

**Gazarhanov Enver Taptyg oglu** – e-mail: mail@naa.edu.az; phone: +994502004717; vice-rector, dr. of eng. sc.

**Garayev Gadir Isachan oglu** – e-mail: qedir71@mail.ru; phone: +994703218115; engineer of electronics.

УДК 621.3.013: 629.054

**А.З. Бадалов, Р.Н. Набиев, А.З. Мамедов, С.А. Шукюров**

### **АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ДАТЧИКА ВЕРТИКАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА МАГНИТНОЙ ЛЕВИТАЦИИ**

*Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований погрешности системы магнитной левитации, предназначенной для измерения вертикальной скорости летательного аппарата. Приведены, разработанная измерительная схема датчика вертикальной скорости летательного аппарата на основе магнитной левитации и результаты практических измерений, а также построенный график зависимости выходной мощности датчика Холла от расстояния между магнитным сердечником и датчиком Холла. Экспериментальные исследования проводились с использованием стандартных измерительных приборов удовлетворяющих требования ГОСТ 8.401-80, ГОСТ 8.508-84 и ГОСТ 12997-89. Расчёты для оценки погрешности исследуемого датчика проведены с использованием теории вероятности и математической статистики. Абсолютная и случайная погрешности датчика прибора, измеряющего вертикальную скорость на основе магнитной левитации, рассчитываются на 10 исследуемых точках по средней линии, при количестве измерений  $n=80$ , для случая, когда вероятность надёжности  $P = 0,97$ . По результатам проведённых измерений определены приведённая основная погрешность, а также пределы надёжности датчика измерителя вертикальной скорости, на основе магнитной левитации. Определено, что среднеквадратическое отклонение датчика составляет  $\sigma = 0,004$  В, а основная приведённая погрешность  $\gamma = \pm 0,2$  %.*

*Вертикальная скорость; левитация; соленоид; погрешность.*

**A.Z. Badalov, R.N. Nabiyev, A.Z. Mammadov, S.A. Shukyurov**

### **ANALYSIS OF VERTICAL SPEED COUNTER ERRORS OF THE AIRCRAFT BASED ON THE MAGNETIC LEVITATION PRINCIPLES**

*The article presents the results of experimental and theoretical research of magnetic levitation system error, intended to measure the vertical speed of the aircraft. Are developed by measuring the vertical sensor circuit speed an aircraft based on magnetic levitation and the results of practical measurements and also built a plot of power output Hall sensor from a distance between magnetic core and the Hall sensor. Pilot studies were carried out using standard measuring instruments meet the requirements of GOST 8.401-80, GOST 8.508-84 and GOST 12997-89. Calculations to estimate the error of the sensor is made using probability theory and mathematical statistics. Absolute and random error of sensor device, measure the vertical speed based on magnetic levitation, calculated on 10 of the points on the middle line, with the number of measurements  $n = 80$ , for the case where the reliability probability  $P = 0,97$ . According to the results of the measurements are given a basic error limits gauge vertical speed reliability, based on magnetic levitation. Determined that the sensor is the standard deviation  $\sigma = 0,005$ , and basic reduced error of  $\gamma = \pm 0,2$  %.*

*Vertical speed; levitation; solenoid; error.*

Для определения точности прибора вертикальной скорости на основе магнитной левитации, в первую очередь, весьма важно исследование погрешности его измерения. Как известно, основная часть датчика этого прибора состоит из системы магнитной левитации. По результатам экспериментов, проведенных в этой системе, должны быть исследованы ожидаемые приведенные основные погрешности и границы интервала надежности.

Как известно, класс точности может указываться, в зависимости от характера изменения, в пределах диапазона измерения  $\Delta$  – абсолютных,  $\delta$  – относительных или  $\gamma$  – приведенных погрешностей, а также в зависимости от условий применения и назначения конкретного вида измерительного средства (ГОСТ 8,401-80 [1]).

Для определения погрешности измерительного средства необходимо проведение специальных исследований. Чем выше класс точности, тем большее число исследуемых точек необходимо выбрать. Для рабочего измерительного средства количество исследуемых точек выбирается 5 или 6, их количество и расположение должны соответствовать требованиям ГОСТ 8.508-84 [2].

На каждой выбранной точке измерительного диапазона прибора проводится определенное количество измерений. Если количество измерений не определено, то в этом случае их должно быть не менее 10. Для увеличения надежности результатов измерения увеличивается количество измерений [3, 4].

Отметим, что количество измерений зависит от вероятности надежности  $P$ , которое увеличивается по мере увеличения  $P$ , и от допустимой погрешности среднеквадратического отклонения  $\Delta\sigma$ , которое увеличивается по мере уменьшения  $\Delta\sigma$ .

Табличные значения для нормального закона распределения  $n = f(P, \Delta\delta)$  приведены в стандартах ГОСТ 8.508-84 [2].

Проведены исследования работы магнитного подвеса, являющегося основной частью авиационного топливомера на основе магнитной левитации [5]. Были исследованы такие параметры, как выходная мощность магнитного подвеса, мощность, применяемая к соленоиду и ток, проходящий через него, в зависимости от расстояния между магнитным сердечником и датчиком Холла.

Принимая во внимание то, что по конструктивным параметрам датчик прибора измерителя вертикальной скорости, работающий на основе магнитной левитации и датчик исследуемого счетчика схожи, нами может быть определена точность измерения прибора. Измерительная схема испытуемой установки представлена на рис. 1. Установка состоит из: имеющих одинаковые силовые характеристики датчиков А и Б, узла тяги, состоящей из соленоидов 2 и 8 вертикально установленных вне, и постоянных магнитов цилиндрической формы 1 и 7, размещенных в противоположных направлениях внутри магнитопрозрачной трубки 13, изготовленной из немагнитного материала, сетчатых перегородок 6, сетчатых крышек 4 и 10, датчиков Холла 3 и 9, измеряющих состояние левитации магнитов, электронных блоков 5 и 11 и термистора 14.

Различные средние значения  $\bar{U}$  выходного Холловского напряжения для случая, когда диапазон расстояния  $h$  между магнитным сердечником и датчиком Холла марки SS495A фирмы «Holywell», находящийся в интервале (0÷6,15) мм, получены в результате проведения многократных экспериментальных измерений напряжения с помощью цифровых вольт-амперметров V1 и V2, подключенных к измерительному сопротивлению  $R_i$ .

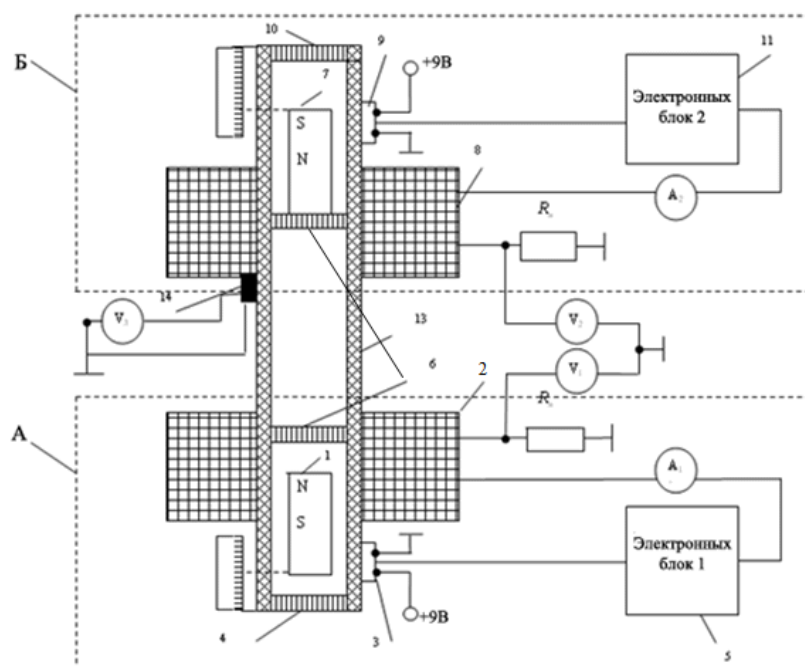


Рис. 1. Измерительная схема устройства измерителя вертикальной скорости на основе магнитной левитации

В зависимости от значения расстояния между магнитным сердечником и датчиком Холла, с помощью цифровых вольт-амперметров A1 и A2 были измерены токи на выходах электронных блоков-усилителей 5 и 11. Кроме того, с целью минимизации температурных погрешностей, во время проведения испытаний, для удержания температуры на уровне  $t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$  цифровым вольт-амперметром V3 измеряется выходная мощность термодатчика 14 марки TD5A, установленного в измерительной камере. При испытаниях, проведенных в лабораторных условиях, были использованы измерительные средства, указанные в табл. 1. Во время испытаний соленоид и датчик Холла закрепляются на штативе и соединяются с электронной системой управления. Постепенно, увеличивая напряжение питания соленоида посредством блока питания, создается момент левитации магнитного сердечника. Во время проведения испытаний определяется разность потенциалов в сети магнитного подвеса, возникающая на выходе датчика Холла, размещенного на различных расстояниях, с небольшими разностями, начиная с минимальной высоты  $h_{\text{мин}}=3$  мм, измеренной штангенциркулем от сети датчика Холла вдоль вертикальной линии магнитного сердечника.

Таблица 1

№	Наименование прибора	Марка	Точность	Позиционное обозначение
1	Цифровой вольт-амперметр	B7 – 27A/1	0.001	A1, A2
2	Цифровой вольт-амперметр	B7 – 27A/1	0.001	V1, V2, V3
3	Блок питания	TEC – 7M	0.2A; 0.5B	
4	Электронные весы	SF – 400	0.1г	
5	Штангенциркуль	L = 250	0.05	

В соответствии с ГОСТ 12997-89, для случая вероятности надежности  $P=0,97$ , согласно результатам, полученным на 10 различных точках измерительного диапазона с количеством измерений равным  $n= 80$ , случайная, систематическая и основная погрешность датчика прибора, измеряющего вертикальную скорость летательного аппарата на основе магнитной левитации, может быть вычислена в соответствии с результатами, полученными в нормальных условиях.

Согласно результатам испытаний, значение  $\sigma$  для каждой исследуемой точки будет подсчитано следующим уравнением [6]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2}{n-1}}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение;  $\bar{U}$  – среднее значение выходного напряжения Холла;  $U_i$  – результат  $i$ -го измерения;  $n$  – число измерений.

Во время испытаний, для обнаружения возможных отклонений для каждой исследуемой точки был использован метод  $3\sigma$ .

Систематическая погрешность измерительного средства  $\Delta_S$  определяется как разность среднеалгебраических и действительных значений измеряемой величины для каждой точки шкалы:

$$\Delta_S = \bar{U} - U_0, \quad (2)$$

где  $U_0$  – измеряемое действительное напряжение.

Случайная погрешность измерительного средства определяется следующим уравнением:

$$\overset{\circ}{\Delta} = K \cdot \sigma, \quad (3)$$

где  $K$  – коэффициент, который зависит от принятой вероятности надежности результата измерения и закона распределения и является случайным значением.

Кроме того, стандарты (ГОСТ 8.009-84 [7] и ГОСТ 8.508-84 [2]) позволяют использовать характеристику случайной погрешности измерительного средства как значение среднеквадратического отклонения, определяемое уравнением (1).

В каждой точке исследуемого измерительного диапазона основная погрешность –  $\Delta$  измерительного средства равняется сумме систематических и случайных погрешностей, и в большей степени характеризуется как статистическая погрешность измерительного средства (ГОСТ 8.009-84 [7] и ГОСТ 8.508-84 [2]) [8, 9].

$$\Delta = \Delta_S + \overset{\circ}{\Delta}, \quad (4)$$

Помимо абсолютного числа  $\Delta$  основной погрешности, относительная –  $\delta$  и приведенная –  $\gamma$  погрешности определяются нижеследующими выражениями:

$$\delta = \frac{\Delta}{U_0} 100\%, \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{\Delta}{U_n} 100\%, \quad (6)$$

где  $U_n = 2,8 \text{ В}$  – нормализованные значения напряжения в измерительном диапазоне.

Полученные значения абсолютной основной погрешности –  $\Delta$  (относительной –  $\delta$  или приведенной –  $\gamma$  основной погрешности) дают возможность определить, к какому классу точности относится исследуемое измерительное средство. Данный класс точности должен соответствовать требованиям стандарта [7] ГОСТ 8.401-80.

В табл. 2 даны экспериментально полученные значения выходного напряжения –  $U_0$  датчика Холла, в датчике прибора, измеряющего вертикальную скорость, которые получены на 10 различных значениях расстояния  $h$  между магнитным сердечником и датчиком Холла.

Таблица 2

$h$ , мм	5.50	5.25	5.00	4.75	4.50	4.25	4	3.75	3.50	3.25
$U_0$ , В	2.71	2.72	2.73	2.73	2.75	2.76	2.77	2.78	2.80	2.80

На рис. 2 построен график экспериментальных значений выходного напряжения датчика Холла в зависимости от расстояния до магнитного сердечника.

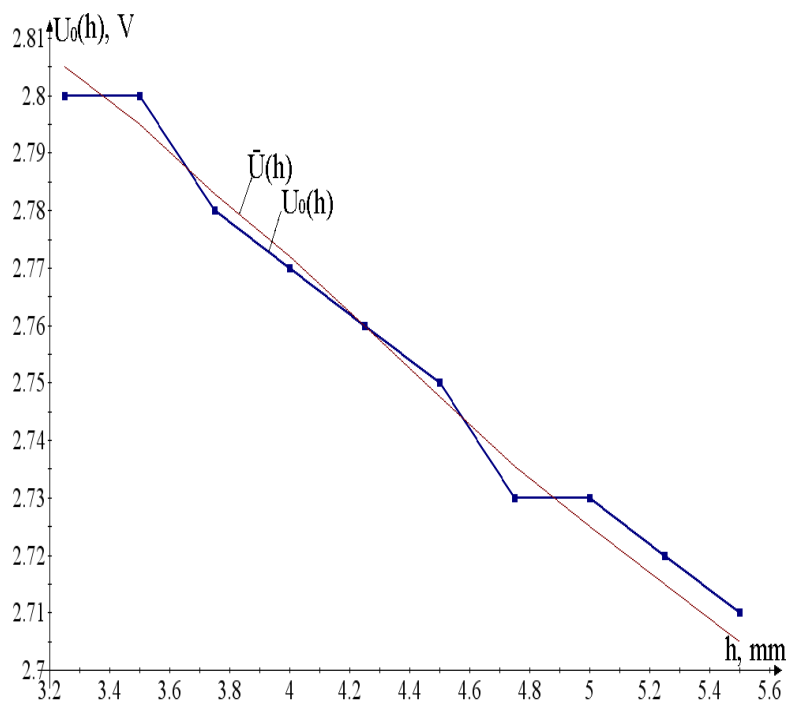


Рис. 2. Зависимость выходного напряжения датчика Холла от расстояния до магнитного сердечника

Используя вышеуказанные выражения, основная приведенная, абсолютная и случайная погрешности датчика прибора, измеряющего вертикальную скорость на основе магнитной левитации, рассчитываются на 10 исследуемых точках по средней линии, при количестве измерений  $n=80$  и для случая вероятность надежности  $P=0.97$ . Полученные значения указываются в табл. 3.

Таблица 3

$\bar{U}$ , В	$U_0$ , В	$\gamma = \frac{\Delta}{U_0} 100\%$	$\Delta$ , В	$\Delta^\circ$ , В
2.805	2.80	0.178	0.005	0.002
2.795	2.80	-0.178	-0.005	0.002
2.783	2.78	0.107	0.003	0.0015
2.772	2.77	0.071	0.002	0.0014
2.76	2.761	0.036	0.001	0.001
2.7476	2.75	-0.071	-0.002	0.0014
2.7355	2.73	0.196	0.0055	0.004
2.725	2.73	-0.178	-0.005	0.002
2.715	2.72	-0.178	-0.005	0.002
2.705	2.71	-0.178	-0.005	0.002

На рис. 3 указаны границы интервала доверительной вероятности погрешности выходного напряжения датчика Холла.

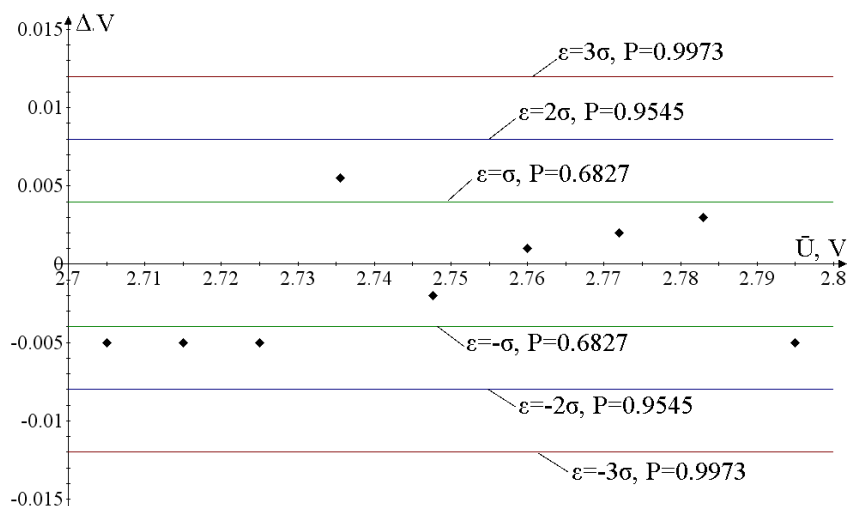


Рис. 3. Границы интервала доверительной вероятности погрешности выходного напряжения датчика Холла

По результатам проведенных измерений определено, что среднеквадратическое отклонение датчика прибора, измеряющего вертикальную скорость на основе магнитной левитации, составляет  $\sigma = 0,004$  В, а основная приведенная погрешность равна  $\gamma = \pm 0,2\%$ .

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 8.401–80. ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 10 с.
2. ГОСТ 8.508–84. ГСИ. Метрологические характеристики средств измерений и точностные характеристики средств автоматизации ГСП. Общие методы оценки и контроля. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 52 с.
3. Кузнецов, В.А., Ялунина Г.А. Основы метрологии: Учеб. пособие. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 336 с.

4. *Миронов Э.Г., Бессонов Н.П.* Метрология и технические измерения: Учеб. пособие. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. – 299 с.
5. *Nəbiyev R.N., Əfəndiyev O.Z., Şükürov S.A., Vəliyev S.M.* Maqnit asqının çıxış signalının Holl vericisi ilə içlik arasında olan məsafədən asılılığı // Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Əsərləri, Bakı-2006, № 2.
6. *Миронов Э.Г.* Методы и средства измерений: Учеб. пособие - УГТУ–УПИ, 2009. – 462 с.
7. ГОСТ 8.009–84. ГСИ. Нормирование и использование метрологических характеристик средств измерений. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 34 с.
8. *Артемов Б.Г., Голубев С.М.* Справочное пособие для работников метрологических служб. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 279 с.
9. *Боднер В.А.* Приборы первичной информации: Учебник для авиационных вузов. – М.: Машиностроение, 1981. – 344 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Рамиз Садыгов.

**Бадалов Ариф Зейнал оглы** – Национальная академия авиации Азербайджана (г. Баку); e-mail: arif.badalov@mail.ru; AZ1045, г. Bakı, пос. Bina, 25km.; тел.: +994503136162; кафедра автоматки и авиационных приборов; зав. кафедрой; д.ф-м.н.

**Набиев Расим Насиб оглы** – e-mail: rasimnabiyev@yahoo.com; тел.: +994557547646; НИИ Транспорта и аэрокосмических проблем; начальник отдела авиационной электроники; д.т.н.

**Мамедов Афтандил Зекалы** – e-mail: Afon855@mail.ru; тел.: +994706860818; кафедра автоматки и авиационных приборов; преподаватель.

**Шукюров Самед Абдул оглы** – НИИ Транспорта и аэрокосмических проблем; отдел авиационной электроники; ведущий инженер-конструктор.

**Badalov Arif Zeynal oghlu** – National Aviation Academy of Azerbaijan (Baku); e-mail: arif.badalov@mail.ru; AZ1045, Bakı, Bina, 25km.; phone: +994503136162; the department of the Automatics and aviation devices; head of department; dr. of phys.-math sc.

**Nabiyev Rasim Nasib** – e-mail: rasimnabiyev@yahoo.com; phone: +994557547646; the department of the Scientific Research Institute of Transport and Aerospace problems; head of aviation electronic; dr. of eng. sc.

**Mammadov Aftandil Zekali** – e-mail: Afon855@mail.ru; phone: +994706860818; the department of the Automatics and aviation devices; teacher.

**Shukyurov Samed Abdul oglu** – department of the Scientific Research Institute of Transport and Aerospace Problems; department of aviation electronic; lead design engineer.