

УДК 681.5.015:629.7.05

До Куок Туан¹, С.Н. Фирсов², О.А. Пищухина²¹ Ханойская авиатехническая академия, Ханой, Вьетнам² Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

ПОСТРОЕНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО БЛОКА ДАТЧИКОВ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОЦЕЛЕВОГО САМОЛЕТА

Рассмотрено построение отказоустойчивого блока датчиков угловой скорости на самолете Су-30 с применением сигнально-параметрического подхода, включающего в себя переконфигурацию размещения датчиков на связанных осях, анализ возможности диагностирования технического состояния данного блока и гибкого восстановления его работоспособности на основании полученных результатов диагностирования.

Ключевые слова: отказоустойчивость, диагностирование, резервирование, автоматическое управление, восстановление работоспособности, диагностическая модель, отказ.

Введение

Датчик угловой скорости (ДУС), как известно, является важным элементом в системе автоматического управления летательных аппаратов (ЛА) и предназначен для измерения проекции угловой скорости на собственную ось, преобразования этой информации в электрический сигнал, которая в последующем необходима бортовому вычислителю для формирования управляющих воздействий в соответствующих контурах демпфирования и управления ЛА [1]. При этом необходимо отметить тот факт, что для контуров демпфирования ДУС, в номинальном режиме, является основным источником информации и от качества получаемой информации зависит качество работы контуров демпфирования, а следовательно, и всей системы управления ЛА.

На многоцелевом самолете СУ – 30 в контурах демпфирования и стабилизации применяются десять однотипных ДУС, расположенных следующим образом: три параллельны оси Ox , связанной с корпусом ЛА системы координат, три параллельно оси Oy и четыре параллельно оси Oz . С точки зрения формирования измерительного базиса такое количество измерителей должно обеспечивать парирование семикратных полных отказов ДУС, однако располагаемое размещение датчиков позволяет реализовывать традиционные мажоритарные подходы по схеме два из трех, относительно каждой оси без возможности применения перекрестных избыточностей. Не рациональное использование избыточных измерительных средств в контурах демпфирования определяет актуальность применения перспективного системного подхода к обеспечению отказоустойчивости избыточного блока ДУС многоцелевого самолета, базирующегося на принципах глубокого диагностирования технического состояния измерителей и гибкого восстановления их работоспособности по результа-

там анализа. Предлагаемый подход путем рационального размещения избыточного количества должен позволить не только решать задачи определения частично или полностью не работоспособного ДУС, а парировать множество видов отказов по каждой измерительной оси, путем восстановления измерений неработоспособного ДУС применением перекрестных связей избыточных измерителей.

Математическое описание измерителя угловой скорости в контексте решения задачи диагностирования

ДУС представляет собой датчик первичной информации для контура демпфирования и всей системы автоматического управления в целом. Как уже отмечалось, ДУС измеряет проекцию угловой скорости на ось чувствительности и преобразует ее в электрический сигнал. Для идеализированного варианта, без учета инерционных свойств этот процесс преобразования может быть представлен линейной зависимостью между проекцией угловой скорости на ось чувствительности и выходным электрическим сигналом на его выходе.

Пусть $\omega_x(t)$ – проекция результирующей угловой скорости на ось чувствительности ДУС коллинеарного оси Ox связанной системы координат (рис. 1), а $U_x(t)$ – электрический сигнал на выходе соответствующего ДУС.

Рассмотрим некоторые варианты размещения произвольного ДУС относительно направления вектора угловой скорости.

Первый вариант размещения: ДУС, ось чувствительности которого параллельна оси Ox (рис. 1, а). С учетом линейной зависимости между входом и выходом математическое описание преобразовательных свойств ДУС примет вид: $U_x(t) = k\omega_x(t)$, где k – коэффициент передачи ДУС.

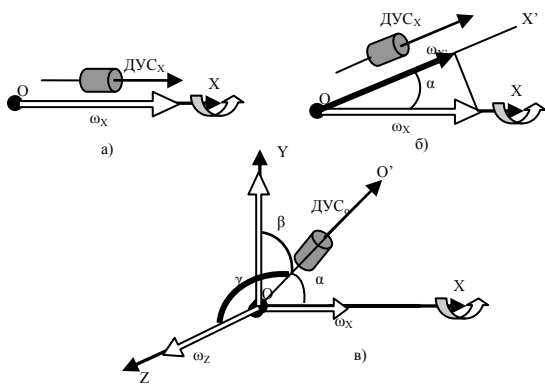


Рис. 1. Размещение ДУСов относительно направления результирующего вектора угловой скорости

Второй вариант размещения: датчик угловой скорости ДУС, ось чувствительности которого находится под углом α к оси Ox (рис.1, б). Математическое описание преобразовательных свойства этого ДУС, с учетом его расположения следующее: $U_x(t) = k\omega_x(t)\cos\alpha$, где α – угол между осью чувствительности датчика и вектором угловой скорости.

Третий вариант – ДУС расположен таким образом, что на его ось чувствительности проецируются проекции результирующего вектора угловой скорости $\omega_x(t)$, $\omega_y(t)$, $\omega_z(t)$, то есть его ось чувствительности располагается под углами α , β , γ к осям Ox , Oy , Oz (рис. 1в). С учетом такого расположения ДУС₀, выходное значения напряжения определимо следующим аналитическим соотношением:

$$U_0(t) = k(\omega_x(t)\cos\alpha + \omega_y(t)\cos\beta + \omega_z(t)\cos\gamma) \quad (1)$$

Если $\alpha = \beta = \gamma$ то выполнив ряд несложных преобразований, легко установить, что $\cos\alpha = \cos\beta = \cos\gamma = 1/\sqrt{3}$, а уравнение (1), примет вид:

$$U_0(t) = k \frac{1}{\sqrt{3}} (\omega_x(t) + \omega_y(t) + \omega_z(t)) \quad (2)$$

Предположим для упрощения выкладок, что в системе применяются одинаковые датчики, причем это имеет место на практике, тогда обоснованно можно предположить, что их коэффициенты с допустимой степенью точности совпадают. Используя сформулированное допущение рассмотрим случай, когда на самолете размещены три однотипных датчик коллинеарных оси Ox , три – оси Oy , а четыре – оси Oz . Для такого расположения ДУСов справедливы следующие аналитические соотношения, отражающие их преобразовательные свойства:

– для оси Ox :

$$U_{x_1}(t) = k\omega_x(t); U_{x_2}(t) = k\omega_x(t); U_{x_3}(t) = k\omega_x(t); \quad (3)$$

– для оси Oy :

$$U_{y_1}(t) = k\omega_y(t); U_{y_2}(t) = k\omega_y(t); U_{y_3}(t) = k\omega_y(t); \quad (4)$$

– для оси Oz :

$$\begin{aligned} U_{z_1}(t) &= k\omega_z(t); U_{z_2}(t) = k\omega_z(t); \\ U_{z_3}(t) &= k\omega_z(t); U_{z_4}(t) = k\omega_z(t). \end{aligned} \quad (5)$$

Из выражений (3) – (5) видно, что включение ДУСов коллинеарных осям связанной системы координат по мажоритарной схеме не позволяет использовать располагаемую избыточность по соответствующим осям для парирования отказов не коллинеарных ДУСов. Например, по оси Ox располагается три ДУС, выходные напряжения которых сравниваются $U_{x_1}(t), U_{x_2}(t), U_{x_3}(t)$ для определения момента времени возникновения отказа и его места, с последующим отключением отказавшего датчика от контура демпфирования, без выяснения причины приведшей к возникновению отказа, а также не используя располагаемый арсенал средств для восстановления отказавшего ДУС. Так же такое расположения ограничено количеством парируемых отказов – один ДУС по двум осям и при удачном стечении факторов – два отказа относительно третьей оси.

Разработка структуры отказоустойчивого блока ДУС

С целью расширения возможности использования располагаемой избыточности для решения задач обеспечения отказоустойчивости избыточного блока ДУС предлагается другая компоновка ДУСов – размещать ДУСы относительно осей связанной системы координат так, как показано на рис. 2. При этом ось чувствительности ДУС₀ располагается коллинеарно диагонали куба, а для углов выполняется условие $\alpha = \beta = \gamma$, что соответствует следующим тождествам: $(\cos\alpha = \cos\beta = \cos\gamma = 1/\sqrt{3})$.

По аналогии с тождествами выражений (3 – 5) и с учетом (2) получим следующие аналитические выражения для описания преобразовательных свойств соответствующих ДУС относительно осей связанной системы координат:

– для оси Ox :

$$U_{x_1}(t) = k\omega_x(t); U_{x_2}(t) = k\omega_x(t); U_{x_3}(t) = k\omega_x(t); \quad (6)$$

– для оси Oy :

$$U_{y_1}(t) = k\omega_y(t); U_{y_2}(t) = k\omega_y(t); U_{y_3}(t) = k\omega_y(t); \quad (7)$$

– для оси Oz :

$$U_{z_1}(t) = k\omega_z(t); U_{z_2}(t) = k\omega_z(t); U_{z_3}(t) = k\omega_z(t); \quad (8)$$

– для оси коллинеарной диагонали куба (OO'):

$$U_0(t) = k \frac{1}{\sqrt{3}} (\omega_x(t) + \omega_y(t) + \omega_z(t)) \quad (9)$$

На основании выражений (6 – 9) получено равенство:

$$U_0(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} (U_{x_i}(t) + U_{y_j}(t) + U_{z_k}(t)), \quad (10)$$

где $i, j, k = (1, 2, 3)$ – как индексы выходных напряжений датчиков.

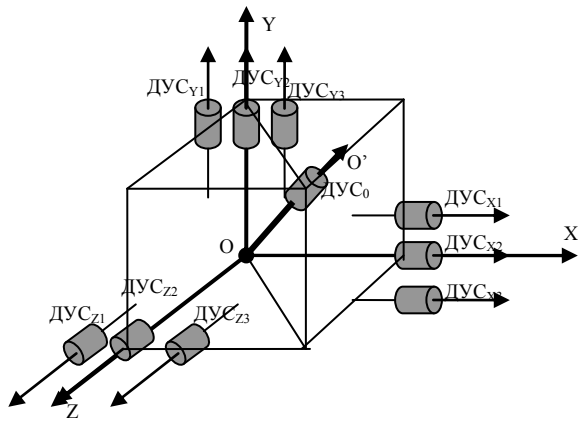


Рис. 2. Перспективное расположение ДУС

На основании выражения (10) легко формируются оценочные значения для решения задач диагностирования и последующего восстановления измерений не работоспособного датчика. Например, оценочное значение для определения значения выходного сигнала ДУС₀ ($\hat{U}_0(t)$) примет вид:

$$\hat{U}_0(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} (U_{x_i}(t) + U_{y_j}(t) + U_{z_k}(t)) \quad (11)$$

Для обнаружения отказа, последующих процессов диагностирования и восстановления работоспособности необходимо оценку $\hat{U}_0(t)$ сравнивать с величиной, получаемой на выходе ДУС₀.

Аналогичным образом имеется возможность формирования оценочных значений датчиков по каждой оси. Таким образом, группы датчиков расположенные на каждой оси, при новом размещении обладают более гибкими связями, которые позволяют применять сигнально-параметрический подход диагностирования с последующим восстановлением отказавшего измерителя по результатам диагноза при наличии более двух и более полных отказов по каждой из осей связанной системы координат.

Обеспечение отказоустойчивости избыточного блока ДУСов

Обеспечение отказоустойчивости технических систем основано на решении двух задач: диагностирования и восстановления. Решение первой задачи рассмотрено выше, а вторая заключается в том, что на основании результатов диагностирования технического состояния, включающего в себя определение мест, а также конкретных видов отказов, формируются соответствующие методы восстановления искаженных измерений, то есть решается задача активного парирования отказов.

Функциональная схема обработки сигналов на выходе блока ДУС с новым расположением измерителей представлена на рис. 3.

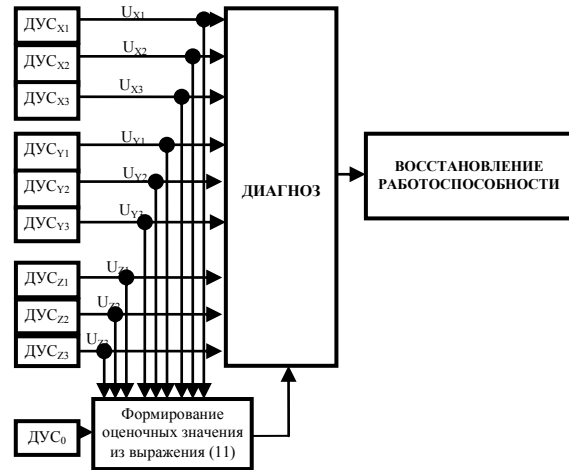


Рис. 3. Функциональная схема обеспечения отказоустойчивости блока ДУС

Техническое состояние блока датчиков определяется по сигналам напряжения пропорциональных проекции результирующего вектора угловой скорости на оси чувствительности датчиков. Достоверность этого сигнала при старом размещении измерителей оценивалась методом сравнения величин на выходах тех датчиков, оси чувствительности которых находятся параллельно одной оси. При новом размещении появляется дополнительный источник информации для оценивания достоверности получаемого сигнала, т.е. сигнал на выходе датчика в одноосной группе не только можно сравнить друг с друга, а и с оценочным значением, применяя аналитическое выражения (11). Так, например, по оси Ох имеет место отказ двух датчиков (ДУС_{x1} и ДУС_{x2}). Для предыдущего размещения нет возможности определить какие из трех датчиков по этой оси отказали. Но применение нового расположения позволяет применением способа попарного сравнения с оценочным значением определить отказавшие датчики, а также устанавливать работоспособные. Это возможно благодаря тому, что формируются оценочные значения для каждого датчика, а это в свою очередь позволяет контролировать достоверность получаемого сигнала на выходе блока.

Для более наглядного отражения преимущества нового размещения сформирована табл.1, в которой представлен анализ функциональных возможностей для каждой схемы размещения для различных видов отказов популярных типов отказа (дрейф, изменение коэффициент передачи) ДУСов.

В таблице, знак «+» означает возможность обеспечения, а знак «-» означает отсутствие возможности обеспечения.

Анализ табл. 1 показывает, что блок ДУС при новом размещении позволяет реализовать более эффективные функциональные возможности для обеспечения отказоустойчивости.

Анализ функциональных возможностей для каждой схемы размещения ДУС

Тип отказа	Наименование функциональных возможностей	Старое размещение	Новое размещение
Дрейф	Обнаружение одного отказа	+	+
	Обнаружение двух отказов	–	+
	Определение места отказа при отказе одного датчика	+	+
	Определение вида отказа при отказе одного датчика	+	+
	Определение места отказа при отказе двух датчиков	–	+
	Определение вида отказа при отказе двух датчиков	–	+
	Восстановление работоспособности при отказе одного датчика	+	+
	Восстановление работоспособности при отказе двух датчиков	–	+
Изменение коэффициента передачи	Обнаружение одного отказа	+	+
	Обнаружение двух отказов	–	+
	Определение места отказа при отказе одного датчика	+	+
	Определение вида отказа при отказе одного датчика	+	+
	Определение места отказа при отказе двух датчиков	–	+
	Определение вида отказа при отказе двух датчиков	–	+
	Восстановление работоспособности при отказе одного датчика	+	+
	Восстановление работоспособности при отказе двух датчиков	–	+

Заключение

Предлагаемое расположение измерителей в блоке ДУС многоцелевого самолета Су – 30МК2, не требующее изменения исходного количества датчиков, позволяет не только решать задачи глубокого диагностирования, но и обеспечивает отказоустойчивое измерение угловой скорости.

Список литературы

1. Проектирование систем управления объектов ракетно-космической техники. Т. 1. Проектирование систем управления ракет-носителей [Текст]: учебник в 3 т. / Ю.С. Алексеев, Ю.Е. Балабей, Т.А. Барышникова и др.; – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", НПП Хартрон-Аркос, 2012. – 578 с.
2. Диагностирование бесплатформенной инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата с глубиной до места отказа [Текст] / А.С. Кулик, С.Н. Фирсов, До Куок Туан, О.Ю. Златкин // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2008. – № 1 (28). – С.75 – 81.

3. Восстановление измерений навигационной системы в режиме реального времени [Текст] / А.С. Кулик, С.Н. Фирсов, До Куок Туан, О.Ю. Златкин // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2008. – № 5 (52). – С. 28 – 33.

4. Фирсов, С.Н. Построение отказоустойчивого измерительного блока акселерометров бесплатформенной навигационной системы беспилотного летательного аппарата [Текст] / С.Н. Фирсов, До Куок Туан, О.Ю. Златкин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 1 (48). – С. 5-10.

5. Кулик, А.С. Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления [Текст] / А.С. Кулик. – Х.: Гос. аэрокосм. ун-т «ХАИ»; Бизнес Информ, 2000. – 260 с.

Поступила в редакцию 8.01.2013

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

ПОБУДОВА ВІДМОВСТІЙКОГО БЛОКА ДАТЧИКІВ КУТОВИХ ШВИДКОСТЕЙ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БАГАТОЦІЛЬОВОГО ЛІТАКА

До Куок Туан, С.М. Фірсов, О.О. Піщухіна

Розглянуто побудову відмовостійкого блоку датчиків кутової швидкості на літаку Су -30 із застосуванням сигнально-параметричного підходу, що містить в собі перекомпонування розміщення датчиків на пов'язаних вісях, аналіз можливості діагностування технічного стану даного блоку і гнучкого відновлення його працездатності виходячи з результатів діагностування.

Ключові слова: відмовостійкість, діагностування, резервування, автоматичне управління, відновлення працездатності, діагностична модель, відмова.

FORMING OF FAULT-TOLERANT BLOCK OF ANGULAR VELOCITY SENSORS OF MULTI-PURPOSE AIRCRAFT CONTROL SYSTEM

Do Quok Tuan, S.N. Firsov, O.A. Pishchukhina

The forming of fault-tolerant block of angular velocity sensors of aircraft Su -30 with the use of signal-parametric approach, which includes repackaging of sensor on connected axes, the analysis of diagnosis possibility of the technical state of the block and flexible restore of it's operating activity on the basis of diagnosis.

Keywords: fault tolerance, diagnostics, redundancy, automatic control, restoration, diagnostic model, fault.