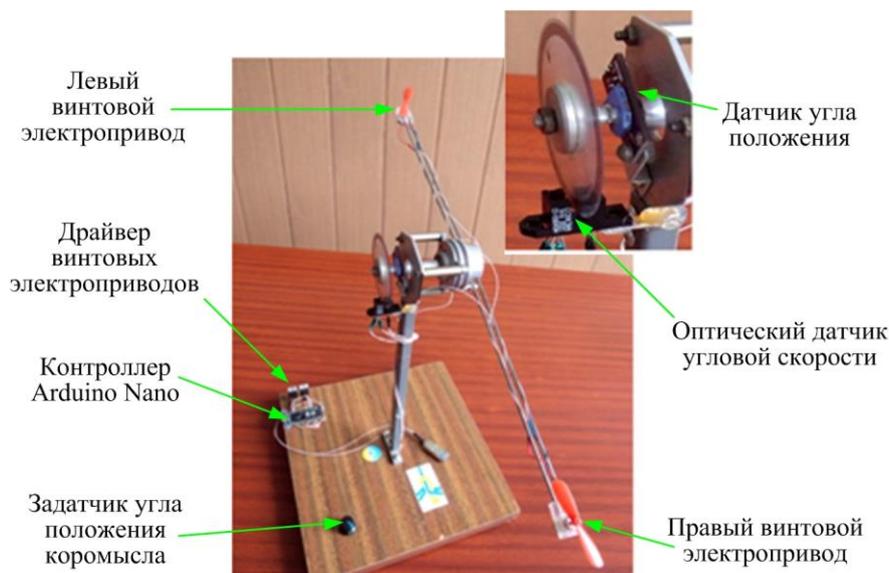


Рис. 13. Устройство макетной установки

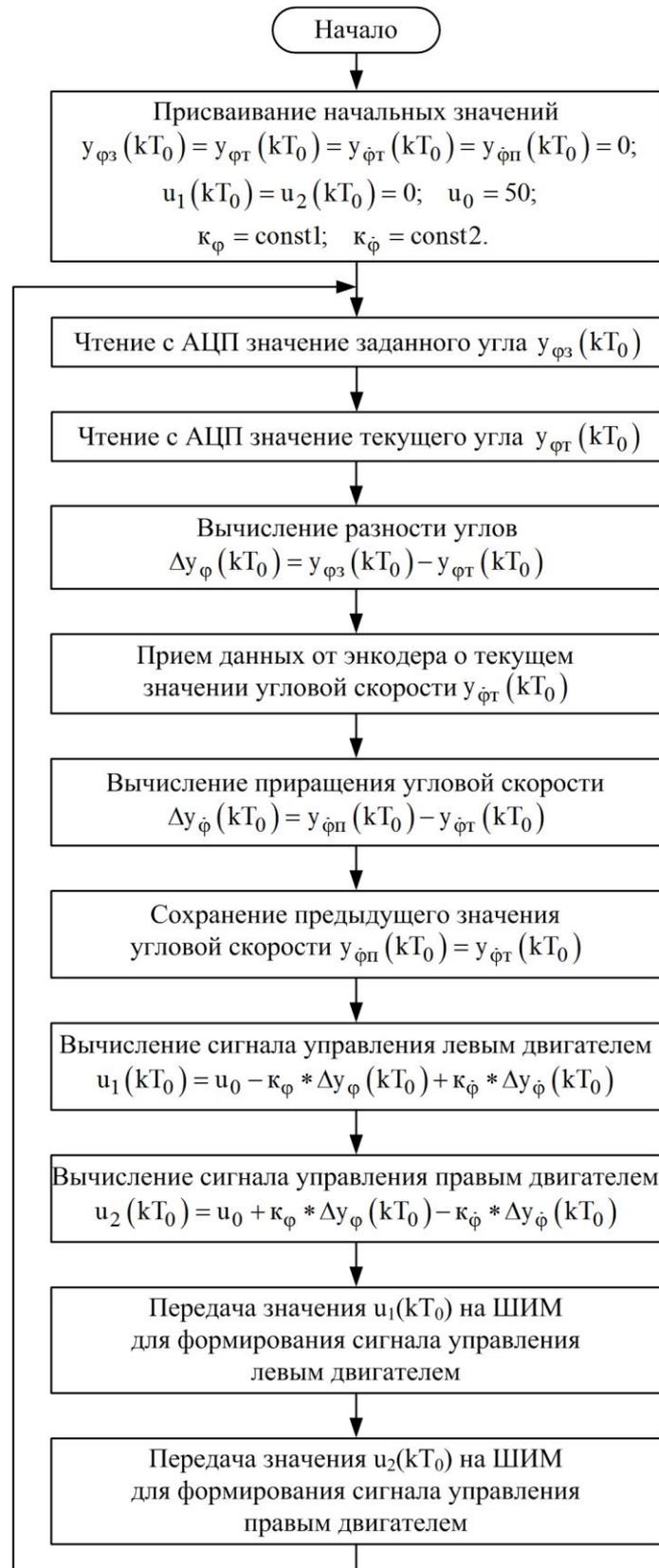


Рис. 14. Блок-схема программы управления коромыслом по выходу с помощью пропорционально-дифференциального алгоритма

Соответствие обозначений переменных в алгоритме и коде программы:

$y_{\varphi_3}(kT_0)$  – rzad;  $y_{\varphi_T}(kT_0)$  – ren;  $y_{\varphi_{enc}}(kT_0)$  – place\_enc;  $y_{\varphi_{pr}}(kT_0)$  – renpr;  $u_0$  – visx;  
 $u_1(kT_0)$  – dl;  $u_2(kT_0)$  – dp;  $\kappa_{\varphi}$  – kf;  $\kappa_{\dot{\varphi}}$  – kfs;  $\Delta y_{\varphi}(kT_0)$  – rzad;  $\Delta y_{\dot{\varphi}}(kT_0)$  – sdif.

Код программы.

```
#include <Wire.h>
// Обработка прерываний от оптического энкодера
boolean CW, CWW;
boolean enc_A, enc_B; // переменные //переменные опроса входа
volatile int place_enc; // переменная
void CW_interrupts() { // обработчик прерывания прерывание INT0
    enc_A = digitalRead(2);
    enc_B = digitalRead(3);
    if (enc_A==enc_B) {
        place_enc=place_enc+1; }
    else place_enc=place_enc-1; }
void CWW_interrupts() { // обработчик прерывания прерывание INT1
    enc_A = digitalRead(2);
    enc_B = digitalRead(3);
    if (enc_A!=enc_B) {
        place_enc=place_enc+1; }
    else place_enc=place_enc-1; }
int ren=0, rzad=0, renpr=0, visx=20;
int dp=0, dl=0;
const int pin3=3, pin9=9;
double sdif=0, kf=1.4, kfs=50;
void setup() {
    attachInterrupt(0, CW_interrupts, CHANGE); // прерывание INT0
    attachInterrupt(1, CWW_interrupts, CHANGE); // прерывание INT1
    Serial.begin(9600);
    pinMode(A0,INPUT); pinMode(A1,INPUT); pinMode(pin3,OUTPUT);
    pinMode(pin9,OUTPUT); }
void loop() {
    ren=analogRead(A0); // опрос энкодера (датчик угла)
    ren=map(ren,800, 280, 10, 170);
    rzad=analogRead(A1); // опрос потенциометра (задающее устройство)
    rzad=map(rzad,1023, 0, 10, 170);
    sdif=renpr-place_enc; // определение угловой скорости
    renpr=place_enc;
    dl = visx*1 - kf*(rzad - ren) + kfs*sdif ;
    dp = visx*1 + kf*(rzad - ren) - kfs*sdif ;
    // Исключение возможных отрицательных значений и ограничение
    // сигналов для электромоторов на уровне 3 В
    if ( dp<0) { dp=0;}
    if ( dl<0) { dl=0;}
    if ( dp>150) { dp=150;}
    if ( dl>150) { dl=150;}
    analogWrite(3,dl); // ЛЕВЫЙ мотор
    analogWrite(9,dp); // ПРАВЫЙ мотор
    //Serial.print((rzad - ren));
    //Serial.print("\t");
    //Serial.println(0); }
```

Рис. 15. Программа для контроллера ARDUINO-NANO-V3.0 на языке программирования C

Полученные результаты могут быть использованы как в учебном процессе при курсовом и дипломном проектировании, так и на этапах эскизного проектирования систем автоматического управления динамически подобными моделями конвертопланов.

### Литература

1. Управленческие модели углового движения коромысла с винтовыми электро-приводами [Текст] / А. С. Кулик, К. Ю. Дергачев, С. Н. Пасичник, Ю. А. Немшилов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2020. – Вып. 3 (163). – С. 4–14. DOI: 10.32620/akt.2020.3.01.
2. Заде, Л. Теория линейных систем : метод пространства состояний [Текст] / Л. Заде, Ч. Дезоер. – М. : Наука, 1970. – 704 с.
3. Дорф, Р. Современные системы управления [Текст] / Р. Дорф, Б. Бишоп. – М. : Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
4. Сю, Д. Современная теория автоматического управления и ее применение [Текст] / Д. Сю, А. Мейер. – М. : Машиностроение, 1972. – 544 с.
5. Справочник по теории автоматического управления [Текст] / под ред. А. А. Красовского. – М. : Наука, 1987. – 712 с.
6. Симонов, В. Ф. Метод пространства состояний в теории непрерывных линейных систем [Текст] : учеб. пособие / В. Ф. Симонов. – Харьков : Харьк. авиац. ин-т, 1983. – 122 с.
7. Калман, Р. Очерки по математической теории систем [Текст] / Р. Калман, П. Фалб, М. Арбит. – М. : Мир, 1971. – 400 с.
8. Методы синтеза систем автоматической стабилизации и позиционирования [Текст] : учеб. пособие / А. Е. Басова, А. С. Кулик, С. Н. Пасичник, Н. Н. Харина. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2019. – 192 с.
9. Кулик, А. С. Элементы теории рационального управления объектами [Текст] : монография / А. С. Кулик. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2016. – 255 с.
10. Кулик, А. С. Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления [Текст] : монография / А. С. Кулик ; Гос. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Харьков : Бизнес Информ, 2000. – 260 с.
11. Рациональное управление объектами: теория и приложения [Текст] : монография / Е. В. Гавриленко [и др.] ; под общ. ред. А. С. Кулика. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2018. – 308 с.

Поступила в редакцию 02.07.2020, рассмотрена на редколлегии 15.08.2020

### УПРАВЛІНСЬКІ МОДЕЛІ КУТОВОГО РУХУ КОРОМИСЛА З ГВИНТОВИМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ

А. С. Кулік, К. Ю. Дергачов, С. М. Пасічник, Ю. О. Немшилов

**Предметом** вивчення в статті є процес формування алгоритмів управління кутовим рухом коромисла з гвинтовими електроприводами. **Метою** є розробка підходів до формування алгоритмів управління кутовим рухом коромисла з гвинтовими електроприводами як об'єкту автоматичного управління. Завдання: конкретизувати процес синтезу алгоритму управління станом для лінійного математичного опису об'єкта автоматичного управління в просторі станів за критерієм мінімуму інтеграла від зваженого модуля похибки. Сформувати структурну схему системи автоматичного управління станом. Удосконалити підхід до розробки алгоритмів управління об'єктами автоматичного управління за виходом для математичного опису в частотній області.

### References

1. Kulik, A. S., Dergachev, K. Yu., Pasichnik, S. N., Nemshilov, Yu. A. *Upravlencheskie modeli uglovogo dvizheniya koromysla s vintovymi elektroprivodami* [Management models of the angular movement of the rocker with helical electric drives]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya – Aerospace technic and technology*, 2020, vol. 3 (163), pp. 4-14. DOI: 10.32620/akt.2020.3.01.
2. Zade, L., Dezoer, Ch. *Teoriya lineinykh system : metod prostranstva sostoyanii* [Linear system theory : the state space approach]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 704 p.
3. Dorf, R., Bishop, R. *Sovremennyye sistemy upravleniya* [Modern control systems]. Moscow, Laboratoriya bazovykh znaniy Publ., 2002. 832 p.
4. Syu, D., Meier, A. *Sovremennaya teoriya avtomaticheskogo upravleniya i ee primeneniye* [The modern theory of automatic control and its application]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 544 p.
5. Krasovskii, A. A. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Handbook of automatic control theory]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 712 p.
6. Simonov, V. F. *Metod prostranstva sostoyanii v teorii nepreryvnykh lineinykh sistem* [The state space method in the theory of continuous linear systems]. Kharkov, Khar'k. aviats. in-t Publ., 1983. 122 p.
7. Kalman, R., Falb, P., Arbib, M. *Ocherki po matematicheskoi teorii sistem* [Topics in mathematical system theory]. Moscow, Mir Publ., 1971. 400 p.
8. Basova, A. E., Kulik, A. S., Pasichnik, S. N., Kharina, N. N. *Metody sinteza sistem avtomaticheskoi stabilizatsii i pozitsionirovaniya* [Synthesis methods for automatic stabilization and positioning systems]. Kharkov, Nats. aerokosm. un-t im. N. E. Zhukovskogo «KhAI» Publ., 2019. 192 p.
9. Kulik, A. S. *Elementy teorii ratsional'nogo upravleniya ob'ektami* [Elements of the theory of rational control of objects]. Kharkov, Nats. aerokosm. un-t im. N. E. Zhukovskogo «KhAI» Publ., 2016. 255 p.
10. Kulik, A. S. *Signal'no-parametricheskoe diagnostirovanie sistem upravleniya* [Signal-parametric diagnosis of control systems]. Kharkov, Biznes Inform Publ., 2000. 260 p.
11. Gavrilenko, E. V., Dergachev, K. Yu., Krasnov, L. A., Kulik, A. S., Martines Bastido, Kh. P., Nemshilov, Yu. A., Parshin, A. P., Pasichnik, S. N., Petrenko, V. I., Chukhrai A. G. *Ratsional'noye upravlenie ob'ektami : teoriya i prilozheniya* [Rational object management : theory and applications]. Kharkov, Nats. aerokosm. un-t im. N. E. Zhukovskogo «KhAI» Publ., 2018. 308 p.

Проілюструвати особливості підходу на конкретному прикладі об'єкту автоматичного управління, представленого передавальними функціями за задавальним та збурним діями. Розробити схему моделювання в середовищі Simulink і дослідити реакції на ступінчасті задавальне та збурне дії. Розробити підхід до формування алгоритмів управління за діагнозом коромислом як об'єктом автоматичного управління. Описати процедуру і засоби глибокого діагностування позаштатних ситуацій об'єкта автоматичного управління. Розробити засоби відновлення працездатності об'єкта автоматичного управління. Використовуваними **методами** є: метод простору станів, метод передавальних функцій, інтегральні критерії оптимальності, методи діагностування та відновлення працездатності. Отримані наступні **результати**: сформовані підходи до формування алгоритмів управління кутовим рухом коромисла з гвинтовими електроприводами з використанням лінійних математичних описів у часовій і частотній областях. **Висновки**. Наукова новизна полягає у формуванні підходів до розробки алгоритмів управління кутовим положенням коромисла з гвинтовими електроприводами, що відрізняються від відомих урахуванням структурних і функціональних особливостей об'єкту автоматичного управління.

**Ключові слова**: коромисло; гвинтовий електропривод; об'єкт автоматичного управління; управління станом; управління за виходом; управління за діагнозом.

## CONTROL ALGORITHM OF ANGULAR MOTION OF THE ROCKER WITH ELECTRIC DRIVE SCREW

*A. Kulik, K. Dergachov, S. Pasichnik, Yu. Nemshilov*

The **subject** of study in the article is the process of forming algorithms for controlling the angular motion of the rocker with a screw electric actuator. The **purpose** is to develop approaches to the formation of algorithms for controlling the angular motion of the rocker with a screw electric actuator as the automatic control object. **Tasks**: to specify the synthesis process of the state control algorithm for a linear mathematical description of the automatic control object in the state space according to the minimum criterion of the integral from the weighted error module. To form the block diagram of the automatic control system by the state. To improve the approach to the development of algorithms for controlling automatic control objects by output for mathematical description in the frequency domain. To illustrate the features of the approach on the specific example of automatic control object represented by transfer functions in terms of references and disturbances. To develop the simulation scheme in Simulink and study the reactions to stepwise references and disturbances. To develop the approach to the formation of control algorithms for the diagnosis of the rocker as the automatic control object. To describe the procedure and means of deep diagnosis of emergency situations of the automatic control object. To develop means of recovery the automatic control object. The **methods** used are the state space method, transfer function method, integral optimality criteria, methods of diagnosing, and recovering. The following **results** were obtained: approaches to the formation of algorithms for controlling the angular motion of the rocker with a screw electric actuator using linear mathematical descriptions in time and frequency domains were formed. **Conclusions**. The scientific novelty lies in the formation of approaches to the development of algorithms for controlling the angular position of the rocker with a screw electric actuator which differs from the known accounting the structural and functional features of the automatic control object.

**Keywords**: rocker; screw electric actuator; automatic control object; state control; exit control; diagnosis control.

**Кулик Анатолій Степанович** – д-р техн. наук, проф., проф. каф. «Системи управління летальних апаратів», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Дергачев Константин Юрьевич** – канд. техн. наук, доц., зав. каф. «Системи управління летальних апаратів», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Пасичник Сергей Николаевич** – канд. техн. наук, доц. каф. «Системи управління летальних апаратів», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Немшилов Юрий Александрович** – канд. техн. наук, доц., доц. каф. «Системи управління летальних апаратів», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Anatoliy Kulik** – Doctor of Technical Science, Professor of the Department «Fly Vehicle's Control Systems», National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: anatolyKulik@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0001-8253-8784.

**Konstantin Dergachov** – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Head of the Department «Fly Vehicle's Control Systems», National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: k.dergachov@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0002-6939-3100.

**Sergey Pasichnik** – Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department «Fly Vehicle's Control Systems», National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: snpasichnik@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0001-7016-8835.

**Yury Nemshilov** – Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department «Fly Vehicle's Control Systems», National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: gnemsh59@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0001-6610-461X.