

УДК 629.7.062.017.1:681.518.5

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ АКТИВНОЙ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО СЕРВОПРИВОДА ПОСРЕДСТВОМ ЗАМКНУТОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

*А.С. Кулик, д-р техн. наук, С.Н. Фирсов*

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

Обеспечивается активная отказоустойчивость пневматического сервопривода посредством замкнутого самодиагностирования и гибкого восстановления обнаруженных отказов привода

\* \* \*

Забезпечено активну відмовостійкість пневматичного сервоприводу шляхом замкнутого самодіагностування та гнучкого відновлення знайдених відмов приводу.

\* \* \*

Active fault-tolerance of pneumatic drive through self-diagnostic and flexible restoring of founded driver's faults is provided.

**Введение.** Для повышения эффективности беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и динамически подобных летательных аппаратов (ДПЛА), снижения затрат на их эксплуатацию в настоящее время широко внедряются цифровые системы автоматического управления (САУ), где в качестве исполнительных приводов используются пневматические сервоприводы (ПСП) [1, 2, 3]. Основное требование, предъявляемое к таким системам, – выполнение предписанных функций в течение ограниченного времени полета с заданными показателями качества, что достигается существенным усложнением систем, которое опережает улучшение характеристик надежности элементов САУ. Поэтому на передний план выдвигается проблема повышения надежности функционирования САУ и ее элементов [1, 4, 5, 6, 7]. Одним из таких элементов является ПСП, динамика которого существенно влияет на динамику всей системы.

В настоящее время существует два пути повышения надежности приводов: первый путь связан с повышением надежности функциональных элементов ПСП, а второй – с обеспечением активной отказоустойчивости ПСП [5, 8, 9].

На данном этапе развития науки и техники незначительное увеличение надежности ПСП приводит к большим затратам на его проектирование и

производство, а также к увеличению его массогабаритных характеристик [1, 4, 6, 8]. Поэтому наиболее перспективным является второй подход, заключающийся в обеспечении активной отказоустойчивости ПСП, путем проведения замкнутого глубокого самодиагностирования и гибкого восстановления отказов [8-10].

**Постановка задачи.** Объектом исследования в данной работе является ПСП, функциональная схема которого показана на рис.1. Принцип действия ПСП заключается в следующем: на сумматор (СМ) поступает напряжение задающего воздействия ( $U_3(t)$ ) и напряжения с потенциометров ( $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$ ) обратной связи ( $U_{\Pi_1}(t)$ ,  $U_{\Pi_2}(t)$ ). Напряжение с выхода сумматора  $U_{СМ}(t)$  является входным для усилителя мощности УМ. Шток рулевой машинки (РМ) отклоняется в зависимости от выходного напряжения УМ ( $U_{УМ}(t)$ ),  $\mu(t)$  – величина отклонения штока.

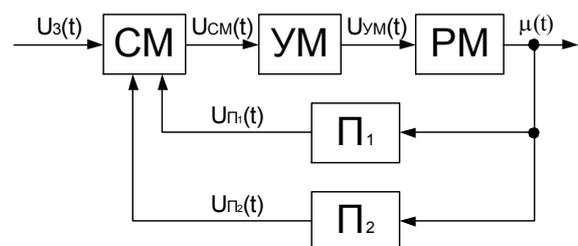


Рис. 1. Функциональная схема пневматического сервопривода

Математическая модель функционирования ПСП в номинальном режиме представлена в виде рекуррентно-разностного уравнения второго порядка (ARX модель) [10, 11]:

$$U_{\Pi}(k+2) = a_1 U_{\Pi}(k+1) + a_2 U_{\Pi}(k) + b_2 U(k), \quad (1)$$

$$\text{где } a_1 = \frac{2T_{PM} - T_0}{T_{PM}}; U_{\Pi}(k) = \frac{U_{\Pi_1}(k) + U_{\Pi_2}(k)}{2};$$

$$b_2 = \frac{T_0^2 K_4 K_{YM} K_{PM} (K_1 K_{\Pi_1} + K_2 K_{\Pi_2})}{T_{PM}};$$

$$a_2 = \frac{T_0 - T_{PM} - T_0^2 K_4 K_{YM} K_{PM}}{T_{PM}}; K_3, K_1, K_2 -$$

коэффициенты усиления сумматора по входам  $U_3(t)$ ,  $U_{\Pi_1}$ ,  $U_{\Pi_2}$ ;  $K_4$  - коэффициент усиления по выходу сумматора;  $K_{YM}$  - коэффициент усиления УМ;  $K_{\Pi_1}$ ,  $K_{\Pi_2}$  - коэффициенты передачи потенциометров;  $K_{PM}$  и  $T_{PM}$  - коэффициент передачи и постоянная времени РМ.

Обеспечение активной отказоустойчивости ПСП в рамках системного подхода базируется на информации о состоянии объекта с заданной глубиной диагностирования и гибкого восстановления обнаруженных отказов [9, 10, 12, 13]. Поэтому в рамках рассматриваемой задачи необходимо решить следующие взаимосвязанные задачи: построение иерархии диагностических моделей (ДМ); обнаружения отказа; поиск места отказа; установление класса отказа; определение вида отказа; подтверждение диагноза и восстановление отказа.

**Диагностическое обеспечение.** Характерной особенностью используемого сигнально-параметрического подхода для диагностирования ПСП является применение концепции ДМ как математического описания, однозначно связывающего косвенные диагностические признаки с прямыми - признаками видов отказов [8, 9, 10, 12, 13]. ДМ объединяются в иерархию: на нижнем уровне находятся ДМ определения вида отказа, а на верхнем - ДМ установления факта появления отказа. Иерархия ДМ строится с нижнего уровня - с моделей для за-

дачи определения вида отказа, и заканчивается на верхнем уровне моделями обнаружения отказов.

Для построения иерархии ДМ в рамках рассматриваемого подхода сформировано множество видов отказов  $D$  каждого функционального элемента и выполнена параметризация множества видов отказов по общности их проявления, т.е. виды отказов каждого подмножества  $D$  объединены в классы, которые характеризуются определенными параметрами и образуют множество классов отказов ПСП [12, 13]:

$$\alpha_{\text{ПСП}} = \{\alpha_{\text{СМ}}, \alpha_{\text{УМ}}, \alpha_{\text{РМ}+\text{П}_1+\text{П}_2}\}, \quad (2)$$

где  $\alpha_{\text{СМ}}, \alpha_{\text{УМ}}, \alpha_{\text{РМ}}, \alpha_{\text{П}_1}, \alpha_{\text{П}_2}$  - подмножества классов отказов СМ, УМ, РМ, П1 и П2 соответственно.

$$\alpha_{\text{СМ}} = \{\tilde{k}_1, \tilde{k}_2, \tilde{k}_3, \tilde{k}_4, \tilde{U}_{\text{СМ}_0}\}, \quad (3)$$

$$\text{где } \{d_4, d_8\} \in \tilde{k}_1; \{d_5, d_9\} \in \tilde{k}_2; \{d_3, d_7\} \in \tilde{k}_3;$$

$$\{d_6, d_{10}, d_{11}\} \in \tilde{k}_4; \{d_1, d_2\} \in \tilde{U}_{\text{СМ}_0}.$$

$$\alpha_{\text{УМ}} = \{\tilde{U}_{\text{УМ}_0}, \tilde{k}_{\text{УМ}}, \tilde{U}_{\text{УМ}_{\min}}, \tilde{U}_{\text{УМ}_{\max}}\}, \quad (4)$$

где

$$\{d_1, d_2\} \in \tilde{U}_{\text{УМ}_0}; \{d_3, d_4, d_5, d_6, d_7, d_8, d_9\} \in \tilde{k}_{\text{УМ}};$$

$$\{d_{10}\} \in \tilde{U}_{\text{УМ}_{\min}} \cup \tilde{U}_{\text{УМ}_{\max}}.$$

$$\alpha_{\text{РМ}+\text{П}_1+\text{П}_2} = \{\tilde{T}_{\text{РМ}}, \tilde{k}_{\text{РМ}}, \tilde{\mu}, \tilde{U}_{\text{П}_0}, \tilde{k}_{\text{П}_1}, \tilde{U}_{\text{П}_2}, \tilde{k}_{\text{П}_2}\}, \quad (5)$$

$$\text{где } \{d_1\} \in \tilde{T}_{\text{РМ}}; \{d_2\} \in \tilde{k}_{\text{РМ}}; \{d_3\} \in \tilde{\mu};$$

$$\{d_4\} \in \tilde{U}_{\text{П}_0}; \{d_5, d_6, d_7, d_8\} \in \tilde{k}_{\text{П}_1}; \{d_9\} \in \tilde{U}_{\text{П}_2};$$

$$\{d_{10}, d_{11}, d_{12}, d_{13}\} \in \tilde{k}_{\text{П}_2}.$$

Определение места отказа ПСП заключается в установлении конструктивно законченного блока, в котором произошел отказ (СМ, УМ, РМ, П1, П2). Для этих целей вводятся параметры  $\beta_i$ , характеризующие отдельные элементы ПСП, перекрывающие все множество видов отказов и классов (2-5):

$$\beta_{\text{ПСП}} = \{\tilde{k}_4, \tilde{k}_{\text{УМ}}, \tilde{T}_{\text{РМ}}, \tilde{k}_{\text{П}_1}, \tilde{k}_{\text{П}_2}\}. \quad (6)$$

Установление факта появления отказа осуществляется сравнением выходов эталонной модели и

выхода ПСП. При трехкратном выходе за допустимые пределы, величины рассогласования  $\Delta y(t)$  инициируется факт появления отказа в приводе. Для определения вида отказа ПСП необходимо переходить от одного уровня иерархии ДМ к другому (от верхнего к нижнему), изменяя совокупности прямых и косвенных признаков отказов. Более общими (и менее конкретными по отношению к множеству  $D$  в полученной иерархии) являются ДМ верхнего уровня, а менее общими (и более конкретными) – ДМ нижнего уровня.

Диагностирование ПСП обычным сигнально-параметрическим подходом [ ] (разомкнутое диагностирование), который не учитывает действия возмущения на объект диагностирования, в некоторых случаях дает ошибочные результаты диагноза. Поэтому необходимо подтверждение диагноза, т.е. применение замкнутого диагностирования, структурная схема которого показана на рис.2.

Подтверждение диагноза осуществляется путем сравнения выхода ПСП и выхода модели возмущенного движения (МВД). МВД – это математическая модель ПСП, параметры которой изменяются в зависимости от вида обнаруженного отказа. Если выходы ПСП и МВД попадают в установленный диапазон, то в ПСП произошел отказ и вид отказа верно определен, в противном случае рассогласование выходов произошло из-за внешнего возмущения, парирование которого осуществляется пропорциональным законом управления, который заложен в конструкцию ПСП (принцип управления по отклонению).

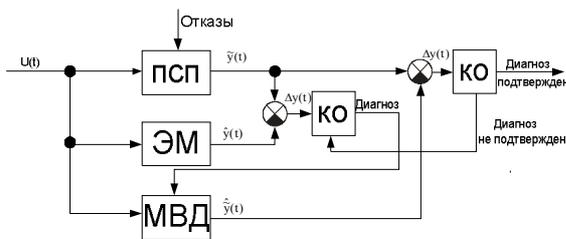


Рис. 2. Структурная схема замкнутого диагностирования

**Восстановление работоспособности.** Для восстановления работоспособности при каждом конкретном виде отказа используется один из следующих ресурсов: 1) параметрическая подстройка; 2) сигнальная подстройка; 3) резервная аппаратура; 4) резервные алгоритмы управления. При параметрической подстройке по определенным алгоритмам подстраиваются параметры, предусмотренные в ПСП или введенные дополнительно. Реконфигурация аппаратуры используется для парирования некомпенсируемых видов отказов путем замены отказавшего функционального элемента привода резервным.

## Заключение

В результате исследования была получена иерархия диагностических моделей, отражающих зависимость отклонения выходных сигналов ПСП от изменения прямых признаков отказов. Наличие таких зависимостей позволяет с помощью математического аппарата исследовать различимость и диагностируемость различных видов отказов, а также их влияние на ПСП. Проведенные экспериментальные исследования показали адекватность ДМ. Полученная иерархия ДМ необходима для определения вида возникшего отказа и осуществления гибкого восстановления работоспособности ПСП с применением имеющейся избыточности (алгоритмической, структурной, аппаратной).

## Литература

1. Кривцов В.С., Карпов Я.С., Федотов М.М. Інженерні основи функціонування і загальна будова аерокосмічної техніки: Підручник для вищих навчальних закладів (напрямок підготовки "Авіація і космонавтики"). Ч.2. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т "Харк. авіац. ін-т", 2002. – 723 с.

2. Алисултанов Ш.М. Коррекция управления полетом легкого дистанционно пилотируемого летательного аппарата в сложных погодных условиях на базе нечеткой логики // Труды IX Международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации». –М.: Научтехлитиздат, 2002. – 462 с.
3. Лебедев М.В. Применение аппарата нечеткой логики для нейросетевого управления частично неработоспособного летательного аппарата // Труды IX Международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации». –М.: Научтехлитиздат, 2002. – 462 с.
4. Безопасность полетов летательных аппаратов / Под ред. Н.М.Лысенко. –К.: Изд-во КВВАИУ, 1989. – 354 с.
5. Неймарк М.С., Цесарский Л.Г. Системный подход в прогнозировании характеристик надежности и безопасности самолетов Ил // Техника, Экономика. Сер. Автоматизация систем управления. – 1994. – Вып.4. – С. 59-66.
6. Васильев В.И., Гусев Ю.А. Автоматический контроль и диагностика систем управления силовыми установками летательных аппаратов. –М.: Машиностроение, 1989. – 322 с.
7. Средства технической диагностики / Под ред. В.В. Клюева. –М.: Машиностроение, 1989. – 342 с.
8. Кулик А.С. Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления. –Харьков: Гос. аэрокосмический ун-т «ХАИ»: Бизнес Информ, 2000. – 260 с.
9. Кулик А.С. Отказоустойчивое управление: состояние и перспективы // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2000. – Вип.15. – С 18-31.
10. Кулик А.С., Фирсов С.Н. Построение диагностических моделей при разработке диагностического обеспечения пневматического сервопривода // Авиационно-космическая техника и технология. – 2002. – Вып.32. – С 35-40.
11. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: Пер с англ. / Под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат.лит., 1991. – 432 с.
12. Кулик А.С., Фирсов С.Н. Построение диагностических моделей при разработке диагностического обеспечения пневматического сервопривода // Авиационно-космическая техника и технология. – 2002. – Вып.32. – С 35-40.
13. Кулик А.С., Фирсов С.Н. Функциональные диагностические модели пневматического сервопривода // Авиационно-космическая техника и технология. – 2002. – Вып.33. – С 214-223.

*Поступила в редакцию 24.03.03*

**Рецензенты:** д-р техн. наук, доцент Соколов А.Ю., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков; канд. техн. наук, нач. отдела Остроумов Б.В., НТ СКБ «ПОЛИСВИТ» ПО «Коммунар», г. Харьков.