

## АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВЛИЯНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОСАДКИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В УЛАВЛИВАЮЩУЮ СЕТЬ

Кандидат техн. наук, старший научный сотрудник **Замыслов М.А.**,  
кандидат техн. наук, доцент **Мальцев А.М.**,  
кандидат техн. наук, старший научный сотрудник **Михайленко С.Б.**,  
**Штанькова Н.В.**  
(Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия  
имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»)

## ANALYSIS OF REGULARITIES OF INFLUENCE OF RANDOM DISTURBANCES ON THE SAFETY OF PERFORMING AN AUTOMATIC LANDING OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE IN A TRAPPING NETWORK

**M.A. Zamyslov**, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,  
**A.M. Maltsev**, Ph.D. (Tech.), Associate Professor,  
**S.B. Mikhaylenko**, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,  
**N.V. Shtankova**  
(Military Air Force Training and Research Center “Air Force Academy  
named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin”)

**Аннотация.** Разработана аналитическая методика и проведена оценка ошибок автоматической системы посадки беспилотного летательного аппарата в улавливающую сеть. Получены обобщенные формулы для дисперсий составляющих промаха, обусловленных действием случайных возмущений. Найдены основные закономерности, определяющие точность посадки в зависимости от соотношения между частотными характеристиками бортовой системы управления и спектральными характеристиками возмущений.

**Abstract.** Analytical methodology has been developed and an evaluation of the errors of the automatic landing system of an unmanned aerial vehicle in the trapping network has been carried out. Generalized formulas are obtained for the variances of the miss components caused by the action of random disturbances. The main regularities determining the landing accuracy depending on the ratio between the frequency characteristics of the onboard control system and the spectral characteristics of disturbances are found.

**Ключевые слова:** автоматическая посадка в улавливающую сеть, безопасность посадки, беспилотный летательный аппарат, влияние случайных возмущений, точность посадки, частотные характеристики автоматической системы посадки

**Keywords:** Automatic landing in the trapping network, landing safety, unmanned aerial vehicle, the effect of random disturbances, landing accuracy, frequency characteristics of the automatic landing system

### Введение

Беспилотные летательные аппараты (БЛА) являются динамично развивающимся перспективным видом авиационной техники. Завершающим этапом полета БЛА многократного применения любого функционального назначения является посадка [1-2]. Применительно к малоразмерному БЛА самолетной схемы наиболее предпочтительной в аспекте гибкой тактики применения является посадка в улавливающую сеть. Этот способ привлекателен возможностью выполнения посадки при размещении улавливающей сети на малой площадке, в том числе на палубе маломерного судна [3-4].

Автоматическая посадка БЛА в улавливающую сеть может быть реализована системой, включающей устанавливаемый в месте развертывания сети радиотехнический или инфракрасный маяк, а также бортовой пеленгатор соответствующего диапазона длин волн [5]. Система управления осуществляет автоматическое приведение БЛА в сеть по результатам измерения угловых координат наземного маяка бортовым пеленгатором.

Очевидно, что безопасность выполнения посадки определяется точностью приведения БЛА в сеть, на которую влияют возмущающие факторы различной природы. Основными из них являются перемещение сети (например, при посадке на палубу движущегося судна), блуждания центра излучения наземного маяка, ошибки пеленгатора, ветровые возмущения.

Автоматическая система посадки (АСП) в сеть осуществляет терминальное управление с целью приведения БЛА в заданную точку фазового пространства – точку посадки. Эффективность системы можно исследовать с использованием различных методов [6–8], из которых наибольшими потенциальными возможностями обладает метод статистических испытаний [9]. Это, однако, не умаляет значимость аналитических методов, позволяющих получать конечные формулы и выявлять важные закономерности, которые могут быть использованы для повышения эффективности метода статистических испытаний за счет рационального планирования

процесса математического имитационного моделирования и обработки результатов [10].

Цель работы состоит в разработке методики, позволяющей получить конечные аналитические выражения для ошибок приведения БЛА в сеть, которые обусловлены движением сети, блужданиями центра излучения маяка, ошибками бортового пеленгатора и ветровыми возмущениями. Эти выражения позволят выявить основные закономерности, определяющие точность посадки в зависимости от соотношения между частотными характеристиками бортовой системы управления и спектральными характеристиками возмущений.

### Амплитудно-частотные характеристики автоматической системы посадки БЛА по входам случайных возмущений и выходом по конечной ошибке приведения в улавливающую сеть

Рассмотрим управляемый полет БЛА при выполнении посадки в сеть. Опорная траектория захода на посадку представляет собой прямую линию, по которой БЛА должен осуществлять снижение вплоть до попадания в сеть. Бортовой пеленгатор измеряет относительное угловое положение наземного маяка, а бортовая система управления по результатам этих измерений удерживает БЛА на траектории посадки в соответствии с принятым законом наведения.

При выполнении посадки в штатном режиме отклонения БЛА от траектории посадки незначительны. Действующие на БЛА случайные возмущения являются независимыми и могут быть аппроксимированы нормально распределенными стационарными процессами. С учетом этих допущений АСП представим в упрощенном виде как линейную динамическую систему терминального управления. Эта система содержит одно нестационарное звено, коэффициент передачи которого обратно пропорционален текущей дальности до точки посадки (сети). Процесс управляемого движения БЛА будем рассматривать в каждой из плоскостей в системе координат, приведенной на рис. 1.

На рис. 2 приведена структурная схема АСП для одной плоскости наведения БЛА по опорной траектории. Входными воздействиями для АСП являются текущая координата точки посадки ( $z_0$ ), ошибки бортового пеленгатора ( $\xi_n$ ), порывы ветра ( $\xi_e$ ), блуждания центра излучения маяка ( $\xi_o$ ). Выходной величиной является текущая линейная ошибка  $h = z_0 - z_C$ , где  $z_C$  – текущая координата БЛА. Динамика БЛА с автопилотом описывается функцией  $K(p)$ , где  $p = \frac{d}{dt}$  – дифференциальный оператор. На рис. 1 и 2 приняты также следующие обозначения:  $a_z$  – нормальное (боковое) ускорение БЛА,  $V, V_z$  – скорость БЛА и ее нормальная (боковая) составляющая,  $t$  – время,  $t_0$  – продолжительность полета БЛА по траектории посадки,  $\varepsilon$  – угол визирования точки посадки с борта БЛА,  $\theta$  – угол, характеризующий направление вектора скорости БЛА.

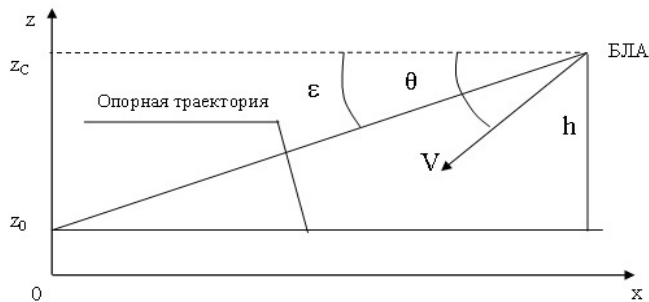


Рис. 1. Прямоугольная неподвижная система координат для описания управляемого движения БЛА по опорной траектории посадки в одной плоскости наведения

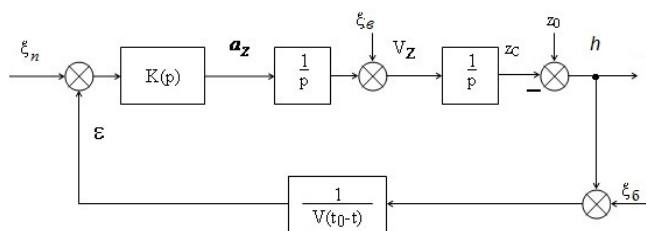


Рис. 2. Структурная схема АСП для одной плоскости наведения

Конечную ошибку (промах) АСП  $h_{кон}$  и ее составляющие, обусловленные действием возмущений  $z_0, \xi_n, \xi_e, \xi_o$  можно определить, зная передаточные функции (ПФ) со входами по этим возмущениям и выходом по ошибке  $h$ . Для определения этих ПФ применим метод эквивалентных возмущений [8]. Для АСП со структурной схемой, приведенной на рис. 2, ПФ со входом по возмущению  $z_0$  и выходом по промаху  $h_{кон}$ , определенная методом эквивалентных возмущений [5], равна:

$$K_Z(s) = \exp \left\{ V^{-1} \int_{\infty}^s \frac{K(p)}{p^2} dp \right\}, \quad (1)$$

где  $s$  – переменная (оператор) преобразования Лапласа.

ПФ по блужданиям центра излучения маяка  $K_o(s)$ , ошибкам бортового пеленгатора  $K_n(s)$ , порывам ветра  $K_e(s)$  выразим через ПФ  $K_Z(s)$ , используя структурную схему АСП (рис. 2):

$$K_o(s) = K_Z(s) - 1 \quad (2)$$

$$K_n(s) = -K(s)s^{-2}K_Z(s), \quad (3)$$

$$K_e(s) = -s^{-1}K_Z(s). \quad (4)$$

Переходя от ПФ (1) – (4) к соответствующим комплексным коэффициентам передачи  $K_Z(j\omega) = K_Z(s = j\omega)$ ,  $K_o(j\omega) = K_o(s = j\omega)$ ,  $K_n(j\omega) = K_n(s = j\omega)$ ,  $K_e(j\omega) = K_e(s = j\omega)$  определим дисперсию конечной ошибки (промаха)  $\sigma_h^2$  и дисперсии ее составляющих  $\sigma_{h_{\xi_i}}^2$ :

$$\sigma_h^2 = \sum_i \sigma_{h\xi_i}^2, \quad (5)$$

$$\sigma_{h\xi_i}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |K_{\xi_i}(j\omega)|^2 S_{\xi_i}(\omega) d\omega. \quad (6)$$

где  $S_{\xi_i}(\omega)$  – спектральная плотность мощности входного возмущения  $\xi_i$ .

Посадку БЛА в улавливающую сеть по сигналам маяка целесообразно выполнять методом пропорциональной навигации, в соответствии с которым угол  $\theta$ , характеризующий направление вектора скорости БЛА, связан с углом визирования маяка  $\varepsilon$ , который измеряется бортовым пеленгатором, соотношением [8, 11]:

$$\dot{\theta} = N\dot{\varepsilon}, \quad (7)$$

где  $N$  – навигационная постоянная.

Соответственно, нормальное ускорение БЛА  $a_z$ , обеспечивающее его следование по опорной траектории, равно:

$$a_z = V\dot{\theta} = NV\dot{\varepsilon}. \quad (8)$$

В этом случае получим следующее представление оператора  $K(p)$ , описывающего динамические свойства БЛА и автопилота:

$$K(p) = \frac{NVp}{Tp + 1}, \quad (9)$$

где  $T$  – эквивалентная постоянная времени АСП.

Подставляя (9) в (1), с учетом соотношений (2), (3), (4) получим выражения для ПФ  $K_z(s)$ ,  $K_\varepsilon(s)$ ,  $K_n(s)$ ,  $K_v(s)$ :

$$K_z(s) = \left( \frac{Ts}{Ts + 1} \right)^N, \quad (10)$$

$$K_\varepsilon(s) = \left( \frac{Ts}{Ts + 1} \right)^N - 1, \quad (11)$$

$$K_n(s) = -NVT \frac{(Ts)^{N-1}}{(Ts + 1)^{N+1}}, \quad (12)$$

$$K_v(s) = -\frac{1}{s} \left( \frac{Ts}{Ts + 1} \right)^N. \quad (13)$$

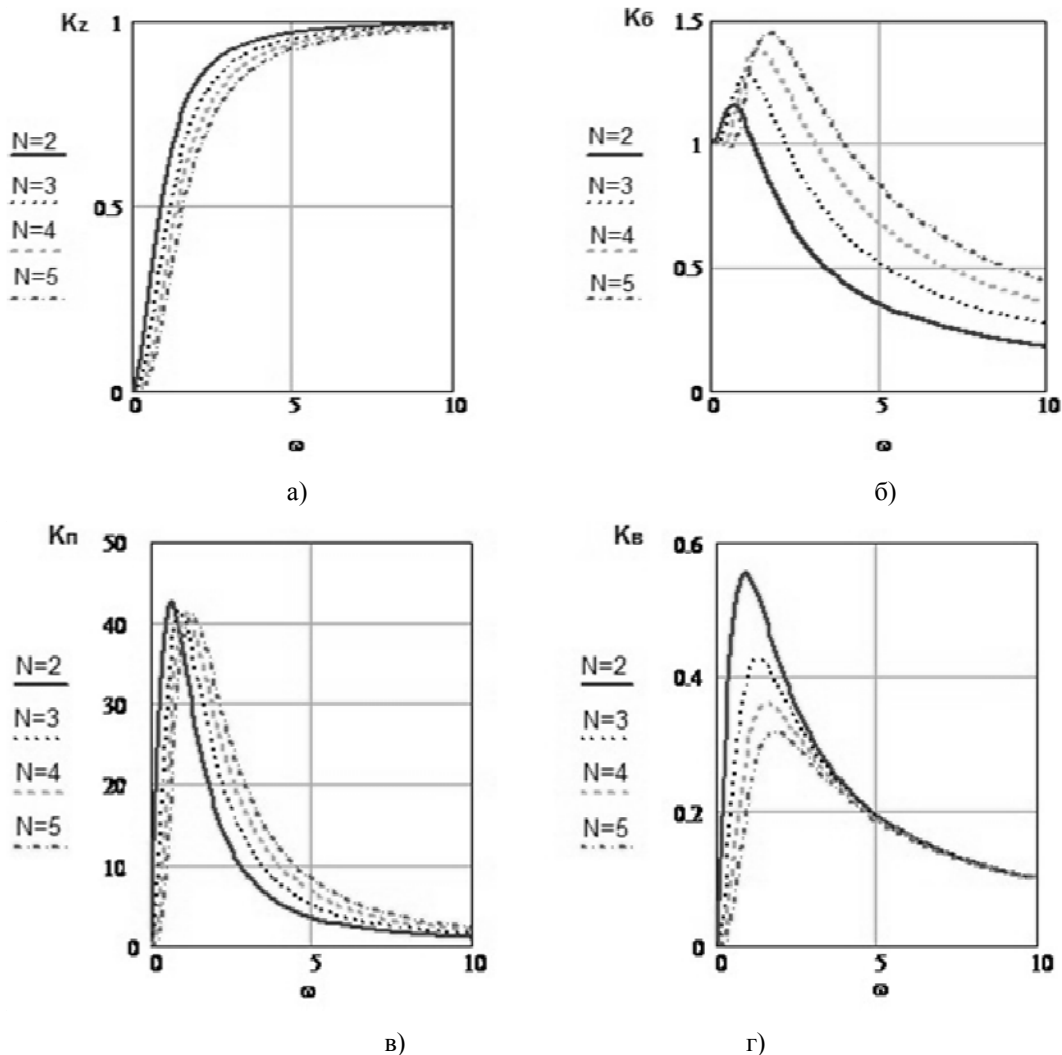


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики АСП БЛА со входами по положению сети (а), блужданиям центра излучения маяка (б), ошибкам пеленгования (в), порывам ветра (г) и выходами по составляющим конечной ошибки приведения БЛА в сеть (промаха)

На рис. 3 приведены рассчитанные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) рассматриваемой АСП БЛА  $|K_z(j\omega)|$ ,  $|K_\delta(j\omega)|$ ,  $|K_n(j\omega)|$ ,  $|K_\epsilon(j\omega)|$  со входами по положению сети (а), блужданиям центра излучения (б), ошибкам пеленгования (в), порывам ветра (г) и выходами по составляющим конечного промаха (ошибки приведения в сеть). Расчеты проводились в соответствии с выражениями (10) – (13) для значений  $N=2...5$  при эквивалентной постоянной времени  $T=1.11$  с, скорости полета БЛА  $V=50$  м/с.

На рис. 3 приняты следующие обозначения:

$$K_z=|K_z(j\omega)|, K_\delta=|K_\delta(j\omega)|, K_n=|K_n(j\omega)|, K_\epsilon=|K_\epsilon(j\omega)|.$$

Из приведенных на рис. 3 АЧХ видно, что по отношению к текущему положению сети АСП БЛА ведет себя как фильтр верхних частот, т.е. медленные (низкочастотные) перемещения сети АСП БЛА успевают обрабатываться, они подавляются фильтром и не приводят к возникновению ошибки приведения БЛА в сеть. Быстрые (высокочастотные) перемещения сети АСП БЛА не успевают обрабатываться (они пропускаются фильтром), что приводит к появлению ошибки приведения БЛА в сеть (промаха). Причем с ростом навигационной постоянной  $N$  способность АСП БЛА к обработке перемещений сети возрастает. Таким образом, рассмотренная спектрально-частотная интерпретация подтверждает известное положение об уменьшении динамических ошибок с ростом навигационной постоянной при наведении по методу пропорциональной навигации [11].

По отношению к блужданиям центра излучения маяка АСП БЛА ведет себя как фильтр нижних частот с выраженными резонансными свойствами (см. рис. 3 б). Медленные блуждания полностью обрабатываются АСП БЛА и вызывают появление промаха, а быстрые блуждания не успевают обрабатываться (подавляются фильтром) и не сказываются на точности наведения БЛА в сеть. С ростом навигационной постоянной  $N$  способность АСП БЛА к обработке блужданий центра излучения маяка возрастает, что приводит к увеличению промаха.

По отношению к ошибкам пеленгования и порывам ветра АСП БЛА можно интерпретировать как резонансную систему (полосовой фильтр) с полным подавлением нулевых частот (см. рис. 3 в, г). Подавление нулевых частот в спектрах текущей координаты сети, ошибок пеленгования и порывов ветра, а также их полное пропускание в спектре блужданий центра излучения маяка являются следствием использования в АСП БЛА метода пропорциональной навигации, который исключает влияние постоянных (медленно меняющихся) составляющих входных возмущений на точность посадки [8, 11]. С ростом навигационной постоянной  $N$  способность АСП БЛА подавлять ветровые возмущения увеличивается (см. рис. 3 г). Влияние ошибок пеленгования на точность посадки с ростом навигационной постоянной  $N$  изменяется более

сложным образом, зависящим от количественного соотношения между полосой пропускания АСП БЛА и шириной спектра ошибок пеленгования. Характер этого влияния не может быть выявлен только на основании качественного анализа АЧХ системы (рис. 3 в). Для этого необходимо проведение более тонкого, количественного анализа, позволяющего получить явную зависимость ошибок посадки, мерой которых может служить дисперсия промаха, от параметров АСП БЛА и от характеристик внешних возмущений.

#### Точностные характеристики автоматической системы посадки БЛА при воздействии случайных возмущений

Дисперсия промаха при посадке БЛА в сеть определяется соотношениями (5), (6). Каждое из действующих на АСП возмущений  $z_0, \xi_n, \xi_\epsilon, \xi_\delta$  с большой степенью достоверности может быть описано дисперсией  $\sigma_{\xi_i}^2$  и временем корреляции  $T_{\xi_i}$ , которые однозначно определяют энергетический спектр  $S_{\xi_i}(\omega)$  возмущения [12]:

$$S_{\xi_i}(\omega) = \frac{2\sigma_{\xi_i}^2 T_{\xi_i}}{1 + T_{\xi_i}^2 \omega^2}. \quad (14)$$

Подставляя соотношения (10) – (14) в формулу (6), задаваясь значениями  $N=2...5$  и проводя соответствующие преобразования, получим аналитические выражения для дисперсий ошибок приведения БЛА в сеть, обусловленных влиянием возмущений  $z_0, \xi_n, \xi_\epsilon, \xi_\delta$ :

$$\sigma_{hz}^2 = \frac{\sigma_z^2}{a_{z0}(N)} \cdot \frac{\sum_{i=0}^{N-1} a_{zi}(N) \cdot l_z^i}{(1+l_z)^N}, \quad (15)$$

$$\sigma_{h\delta}^2 = \frac{\sigma_\delta^2}{a_{z0}(N)} \cdot \frac{l_\delta \cdot \sum_{i=0}^{N-1} a_{\delta i}(N) \cdot l_\delta^i}{(1+l_\delta)^N}, \quad (16)$$

$$\sigma_{hn}^2 = \frac{(\sigma_n NVT)^2}{a_{z0}(N+1)} \cdot \frac{l_n \cdot \sum_{i=0}^{N-1} a_{ni}(N) \cdot l_n^i}{(1+l_n)^{N+1}}, \quad (17)$$

$$\sigma_{h\epsilon}^2 = \frac{(\sigma_\epsilon T)^2}{a_{z0}(N)} \cdot \frac{l_\epsilon \cdot \sum_{i=0}^{N-2} a_{\epsilon i}(N) \cdot l_\epsilon^i}{(1+l_\epsilon)^N}, \quad (18)$$

где  $l_{\xi_j} = \frac{T_{\xi_j}}{T}$ ;  $a_{\xi_j i}(N)$  – численные коэффициенты, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Численные значения коэффициентов  $a_{\sigma_i}(N)$

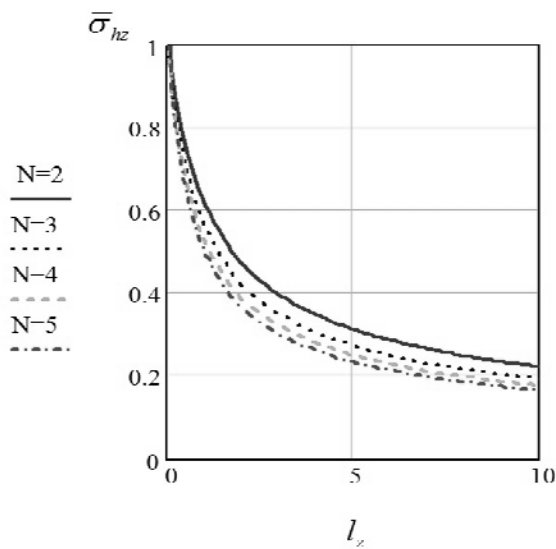
$a_{\sigma_i}(N)$		$N$					
		2	3	4	5	6	
$a_{\sigma_z}(N)$	$i$	0	2	8	16	128	256
		1	1	9	29	325	-
		2	0	3	20	345	-
		3	0	0	5	175	-
		4	0	0	0	35	-
$a_{\sigma_{\delta}}(N)$	$i$	0	5	33	93	965	-
		1	2	27	116	1625	-
		2	0	8	69	1455	-
		3	0	0	16	675	-
		4	0	0	0	128	-
$a_{\sigma_n}(N)$	$i$	0	1	1	5	7	-
		1	3	4	25	42	-
		2	0	1	15	42	-
		3	0	0	3	18	-
		4	0	0	0	3	-
$a_{\sigma_{\epsilon}}(N)$	$i$	0	1	3	5	35	-
		1	0	1	4	47	-
		2	0	0	1	25	-
		3	0	0	0	5	-

На рис. 4 приведены зависимости нормированных среднеквадратических отклонений (СКО) ошибок приведения БЛА в сеть

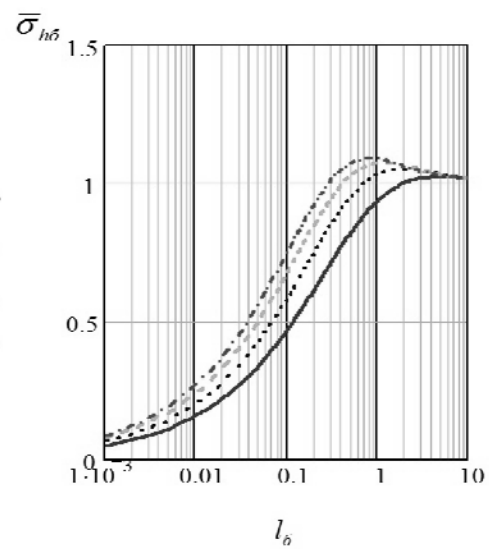
$$\bar{\sigma}_{hz} = \sigma_{hz} / \sigma_z, \quad \bar{\sigma}_{h\delta} = \sigma_{h\delta} / \sigma_{\delta},$$

$$\bar{\sigma}_{hn} = \sigma_{hn} / \sigma_n V \sqrt{2T_n T}, \quad \bar{\sigma}_{h\epsilon} = \sigma_{h\epsilon} / \sigma_{\epsilon} \sqrt{2T_{\epsilon} T}$$

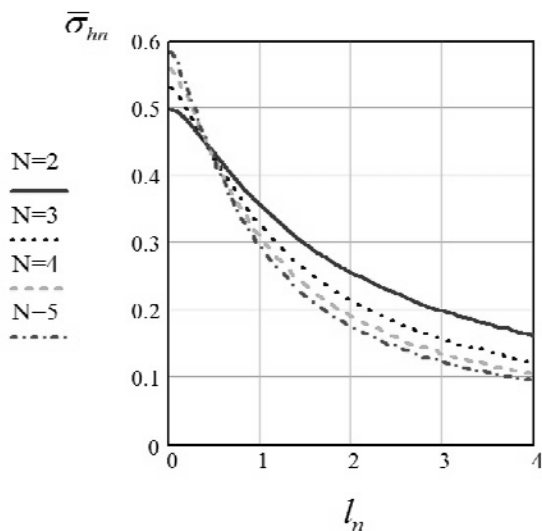
от значений  $l_x, l_{\delta}, l_n, l_{\epsilon}$ .



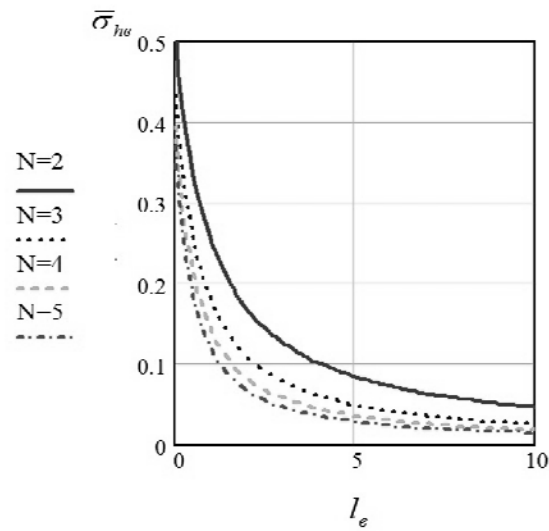
а)



б)



в)



г)

Рис. 4. Зависимости среднеквадратических отклонений составляющих промаха, обусловленных движением сети (а), блужданиями центра излучения маяка (б), ошибками пеленгования (в) и ветром (г) от соотношения между шириной энергетических спектров этих воздействий и шириной полосы пропускания АСП

Каждый из параметров  $l_{\xi_i}$  представляет собой величину, обратную относительной ширине спектра воздействия  $\xi_i$ . Зависимости рассчитаны в соответствии с (15) – (18) при значениях  $N = 2 \dots 5$ .

Из рис. 4 следует, что рост относительной ширины энергетических спектров перемещения сети, ошибок пеленгования и порывов ветра приводит к росту СКО ошибок приведения БЛА в сеть ошибок приведения БЛА в сеть (рис. 4 а, в, г). Рост относительной ширины энергетического спектра блужданий центра излучения маяка уменьшает СКО ошибки приведения БЛА в сеть при  $l_o \leq 1$  и не влияет на нее при  $l_o \geq 5$  (рис. 4 б). Рост  $N$  уменьшает СКО ошибок приведения БЛА в сеть, вызываемых движением сети и порывами ветра (рис. 4 а, в), а СКО ошибки приведения БЛА в сеть, вызванной блужданиями центра излучения маяка, увеличивается при  $l_o < 5$  и практически не меняется при  $l_o \geq 5$  (рис. 4 б). СКО ошибки приведения БЛА в сеть, вызванной ошибками пеленгования, с ростом  $N$  увеличивается при  $l_n < 0.425$ , и уменьшается при  $l_n > 0.425$ .

На основании характеристик точности приведения БЛА в улавливающую сеть можно провести анализ условий обеспечения безопасной посадки. Определим вероятность безопасной посадки БЛА в сеть как вероятность приведения БЛА в центральную область сети, при попадании в которую БЛА гарантированно не будет разрушен (поврежден) вследствие столкновения с элементами конструкции, обеспечивающей крепление, установку и развертывание сети. Очевидно, что эту центральную область сети, которую назовем зоной безопасной посадки в сеть, целесообразно определить как всю сеть, уменьшенную по периметру на величину, соответствующую характерному размеру БЛА. Таким характерным размером является размах крыла БЛА. С учетом сказанного вероятность безопасной посадки БЛА  $P_{БП}$  можно определить по формуле из [13]:

$$P_{БП} = \Phi\left(\frac{a}{\sigma_y}\right)\Phi\left(\frac{b}{\sigma_z}\right), \quad (19)$$

где  $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp(-\frac{t^2}{2}) dt$  – интеграл вероятностей [13].

Применение выражения (19) допустимо при условии, что зона безопасной посадки в сеть представляет собой прямоугольник со сторонами  $2a$  и  $2b$ , центр рассеивания точек приведения БЛА в сеть совпадает с центром этого прямоугольника, а главные оси рассеивания параллельны его сторонам. Величины  $\sigma_y, \sigma_z$  представляют собой СКО конечных суммарных ошибок приведения БЛА в сеть в продольной и боковой плоскостях наведения, рассчитываемые в соответствии с соотношениями (6), (15) – (18).

### Заключение

В статье разработана аналитическая методика и проведена оценка ошибок автоматической системы посадки БЛА в улавливающую сеть, обусловленных движением сети, блужданиями центра излучения маяка, ошибками бортового пеленгатора, измеряющего угол визирования маяка, и ветровыми возмущениями.

Получены аналитические выражения для дисперсий ошибок приведения БЛА в сеть, обусловленных действием случайных возмущений. Найдены основные закономерности, определяющие точность посадки в зависимости от соотношения между частотными характеристиками автоматической системы посадки БЛА и спектральными характеристиками возмущений.

Полученные аналитические выражения позволяют исследовать степень воздействия движения улавливающей сети, блужданий центра излучения маяка, ошибок бортового пеленгатора и порывов ветра на точность автоматической системы посадки БЛА и, в конечном итоге, на безопасность выполнения посадки при ограниченных данных о характеристиках системы и входных возмущающих воздействиях.

### Литература

1. Куликов Л., Растопчин В., Бондаренко Н. Беспилотные авиационные системы военного назначения: проблемы и перспективы развития. // Аэрокосмическое обозрение, 2004, № 1. С. 20-23.
2. Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2005-2030 USA Office of Secretary of Defense. Электронный ресурс: [www.acq.osd.mil/usd/roadmaplast.pdf](http://www.acq.osd.mil/usd/roadmaplast.pdf), 2006. 213 p.
3. Моисеев В.С. Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами: монография. – Казань: ГБУ «Республиканский центр мониторинга качества образования» (Серия «Современная прикладная математика и информатика»). – 2013. – 768 с
4. Замыслов М.А., Мальцев А.М., Михайленко С.Б., Штанькова Н.В. Повышение безопасности полета БЛА при посадке на корабль // Проблемы безопасности полетов. ВИНТИ РАН. - 2020.- № 9. – С. 29-42.
5. Замыслов М.А., Мальцев А.М., Михайленко С.Б. и др. Способ точной посадки беспилотного летательного аппарата. Пат. № 2539703 РФ, МПК В64С 13/20 (2006.01); № 2013110582/11: заявл. 11.03.2013; опубл. 20.09.2014, Бюл. № 26. -11 с.
6. Федосов Е.А., Инсаров В.В., Селивохин О.С. Системы управления конечным положением в условиях противодействия среды.-М.: Наука, 1989.
7. Попов А.Н., Сергушов И.В., Тетерин Д.П. и др. Пилотажные комплексы и навигационные системы вертолетов; под ред. Ковадина М.Ш.-М.: Инновационное машиностроение, 2017. – 368 с.: ил.
8. Гуткин Л.С., Борисов Ю.П., Валуев А.А. и др. Радиоуправление реактивными снарядами и космическими аппаратами.-М.: Сов. радио, 1968.
9. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике.-М.: Сов. радио, 1971.
10. Васильев Д.В., Сабинин О.Ю. Ускоренное статистическое моделирование систем управления.-Л.: Энергоатомиздат, 1987.
11. Меркулов В.И., Дрогалин В.В., Канащенков А.И. и др. Авиационные системы радиоуправления. Т. 2. Радиоэлектронные системы самонаведения/ Под ред. А.И. Канащенкова и В. И. Меркулова. - М.: Радиотехника, 2003. - с.: ил.
12. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем.- М.: Радиотехника, 2003. — 400 с.
13. Боевые комплексы беспилотных летательных аппаратов. Часть I. Системная характеристика боевых комплексов беспилотных летательных аппаратов: Научно-методические материалы / Под ред. А.Н. Максимова. М.: ВВИА им. профессора Н.Е. Жуковского, 2005. 236 с.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Сведения об авторах:**

**Замыслов Михаил Александрович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

Место работы: ВУНЦ ВВС « ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), старший научный сотрудник.

Телефон сотовый – 8 950 762 2234.

e-mail: mzam48@mail.ru

**Мальцев Александр Михайлович**, кандидат технических наук, доцент.

Место работы: ВУНЦ ВВС « ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), старший научный сотрудник.

Телефон сотовый – 8 906 589 3616.

e-mail: max\_alex\_67@mail.ru

**Михайленко Сергей Борисович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

Место работы: ВУНЦ ВВС « ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), ведущий научный сотрудник.

Телефон сотовый – 8 904 211 2437.

e-mail: mikhserbor@yandex.ru

**Штанькова Надежда Викторовна**.

Место работы: ВУНЦ ВВС « ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), научный сотрудник.

Телефон сотовый – 8 903 856 1228.

e-mail: nadia\_shtankova@mail.ru

Адрес организации: 394064, г. Воронеж, ул. Старых большевиков, д. 54а.