

## **ИНСТРУМЕНТАРИЙ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭШЕЛОНИРОВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ С ПОМОЩЬЮ НАЗЕМНОЙ СТАНЦИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ЗАВИСИМОГО НАБЛЮДЕНИЯ ВЕЩАТЕЛЬНОГО ТИПА (АЗН-В)**

Б.В. Лебедев, Е.В. Юркевич, Н.И. Романчева, А.Н. Стратиенко,  
В.В. Соломенцев

*Описаны механизмы применения наземного оборудования автоматического зависимого наблюдения вещательного типа (АЗН-В) в программном обеспечении мониторинга воздушного пространства вертикального эшелонирования воздушных судов в пространстве RVSM. В качестве факторов, влияющих на параметры летных характеристик воздушных судов (ВС), рассмотрены характеристики высотомера и навигационных средств, необходимые для перехода РФ в пространство RVSM.*

*Ключевые слова:* мониторинг, вертикальное эшелонирование, авронавигация, IADS-B.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Увеличение интенсивности воздушного движения, получение доступа к воздушному пространству для его эффективного использования становится все более необходимым для пользователей воздушного пространства. В последние годы во многих регионах мира и в Российской Федерации осуществлен переход на сокращенные до 1000 футов (приблизительно 300 м) нормы вертикального эшелонирования (RVSM) на высотах более 29 000 футов (приблизительно 9 000 метров). Переход потребовал не только модернизации высотомерного оборудования воздушных судов (ВС), но и контроля (мониторинга) характеристик измерения и выдерживания высоты в эксплуатационных полетах [1, 2]. Появилась потребность в контроле (мониторинге) характеристик измерения и выдерживания высоты в эксплуатационных полетах с пассажирами.

Применение сокращенных минимумов вертикального эшелонирования требует не только принятия соответствующих нормативных актов, но и техническую готовность воздушного судна и экипажа соблюдать эти нормы. Большое количество не сертифицированных воздушных судов, в частности, в России, препятствует быстрому принятию правил RVSM [1]. Если воздушное судно не сертифицировано на работу в системе сокращенных минимумов, оно не может быть допущено на диапазон высот, где действует RVSM, и вынуждено занимать подходящие эшелоны ниже [1, 3].

В настоящее время отсутствует централизация контроля мониторинга воздушных судов. Информация о полетах при верти-

кальном эшелонировании обычно предоставляется в интересах авиакомпаний, выпускающих этот самолет в воздух. Таким образом, для обеспечения объективности авронавигационного обслуживания требуется оценка погрешности бортовых приемников статического давления в создании так называемого мониторинга.

Существенной особенностью погрешности приемника статического давления является то, что она не проявляет себя при наземных проверках и не ощущается экипажем в полете, но существенно влияет на безопасность полета в условиях RVSM. Эта погрешность мало изменяется со временем и, единоразы возникнув (из-за дефектов приемника или деформации фюзеляжа), понижает безопасность на всё оставшееся время эксплуатации ВС [4].

Оценка ошибок пилотирования не представляет технических трудностей. Поэтому в данной работе основное внимание уделяется контролю погрешностей измерения высоты.

### **АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА**

В настоящее время ИКАО рекомендованы два метода мониторинга [1, 5, 6], отличающиеся средствами измерения геометрической высоты.

Основной метод, обеспечивающий наибольшую производительность в условиях плотного воздушного движения, использует специальную наземную станцию (НМУ) для измерения геометрической высоты полета с земли. Этот метод не предполагает специального оборудования ВС и какого-либо со-

## ИНСТРУМЕНТАРИЙ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭШЕЛОНИРОВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ С ПОМОЩЬЮ НАЗЕМНОЙ СТАНЦИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ЗАВИСИМОГО НАБЛЮДЕНИЯ ВЕЩАТЕЛЬНОГО ТИПА (АЗН-В)

трудничества с экипажем. ВС должен только летать в зоне действия измерителя НМУ (расположенного, как правило, в местах интенсивного воздушного движения). НМУ представляет собой дорогостоящую наземную станцию, обеспечивающую точное измерение высоты с использованием принципов мультилатерации (MLAT).

В другом методе (GMU) используется дифференциальный режим спутниковой навигации. Предполагается, что в полете с пассажирами участвует экспериментатор, который приносит на борт ВС специальный приемник GPS. Принцип работы следующий: антенны приемника прикрепляются изнутри к иллюминаторам; в полете регистрируются псевдодальности и время; после полета в зарегистрированные псевдодальности вносятся дифференциальные поправки, полученные от специальной наземной инфраструктуры, и вычисляется геометрическая высота.

Оба применяемых метода сложны и дороги, поэтому ИКАО ставится вопрос о разработке более совершенных методов.

### ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО НОВОМУ МЕТОДУ МОНИТОРИНГА ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭШЕЛОНИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ АЗН-В

Важным аспектом применения АЗН-В является тот факт, что в настоящее время реализуется внедрение автоматического зависимого наблюдения вещательного типа (АЗН-В) в РФ. АЗН-В предусматривает передачу с борта ВС и прием наземными станциями различной навигационной информации, включая барометрическую высоту; не представляет принципиальных трудностей и передача геометрической высоты от спутникового приемника. Эта информация может быть положена в основу существенно нового принципа мониторинга.

Предлагаемый способ представленный [7, 8] описывает математическую модель метода:

Для  $i$ -ой пары вычисляется величина  $\delta_i$ , характеризующая предварительную  $i$ -ю оценку погрешности измерения барометрической высоты на оцениваемом ВС [7, 8].

$$\delta_i = (H_{Гi0} - H_{Гi1}) \frac{T_{cm1}}{T_{\phi1}} - (H_{Bi0} - H_{Bi1}), \quad (1)$$

где  $H_{Гi0}$ ,  $H_{Гi1}$  – геометрическая высота оцениваемого и  $i$ -го встречного ВС ( $i$ -ой пары);  $H_{Bi0}$ ,  $H_{Bi1}$  – барометрическая высота по штатному высотомеру оцениваемого и  $i$ -го встречного ВС ( $i$ -ой пары);  $T_{cm1}$ ,  $T_{\phi1}$  – стандартное и фактическое (измеренное бортовыми приборами) значение температуры на-

ружного воздуха в момент регистрации высот  $i$ -ой пары.

Напомним, что целью мониторинга является оценка погрешности штатного измерителя барометрической высоты. В нашем случае  $n$  значений  $\delta_i$ , полученные с помощью выражения (1), осредняются по формуле (2), и осреднённая величина принимается за величину искомой оценки.

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i \rho_i}{\sum \rho_i}. \quad (2)$$

### МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДА МОНИТОРИНГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ АЗН-В

Рассмотрим результаты моделирования метода мониторинга [9]. Для барометрического высотомера, установленного на оцениваемом ВС, задается случайная погрешность измерения высоты. Систематическая ошибка измерения барометрической высоты этого ВС задается отдельно (в данном случае рассматривается систематическая ошибка –  $\Delta H_{сум} = 50$  м).

Динамика оценок погрешностей измерения, полученных в результате использования математических моделей, показана на рисунках 1 и 2.

Из рисунка 1 видно как по мере увеличения количества обработанных встреч оценка погрешности измерения высоты приближается к величине, заданной в качестве исходной систематической ошибки.

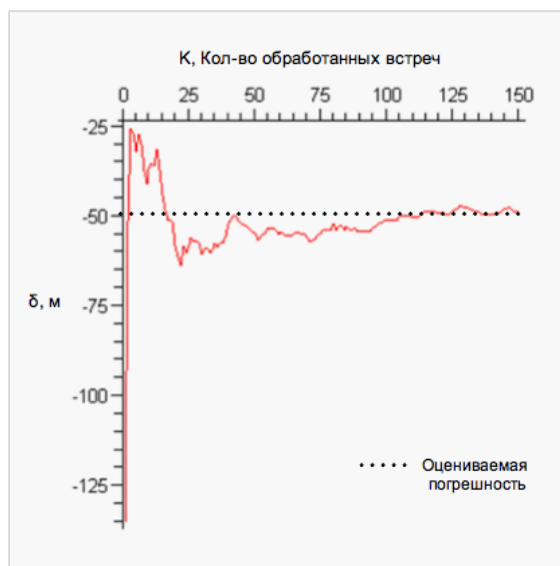


Рисунок 1 – Пример динамики точности оценок погрешности измерения барометрической высоты бортовыми высотомерами с увеличением количества обработанных встреч при  $\delta_f = 50$  м,

$$\Delta H_{сум} = 50 \text{ м}$$

При случайной погрешности в навигационном приемнике  $\delta_r = 50$  м требуемая точность обеспечивается после 70 обработанных встреч. Данные результаты подтверждают возможности существенного повышения точности оценок за счет осреднения результатов мониторинга.

### ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА МОНИТОРИНГА

Практическое использование предложенного метода с помощью разработанного нами программного обеспечения позволило обработать полученные результаты моделирования. Программная часть представляет

собой самостоятельное приложение, написанное на языке Delphi с использованием БД firebirdSQL. С помощью программной реализации был проведен анализ по данным полученным от АЗН-В установленной вблизи аэродрома Пулково предприятием-изготовителем АО ВНИИРА.

Результаты мониторинга борта 4344036 представлены на рисунке 2. Как видно из рисунка 2, чем больше точек сеанса, тем быстрее оценка погрешности приближается к допустимому значению, т.е. не превышая 20 процентов. При этом следует заметить, что контролируемый борт участвовал в отбракованных сеансах тридцать шесть раз, и двенадцать раз его данные являлись причиной отбраковки сеанса.

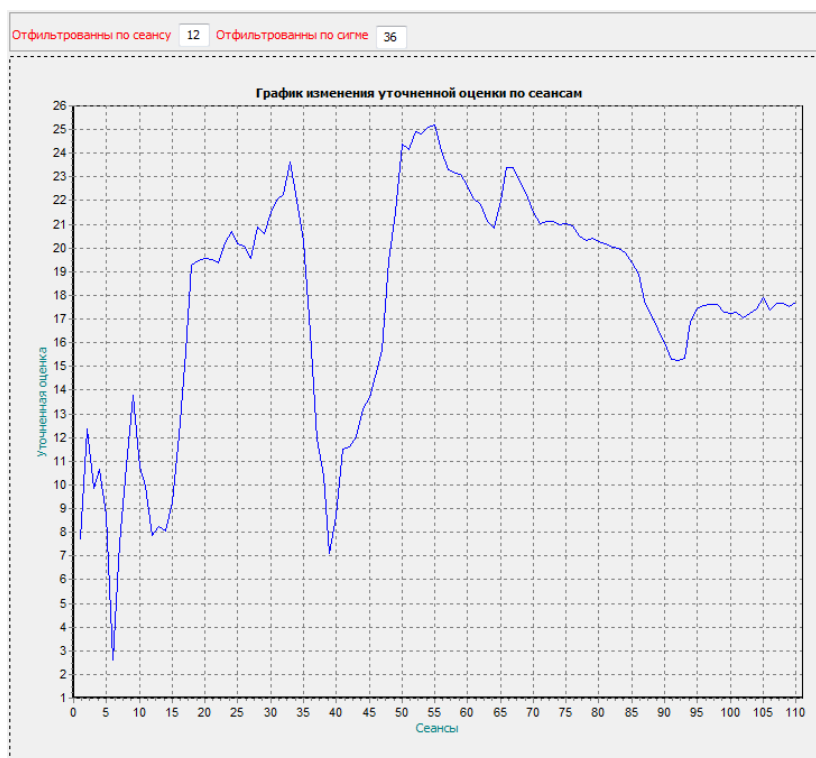


Рисунок 2 – Результат мониторинга. Борт 4344036

Как видно, первичный анализ дает большой разброс оценок, полученных с высотомера на протяжении всего эксперимента. Для повышения точности этих оценок потребовалось усреднение данных с помощью интерполяции полученных характеристик.

### МЕХАНИЗМ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОЦЕНОК ПОГРЕШНОСТИ ВЫСОТОМЕРА С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРПОЛЯЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОНИТОРИНГА

Как было сказано выше, для более точной оценки погрешности высотомера приме-

жуточные результаты мониторинга предлагается интерпретировать в виде кусочно-линейной функции. В этом случае на каждом интервале предлагается вводить усреднение с помощью интерполяции характеристики в пространстве трех заданных точек [6, 10, 11]. В данной работе в качестве таких точек приняты координаты ВС на протяжении заданного интервала анализа [12].

Будем учитывать, что для формирования интерполяционной функции должно выполняться условие:

ИНСТРУМЕНТАРИЙ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭШЕЛОНИРОВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ С ПОМОЩЬЮ НАЗЕМНОЙ СТАНЦИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ЗАВИСИМОГО НАБЛЮДЕНИЯ ВЕЩАТЕЛЬНОГО ТИПА (АЗН-В)

$$F(x) = P_m(x_i) = a_0 + a_1 \times x + a_2 \times x^2 + \dots + a_m \times x^m, i = 0 \quad (3)$$

Особенности практического решения рассматриваемой задачи позволяют использовать линейную (кусочно-линейную) интерполяцию. Она основана на том, что узловые

точки соединяются отрезками прямых (рисунок 3), то есть соединение каждой двух точек характеризуется полиномом первой степени:

$$F(x) = a_0 + a_1 \times x, \text{ при } x_{i-1} \leq x \leq x_i \quad (4)$$

Коэффициенты находятся из условий интерполяции на концах отрезка:

Из системы уравнений (5) определяются коэффициенты:

$$\begin{cases} f_{i-1} = a_0 + a_1 \times x_{i-1} \\ f_i = a_0 + a_1 \times x_i \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} a_0 &= f(x_{i-1}) - a_1 \times x_{i-1}, \\ a_1 &= \frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} \end{aligned} \quad (6)$$

Механизм кусочно-линейной интерполяции строится на определении интервала, в который попадает значение  $x$ . Затем  $x$  под-

ставляется в выражение (4) с использованием коэффициентов для данного интервала.

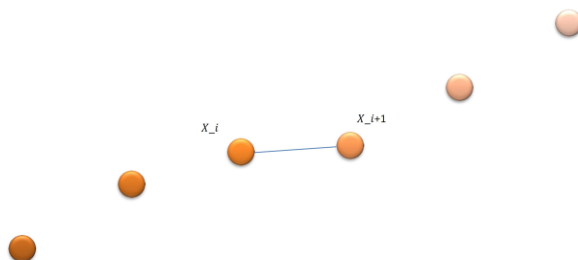


Рисунок 3 – Кусочно-линейная интерполяция функции для расчета погрешности высотомера

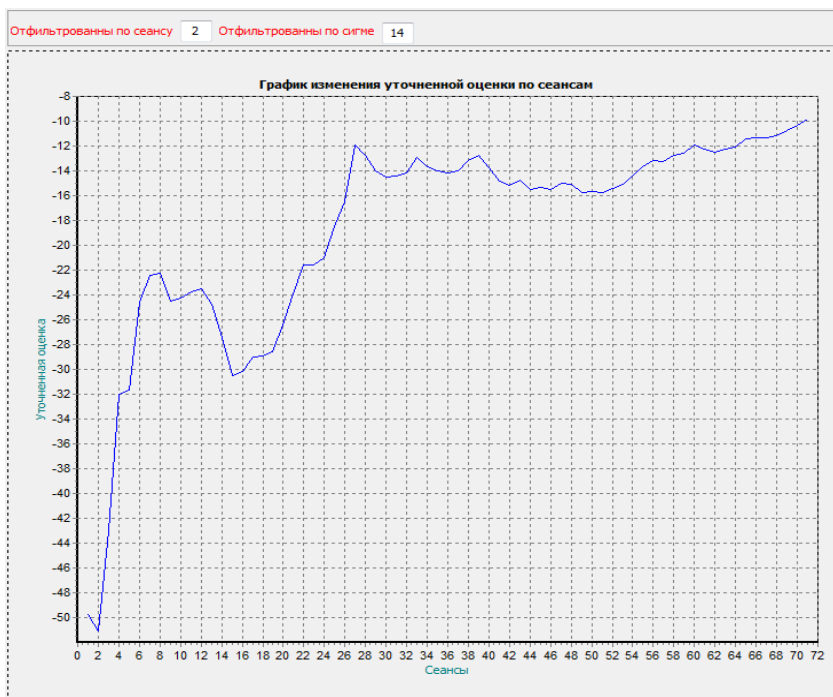


Рисунок 4 – Результат мониторинга. Борт 4344036

Подставим в выражение (4) значения точек координат ВС, проведем заново анализ вычисления погрешности высотомера и сравним полученный результат со значениями, полученными до применения интерполяции. Результат представлен на рисунке 4.

Анализ результатов расчета показывает, что по мере увеличения количества данных погрешность определения систематической составляющей погрешности уменьшается.

Как видно после применения метода интерполяции на плоскости для полученных первичных результатов, оценка погрешности для того же борта равномерно уменьшается.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из анализа возможностей развития RVSM и особенностей использования систем контроля, предложенных ИКАО, был разработан метод, позволяющий создать механизм контроля высоты ВС повышенной точности. Анализ расчетов, полученных с помощью предложенной модели, на реальных данных показал практическую эффективность предлагаемого решения проблем, связанных с контролем выдерживания высоты при эшелонировании в RVSM.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ICAO Doc 9574, AN/934. Руководство по применению минимумов вертикального эшелонирования в 300 м (1000 ft) между ЭП 290 и ЭП 410 включительно. 2-е изд. Монреаль : ИКАО, 2002.
2. Мастер-план Евразия RVSM. Программа внедрения сокращенного минимума вертикального эшелонирования в воздушном пространстве государств Евразии (Казахстан, Кыргызстан, Монголия, Российская Федерация, Таджикистан, Туркменистан, Узбекистан) / Материалы Целевой группы Евразия RVSM. М., 2009.
3. Соломенцев, В. В. Анализ основных различий международных и российских правил эшелонирования воздушных судов при пересечении занятых эшелонов и маршрутов с использованием системы наблюдения обслуживания воздушного движения / В. В. Соломенцев, В. Б. Спрысков, С. В. Кузнецов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2012. – № 180. – С. 26–39.
4. Лагутин, А. А. Использование маски облачности HDF MOD35 для измерения фрактальной размерности границ облаков и облачных массивов / А. А. Лагутин, А. Г. Якунин // Ползуновский вестник. – 2010. – № 2. – С. 229–232.

5. Бердышев, В. П. Радиолокационные системы : учебник / В. П. Бердышев, Е. Н. Гарин, А. Н. Фомин, В. Н. Тяпкин, Ю. Л. Фатеев, И. В. Лютиков, А. В. Богданов, Р. Ю. Кордюков. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2011. – 400 с.

6. Лебедев, Б. В. Моделирование системы контроля соблюдения сокращенных интервалов вертикального эшелонирования, на базе автоматического зависимого наблюдения / Б. В. Лебедев, А.А. Лысенко, В.В. Соломенцев // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества : сб. тезисов докладов. – М. : МГТУГА, 2011. – С. 185.

7. Mehadheby K. Monitoring of ASE “Unbiased Minimum Variance”, ICAO SASP – WG/WHL/2-WP/14, Montreal, November 2002.

8. Лебедев, Б. В. Мониторинг средств вертикального эшелонирования на основе использования автоматического зависимого наблюдения вещательного типа / Б. В. Лебедев // Авиакосмическое приборостроение. – 2003. – С. 130.

9. Лебедев, Б. В. Исследование метода контроля вертикального эшелонирования воздушных судов на основе использования АЗН-В / Б. В. Лебедев, В. В. Соломенцев, А. Н. Стратиенко // Научный Вестник МГТУ ГА. – 2015. – № 213. – С. 135–140.

10. Кравцов, В. В. Использование информации от КСА УВД для мониторинга безопасности полетов с RVSM / В. В. Кравцов // Научный Вестник ФГУП ГосНИИ «Аэронавигация». – 2012. – № 11. – С. 23–29.

11. [http://aco.ifmo.ru/el\\_books/numerical\\_methods/lectures/glava3.html](http://aco.ifmo.ru/el_books/numerical_methods/lectures/glava3.html).

12. Бочкарева, Е. В. Имитационное моделирование процессов сбора и обработки данных в распределенных вычислительных системах / Е. В. Бочкарева, Л. И. Сучкова, А. И. Харламов, А. Г. Якунин // Ползуновский вестник. – 2010. – № 2. – С. 7–11.

**Лебедев Борис Васильевич**, кандидат технических наук, ведущий специалист ООО «НИК», e-mail: lebedev125@bk.ru.

**Юркевич Евгений Владимирович**, академик РАЕН, профессор, д.т.н., зав. лабораторией ИПУ РАН, e-mail: yurk@ipu.ru.

**Романчева Нина Ивановна**, декан факультета МГТУ ГА, e-mail: n.Romancheva@mstuga.aero.

**Стратиенко Артем Николаевич**, аспирант МГТУ ГА, e-mail: stratienko.artem@gmail.com.

**Соломенцев Виктор Владимирович**, профессор, доктор технических наук, заместитель генерального директора ОАО «Азимут», e-mail: sol\_vv@mail.ru.