УДК 629.7.051

А.И. Пономарев, М.Ю. Сорокин

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОТНО-СКОРОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ В СИСТЕМЕ

Пономарев Артём Игоревич, окончил Ульяновский государственный технический университет по специальности «Приборостроение», аспирант кафедры «Измерительно-вычислительные комплексы» УлГТУ. Область научных интересов – разработка аэрометрического оборудования. [e-mail: artem_lsp@mail.ru].

Сорокин Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, окончил УлГТУ по специальности «Авиационные приборы и измерительно-вычислительные комплексы». Доцент кафедры «Измерительно-вычислительные комплексы» УлГТУ. Область научных интересов – разработка аэрометрического оборудования. [e-mail: minich80@mail.ru].

Аннотация

Система воздушных сигналов (СВС) современных летательных аппаратов (ЛА) представляет собой программно-аппаратную систему, предназначенную для измерения, вычисления и выдачи на индикацию экипажу ЛА и в бортовые системы (потребителям) информации о высотно-скоростных параметрах, а также о других параметрах, таких как: температура воздуха, углы атаки и скольжения.

Одними из важнейших параметров полета ЛА являются его скорость и высота. В основу принципа действия современных бортовых средств измерения параметров движения ЛА в воздушной среде положен аэрометрический метод.

В данной статье рассмотрен способ повышения точности и достоверности измерения аэродинамического угла атаки.

Ключевые слова: измерение, давление, приемник, датчик, воздушные параметры, угол атаки, летательный аппарат, математическая модель, система воздушных сигналов.

doi: 10.35752/1991-2927-2021-2-64-18-22

INTEGRATION OF THE MEASURED ALTITUDE-SPEED PERFORMANCES IN THE SYSTEM

Artem Igorevich Ponomarev, graduated from Ulyanovsk State Technical University with a degree in Instrumentation; Postgraduate Student at the Department of Measuring and Computing Systems of UISTU; his research interests are in the field of designing aerometric equipment. e-mail: artem_lsp@mail.ru.

Mikhail Iurevich Sorokin, Candidate of Sciences in Engineering; graduated from UISTU with a degree in Aviation Devices and Measuring-Calculating Complexes; Associate Professor at the Department of Measuring and Computing Systems of UISTU; his research interests are in the field of aerometric equipment development. e-mail: minich80@mail.ru.

Abstract

The air data system used by modern aircrafts is a soft hardware designed to measure, compute, and display the altitude-speed performances as well as other parameters such as air temperature, angles of attack and slip; and to provide to aircrew and consumers (various on-board systems) with this information.

The speed and altitude are one of the most important flight parameters of an aircraft. The operating principle of modern on-board equipment for measuring the aircraft movement parameters while in flight is based on an aerometric method.

This article deals with a method for increasing the accuracy and the reliability of aerodynamic angle-of-attack measurements.

Keywords: measurement, pressure, pressure probe, sensor, air data, angle of attack, aircraft, mathematical model, air data system.

ВВЕДЕНИЕ

Известна система измерения высотно-скоростных параметров (СИВСП), структурная схема которой показана на рисунке 1. В отличие от классической архитектуры системы воздушных сигналов (СВС), в которой для измерения аэродинамических углов атаки и скольжения используются флюгерные датчики аэродинамических углов (ДАУ), данная система построена на многофункциональных приемниках воздушных давлений (ПВД) [1]. В ней углы вычисляются по перепаду давлений на ПВД

Система включает в себя два измерителя воздушных данных (ИВД), каждый из которых обрабатывает четыре давления, воспринятых ПВД: полное давление P_p , статическое давление P_c и два давления для определения угла атаки $P_{\alpha 1}$ и $P_{\alpha 2}$.

Каждый ИВД состоит из двух вычислителей, при этом один из ИВД только измеряет воспринимаемые воздушные давления и передает значения измеренных давлений в другой ИВД (условно обозначим «ведомый–ведущий») в цифровом виде. Для корректного

измерения высотно-скоростных параметров и аэродинамических углов ИВД должны располагаться на противоположных бортах [2, 3]. Таким образом, в алгоритмах вычисления высотно-скоростных параметров используются все восемь воспринятых давлений.

Инструментальные погрешности измерения аэродинамического угла атаки при использовании флюгерного ДАУ и многофункционального ПВД приблизительно одинаковые и составляют порядка $0,25^\circ$ при скоростях больше 150 км/ч [4].

Рассмотрим возможность объединения двух разнородных по своей физической природе сигналов аэродинамического угла атаки с целью повышения точности и достоверности измеряемого параметра.

ДАУ флюгерного типа предназначен для измерения местного угла атаки (скольжения), т. е. угла, определяемого направлением воздушного потока вблизи самолета и продольной осью фюзеляжа, и выдачи электрического сигнала, пропорционального этому углу [5, 6]. Типовые технические характеристики ДАУ приведены в таблице 1.

Рис. 1. Структурная схема канала СИВСП

Таблица 1

Основные технические данные ДАУ

Значение	Параметр
Суммарный угол отклонения флюгера, град	120
Количество бесконтактных синусно-косинусных трансформаторов (БСКТ), шт.	2
Погрешность измерения угла во всем диапазоне измерения в пределах, град	0,25
Электропитание цифровой части и обогрева корпуса датчика осуществляется от двух независимых каналов вторичной системы электроснабжения (СЭС) постоянного тока с номинальным напряжением, В	28
Электропитание обогрева флюгера датчика осуществляется от одной системы электроснабжения постоянного тока с номинальным напряжением, В	28
Мощность, потребляемая датчиком по цепи питания постоянного тока напряжением 28 В, Вт, не более	355
Момент трения на оси флюгера при нормальных климатических условиях должен быть, Н·м (г·м), не более	0,005 (50)

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО УГЛА

Для оценки погрешности измерения угла атаки прием следующую зависимость истинного угла атаки $\alpha_{ист}$ от среднего значения местных углов атаки $\alpha_{мест}$:

$$\alpha_{ист} = 3,3 + 0,54 \cdot \alpha_{мест}. \quad (1)$$

Пример изменения истинного угла атаки $\alpha_{ист}$, вычисленного по записанным в полете значениям местных углов атаки $\alpha_{мест}$, приведен на рисунке 2.

Рис. 2. Зависимость истинного угла атаки $\alpha_{ист}$ от времени

Рис. 3. Зависимость местного угла атаки $\alpha_{мест}$ правый от времени

Рис. 4. Зависимость местного угла атаки $\alpha_{мест}$ левый от времени

При переходе к вычислению истинного угла атаки $\alpha_{ист}^*$ по отдельности от левого местного угла атаки $\alpha_{лев}$ и правого угла атаки $\alpha_{прав}$ выражения будут записаны следующим образом:

$$\alpha_{ист} = f(\alpha_{лев}) = a_1 + b_1 \cdot \alpha_{лев}, \quad (2)$$

$$\alpha_{ист} = f(\alpha_{прав}) = a_2 + b_2 \cdot \alpha_{прав}. \quad (3)$$

Аппроксимация по методу наименьших квадратов дает следующие значения коэффициентов a_1, b_1, a_2, b_2 :

$$\alpha_{ист} = f(\alpha_{лев}) = 4,4889 + 0,5716 \cdot \alpha_{лев}, \quad (4)$$

$$\alpha_{ист} = f(\alpha_{прав}) = 4,8047 + 0,5362 \cdot \alpha_{прав}. \quad (5)$$

На рисунках 3, 4 показано изменение местных углов атаки: левый местный угол атаки $\alpha_{лев}$ и правый угол атаки $\alpha_{прав}$. Эти углы показаны на том же временном интервале, что и истинный угол атаки на рисунке 1. Для рассматриваемого участка полета среднеквадратическое отклонение (СКО) истинного угла атаки составляет $\sigma = 0,0457$.

На рисунке 5 показаны истинный угол атаки по формулам (1) и (4), а ошибка аппроксимации при применении функции первого порядка приведена на рисунке 6.

Далее обратимся к измерению угла атаки по перепаду давлений. Каждый ПВД воспринимает два воздуш-

Рис. 5. Зависимость полинома 1-й степени $\alpha_{мест}$ общего и $\alpha_{ист}$ от времени

Рис. 6. Ошибка аппроксимации полиномом 1-й степени $\alpha_{мест}$ общего

ных давления – на нижней стороне стойки и на верхней стороне стойки. На рисунке 7 приведены воспринятые воздушные давления $P_{\text{верх}}$, $P_{\text{низ}}$ на стойке для того же рассматриваемого временного диапазона. Выполним аппроксимацию перепада давлений полиномом 2-й, 3-й и 4-й степеней.

Аппроксимация зависимости истинного угла атаки $\alpha_{\text{ист}}^*$ полиномами 2-й, 3-й и 4-й степеней заключается в определении полинома следующего вида:

$$\alpha_{\text{ист}}^* = \sum_{i,j=0}^n P_{\text{верх}}^i \cdot P_{\text{низ}}^j \cdot K_{i,j}, \quad (6)$$

где $P_{\text{верх}}$, $P_{\text{низ}}$ – воспринятые воздушные давления на стойке, Па;

K – коэффициент слагаемого;

i, j – степень слагаемых.

Рис. 7. Давления $P_{\text{верх}}$, $P_{\text{низ}}$ на верхней и нижней сторонах стойки левого ПВД

На рисунке 8 показаны истинный угол атаки $\alpha_{\text{ист}}^*$ по результатам аппроксимации перепада давлений и истинный угол атаки, измеренный по показаниям ДАУ, где видно хорошее совпадение измеренных углов атаки двумя разными способами.

На рисунке 8 показан аппроксимированный полиномом 4-й степени по давлениям левого ПВД угол атаки в сравнении с углом атаки, измеренным ДАУ.

Погрешность измерения угла атаки по перепаду дав-

Рис. 8. Аппроксимированный полиномом 4-ой степени угол атаки и угол атаки, измеренный ДАУ

Рис. 9. Погрешность измерения угла атаки левым ПВД при аппроксимации

лений левого ПВД с использованием аппроксимации показана на рисунке 9. Видно, что погрешность измерения достигает величин $0,25^\circ$, что является недостаточным для измерения угла атаки, поэтому увеличение порядка полинома позволяет уменьшить получаемую погрешность измерения.

Следующим шагом является объединение двух местных измеренных углов по перепаду давлений и по показаниям ДАУ в одной зависимости.

Далее на рисунке 10 показан угол атаки, аппроксимированный полиномом 4-ой степени, с использованием двух указанных углов, а на рисунке 11 – погрешность

Рис. 10. Изменение аппроксимированного полиномом 4-й степени $\alpha_{\text{ист}}$ и $\alpha_{\text{ист}}$ эталонное

Рис. 11. Ошибка аппроксимации полиномом 4-ой степени $\alpha_{\text{ист}}$

измерения. Видно, что при использовании полинома более высокой степени погрешность измерения уменьшается до величины порядка $0,15^\circ$.

СРАВНЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В таблице 2 представлены математические ожидания и СКО погрешности измерения истинного значения угла атаки для различных вариантов применяемых функций, отличающихся используемыми параметрами и степенью полинома. Оценка проведена для рассматриваемого участка полета.

Таблица 2

Математические ожидания
и СКО измерения угла атаки

Применяемая функция	Математическое ожидание	СКО (σ)
$f(\alpha_{\text{лев}})$	$-8,4339 \cdot 10^{-13}$	0,0457
$f(\alpha_{\text{прав}})$	$-8,4302 \cdot 10^{-14}$	0,0434
$f^2(\alpha_{\text{лев}} \cdot \alpha_{\text{прав}})$	$6,9566 \cdot 10^{-13}$	0,0275
$f^3(\alpha_{\text{лев}} \cdot \alpha_{\text{прав}})$	$2,1322 \cdot 10^{-12}$	0,0267
$f^4(\alpha_{\text{лев}} \cdot \alpha_{\text{прав}})$	$9,9981 \cdot 10^{-12}$	0,0266

Из таблицы 2 видно уменьшение СКО при увеличении степени применяемого полинома для аппроксимации двух измеряемых углов атаки (по перепаду давлений и измеряемого ДАУ).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный способ комплексирования позволяет получить СКО погрешности измерения истинного угла атаки на уровне 0,0266, что на 0,0191 меньше, чем имеющийся способ вычисления истинного угла атаки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключев Г.И., Макаров Н.Н., Солдаткин В.М. Авиационные приборы и системы : учеб. пособие / под ред. В.А. Мишина. Ульяновск : УлГТУ, 2000. 343 с.
2. ГОСТ 22837-77. Оборудование самолетов и вертолетов пилотажно-навигационное бортовое. Термины и определения. М. : Изд-во стандартов, 1978. 10 с.
3. Алмазов В.В., Макаров Н.Н., Сорокин М.Ю. Оценка характеристик аэрометрических систем // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19, № 1 (2). С. 385–390.
4. Dubinina M.M., Sorokin M.Y. Influence numerical schemes to estimate error of air pressure probe // 29th

Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS-2014). URL: http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2014/data/papers/2014_0687_paper.pdf (дата обращения: 05.04.2021).

5. Авиационные приборы, измерительно-вычислительные системы и комплексы. Принципы построения, алгоритмы обработки информации, характеристики и погрешности : учеб. пособие / В.М. Солдаткин [и др.] ; под ред. В.М. Солдаткина ; Казан. нац. исслед. техн. ун-т им. А.Н. Туполева – КАИ. Казань : КГТУ, 2014. 525 с.

6. Кучерявый А.А. Бортовые информационные системы : Курс лекций / под. ред. В.А. Мишина и Г.И. Ключева. 2-е изд., перераб. и доп. Ульяновск : УлГТУ, 2004. 504 с.

REFERENCES

1. Kliuev G.I., Makarov N.N., Soldatkin V.M. *Aviatsionnye pribory i sistemy*. Ucheb. posobie pod red. V.A. Mishina [Aviation Devices and Systems. Tutorial, ed. Mishin V.A.]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2000. 343 p.
2. GOST 22837-77. *Oborudovanie samoletov i vertoletov pilotazhno-navigatsionnoe bortovoe. Terminy i opredeleniia* [State Standard 22837-77. Airborne Control Navigation Equipment. Terms and Definitions]. Moscow, Standard Publ., 1978.
3. Almazov V.V., Makarov N.N., Sorokin M.Iu. Otsenka kharakteristik aerometricheskikh sistem [Evaluation of Aerometric System Characteristics]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Proc. of Samara Research Center of the Russian Academy of Sciences], 2017, vol. 19, no. 1(2), pp. 385–390.
4. Dubinina M.M., Sorokin M.Iu. Influence Numerical Schemes to Estimate Error of Air Pressure Probe. *Proc. of 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS-2014)*. Available at: http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2014/data/papers/2014_0687_paper.pdf (accessed 05.04.2021).
5. Soldatkin V.M. et al. *Aviatsionnye pribory, izmeritelno-vychislitelnye sistemy i komplekсы. Printsipy postroeniia, algoritmy obrabotki informatsii, kharakteristiki i pogreschnosti*. Ucheb. posobie pod red. V.M. Soldatkina [Aircraft Equipment, Measuring and Computing Systems and Complexes. Design Concept, Information Processing Algorithms, Characteristics and Errors. Tutorial ed. V.M. Soldatkin]. Kazan, KSTU Publ., 2014. 525 p.
6. Kucheriavyi A.A. *Bortovye informatsionnye sistemy i komplekсы*. Kurs lektzii pod red. V.A. Mishina i G.I. Kliueva, 2-e izd. pererab. i dop. [Onboard Information Systems and Complexes. Course of Lectures, eds. V.A. Mishin and G.I. Kliuev. 2nd ed. revised and enlarged]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2004. 504 p.