

УДК 623.746.07519

## СОВМЕСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ СУДНА И БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ ПОСАДКЕ

Ю. Ф. Подоплёкин<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессорС. Н. Шаров<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор<sup>а</sup>ОАО «Концерн «Гранит-Электрон», Санкт-Петербург, РФ

**Введение:** важнейшим условием безаварийной («сухой») посадки является точность отработки программного движения беспилотного летательного аппарата, точность пространственной стабилизации посадочного устройства на судне или точность прогноза его пространственного положения в момент сцепления с беспилотным летательным аппаратом. Целью работы является исследование возможности и целесообразности совместного управления судном и летательным аппаратом для обеспечения наилучших условий возвращения и безаварийной посадки летательного аппарата на судно. **Результаты:** предложены алгоритмы функционирования и обмена информацией между судном и беспилотным летательным аппаратом на основе анализа движения беспилотного летательного аппарата и судна на всех этапах движения от запуска до посадки. По информации навигационных и других бортовых приборов, передаваемой на судно по радиосвязи, контролируется возможность возвращения беспилотного летательного аппарата на судно-носитель и корректируется программная траектория движения в режиме реального времени, а также возможность обеспечения допустимых отклонений параметров движения беспилотного летательного аппарата в момент сцепления с посадочным устройством. Анализ движения судна как твердого тела, имеющего шесть степеней свободы, рассматривается с учетом присоединенной массы воды и возмущающего воздействия волн. Качка судна представляется в виде ограниченной суммы гармонических колебаний и случайной составляющей по каждой координате. Учитывается нелинейная зависимость смещения посадочного устройства, вынесенного на кран-балку за борт судна. На основании анализа колебаний посадочного устройства прогнозируется его пространственное положение в момент сцепления с беспилотным летательным аппаратом. Увеличение точности прогноза положения посадочного устройства достигается путем предварительного анализа параметров качки и нахождения оптимального курса и скорости движения судна, при которых обеспечивается наилучшая точность прогноза пространственного положения посадочного устройства и приведения к нему беспилотного летательного аппарата. **Заключение:** совместное управление движением судна и беспилотного летательного аппарата позволяет создать наиболее благоприятные условия для посадки, а также помогает оператору (с известной величиной риска принятия ошибочного решения) реализовать «сухую» или «мокрую» (аварийную) посадку.

**Ключевые слова** — беспилотный летательный аппарат, информационно-управляющая система беспилотного летательного аппарата и судна.

### Введение

Использование беспилотного летательного аппарата (БПЛА) на судах и кораблях сдерживается единственной причиной — отсутствием надежных средств их посадки. Достоинства способа посадки БПЛА на выдвигающуюся за борт судна кран-балку [1]: оперативность «развертывания» и «свертывания», возможность использования для БПЛА различного типа, пригодность к размещению на судах любого класса, минимальное дополнительное оборудование на судне и БПЛА.

Беспилотные летательные аппараты судового базирования укомплектованы бортовой аппаратурой системы навигации и управления, связи с судном и сменной, называемой «целевой», аппаратурой, чаще всего радиолокационной или оптико-электронной (телевизионной, тепловизионной или лазерной). Целевая аппаратура обеспечивает мониторинг поверхности по заданному полетным заданием маршруту движения БПЛА.

Судовое оборудование включает в себя автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора управления, аппаратуру связи носителя с БПЛА, а также пусковое и посадочное устройство БПЛА.

Кран-балка судна обеспечивает вынос посадочного устройства для посадки БПЛА за борт

судна. Для сцепления с судовым посадочным устройством на БПЛА используется выдвигной карабин. На кран-балке, кроме посадочного устройства, в составе которого имеются захватное и тормозное устройства, размещается оптико-электронная аппаратура. В ее состав входят телевизионная камера и дальномер.

Дальномер обеспечивает измерение текущей дистанции от посадочного устройства до наблюдаемого БПЛА и скорости его сближения с судном.

Дополнительно в состав судовой аппаратуры введено устройство, позволяющее определить направление и скорость ветра, например, лидар для оценки составляющих скорости ветра.

Для посадки БПЛА известны [1, 2] следующие способы управления движением:

— автономное или автоматизированное управление БПЛА с бортовым координатором, самонаведение на зацеп устройства посадки;

— автономное или автоматизированное управление БПЛА с судовым координатором, где сигналы управления, обеспечивающие приведение БПЛА к зацепу посадочного устройства, вырабатываются в АРМ и по каналу связи передаются на борт БПЛА.

Возможно комбинированное управление с использованием информации бортового и судового

координаторов, а также резервное ручное управление с визуальным наблюдением оператором движения БПЛА.

Для всех перечисленных способов важнейшим условием безаварийной посадки является точность отработки программного движения БПЛА, точность пространственной стабилизации посадочного устройства на судне или точность прогноза его положения в момент сцепления с БПЛА. Внешним условием, оказывающим определяющее влияние на точность заданной программой траектории сближения БПЛА с судном, является возмущение атмосферы, вызванное ветровыми порывами и движением судна. Волнение морской поверхности оказывает влияние на бортовую систему БПЛА, которая обеспечивает заданную высоту полета, и на качку судна, которая влияет на линейное и угловое смещение посадочного устройства в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Задача предлагаемой системы — создание условий для «сухой» посадки на основе анализа качки судна и динамики движения БПЛА.

### Анализ движения БПЛА для посадки на движущееся судно

Система управления посадкой БПЛА на движущееся судно сопровождает БПЛА на всех этапах движения после запуска, используя информацию навигационных и других приборов бортовой системы управления, передаваемую на судно по радиосвязи.

Во время выполнения БПЛА мониторинга поверхности контролируется возможность возвращения БПЛА на судно-носитель при имеющемся запасе горючего на борту.

Для решения этой задачи рассчитывается траектория движения в земной системе координат  $(\lambda, \varphi)$  с учетом текущих координат и параметров движения обоих объектов (БПЛА и судна-носителя), обеспечивающая минимальный путь. Примеры расчета оптимальной траектории минимальной длины с минимально необходимым запасом горючего, при ограничениях на допустимую перегрузку и управляющие моменты рулевых органов приведены в работе [3].

Если требуемый запас горючего  $Q_{\min}$  для реализации минимальной длины траектории сближения меньше имеющегося на борту  $Q_a$  летательного аппарата, то возвращение БПЛА возможно. По мере уменьшения разницы  $Q_a - Q_{\min}$  и приближения ее к нулю необходимо возвращать БПЛА на судно или изменять курс движения судна и (или) БПЛА для уменьшения длины траектории возврата и требуемой величины  $Q_{\min}$ .

Длина минимального пути возвращения определяется с учетом маневров разворота БПЛА

и подхода к посадочному устройству судна с нужной стороны. Для использования судовой системы управления посадкой реализация траектории возврата обеспечивает приведение БПЛА в зону, по дистанции и угловым координатам достаточную для обнаружения и сопровождения его судовым координатором, в целях точного приведения его на посадочное устройство. Расчетная точка местонахождения судна в момент прихода на посадку БПЛА определяется с учетом особенностей движения судна и ветровых возмущений.

Погрешность реализации этой траектории в точке обнаружения и «захвата» БПЛА судовой системой на сопровождение под действием случайных факторов внешней среды и внутренних помех в бортовой аппаратуре будет определять начальное рассогласование для приведения БПЛА к устройству зацепления. Координаты и параметры БПЛА в этой точке являются начальными условиями (при  $t = 0$ ) для следующего этапа движения БПЛА, где происходит точное приведение БПЛА к посадочному устройству.

Учитывая небольшие расстояния (не более 2–3 км) этого этапа, дальнейший анализ сближения БПЛА с посадочным устройством будем проводить в декартовой системе координат, связанной с точкой прицеливания посадочного устройства, являющейся центром зоны посадочного устройства, в которой обеспечивается безаварийная посадка (сцепление БПЛА с посадочным устройством) при отсутствии качки судна. Начало координат — в точке прицеливания. Горизонтальная плоскость параллельна невзволнованной поверхности воды. Вертикальная плоскость совпадает с курсом судна и проходит через точку прицеливания при отсутствии качки судна. Направления осей:  $X$  — по курсу судна,  $Y$  — вверх,  $Z$  — вправо.

При  $t = 0$  значения параметров БПЛА

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_{\text{тр}} + \Delta\mathbf{A}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{A}$  — вектор параметров БПЛА, включающий линейные  $X_a, Y_a, Z_a$  и угловые  $\psi_a, \vartheta_a, \gamma_a$  координаты, а также скорости их изменения;  $\mathbf{A}_{\text{тр}}$  — расчетные значения траекторных параметров БПЛА после реализации программной траектории возвращения ( $X_{\text{тр}}, Y_{\text{тр}}, Z_{\text{тр}} = 0$  и угловые  $\psi_{\text{тр}} = 0, \vartheta_{\text{тр}} = 0, \gamma_{\text{тр}} = 0$ );  $\Delta\mathbf{A}$  — отклонения параметров БПЛА от расчетных значений  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta\psi, \Delta\vartheta, \Delta\gamma$  и скоростей их изменения.

Параметры посадочного устройства  $\mathbf{\Pi}$  при  $t = 0$  и отсутствии качки принимаются соответствующими его положению без учета качки судна  $\mathbf{\Pi}$  ( $X_{\text{п.у}} = Z_{\text{п.у}} = 0, Y_{\text{п.у}} = h$  — высоте точки прицеливания посадочного устройства над невзволнованной водной поверхностью,  $\psi_{\text{п.у}} = 0, \vartheta_{\text{п.у}} = 0, \gamma_{\text{п.у}} = 0, \mathbf{V}_{\text{п.у}} = V_{\text{п.у}x}$  — скорость движения судна). При качке параметры  $\mathbf{\Pi}$  принимаются в соответствии с прогнозом их значений на конечный

момент времени  $t_k$ , соответствующий моменту сцепления БПЛА с посадочным устройством.

Отметим, что при наличии возможности поворота посадочного устройства его целесообразно повернуть в вертикальной плоскости на угол, равный углу атаки БПЛА, а в горизонтальной плоскости — равный углу скольжения БПЛА, соответствующему скорости бокового ветра, измеряемой, например, лидаром судна. Это уменьшит боковые перегрузки БПЛА при посадке.

Модель движения БПЛА на этом этапе приближенно описывается, например, следующей системой уравнений [3]:

$$\left\{ \begin{aligned} m(\dot{V}_x + \omega_y V_z - \omega_z V_y) &= \\ &= F_T \cos \vartheta \cos \beta - mg \sin \vartheta - C_x V_x + W_x; \\ m(\dot{V}_y + \omega_y V_x - \omega_x V_z) &= \\ &= F_T \cos \vartheta \cos \beta - mg \cos \vartheta \cos \gamma - C_x V_y + W_y); \\ m(\dot{V}_z + \omega_z V_x - \omega_x V_z) &= F_T \sin \vartheta \cos(\beta + \psi - \psi_3) - \\ &- mg \cos \vartheta \sin \gamma - C_z V_z + W_z); \\ V_x &= V_a \cos \alpha \cos \beta; \quad V_y = -V_a \sin \alpha \cos \beta; \\ V_z &= V_a \sin \beta; \\ \dot{X} &= V_x; \quad \dot{Y} = V_y; \quad \dot{Z} = V_z; \\ J_x \dot{\omega}_x + (J_z - J_y) \omega_y \omega_z + M_{\omega x} &= k_x \delta_x; \\ J_y \dot{\omega}_y + (J_x - J_z) \omega_x \omega_z + M_{\omega y} &= k_y \delta_y; \\ J_z \dot{\omega}_z + (J_y - J_x) \omega_y \omega_x + M_{\omega z} &= k_z \delta_z; \\ \dot{\vartheta} &= \omega_y \sin \gamma + \omega_z \cos \gamma; \\ \dot{\gamma} &= \omega_x + \operatorname{tg} \vartheta (\omega_z \sin \gamma + \omega_y \cos \gamma); \\ \dot{\psi} &= (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma) / \cos \vartheta; \\ \vartheta &= \theta + \alpha, \end{aligned} \right. \quad (2)$$

включая управляющие воздействия регулирующих органов:

$$\left\{ \begin{aligned} \delta_x &= k_{1x}(\gamma_3 - \gamma) + k_{2x} \omega_x + \\ &+ k_{3x} \psi + k_{4x} \omega_y + k_{5x} Y; \\ \delta_y &= k_{1y}(\psi_3 - \psi) + k_{2y} \omega_y + \\ &+ k_{3y}(Z_3 - Z) + k_{4y} V_z + k_{5y} \gamma; \\ \delta_z &= k_{1z}(\vartheta_3 - \vartheta) + k_{2z} \omega_z + \\ &+ k_{3z}(Y_3 - Y) + k_{4z} V_y + k_{5z} \gamma, \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где  $m$  — масса БПЛА;  $F_T$  — сила тяги двигателя;  $J_x, J_y, J_z$  — моменты инерции БПЛА относительно главных осей;  $V_x, V_y, V_z$  и  $\dot{V}_x, \dot{V}_y, \dot{V}_z$  — проекции скорости и ускорения БПЛА на координатные оси  $X, Y, Z$ ;  $\psi, \vartheta$  — направление полета БПЛА в горизонтальной и вертикальной плоскостях;  $\gamma$  — угол крена;  $\theta$  — угол наклона траектории;  $\alpha, \beta$  — углы атаки и скольжения;  $\gamma_3, \psi_3, \vartheta_3, Z_3, Y_3$  — заданные (программными значениями или положением посадочного устройства) направле-

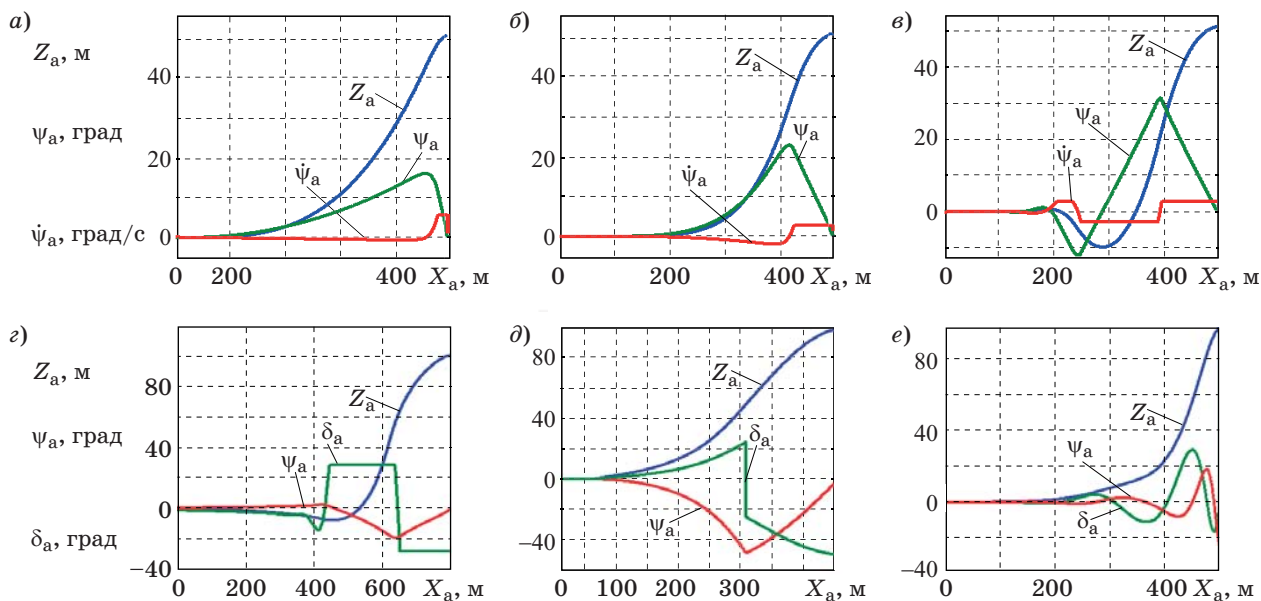
ния полета — координаты точки прицеливания БПЛА при  $t = 0$ ;  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  и  $\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z$  — угловые скорости и ускорения поворота вокруг главных осей;  $C_x, C_y, C_z$  — коэффициенты сопротивления соответствующим линейным движениям БПЛА;  $M_{\omega x}, M_{\omega y}, M_{\omega z}$  — моменты сопротивления соответствующим угловым движениям БПЛА;  $W_x, W_y, W_z$  — проекции силы ветра на оси  $X, Y, Z$ , измеряемые лидаром, который входит в состав судовой системы управления посадкой;  $\delta_x, \delta_y, \delta_z$  — углы поворота рулей управления, изменяющие угловое положение БПЛА  $\gamma, \psi, \vartheta$ ;  $k_{1x}, k_{2x}, k_{3x}, k_{4x}, k_{5x}$  — коэффициенты участия параметров  $\gamma, \omega_x, \psi, \omega_z$  и  $Y$  в формировании сигналов  $\delta_x$  управления элеронами БПЛА;  $k_{1y}, k_{2y}, k_{3y}, k_{4y}, k_{5y}$  — коэффициенты участия параметров  $\psi, \omega_z, Z, V_z$  и  $\gamma$  в формировании сигналов  $\delta_y$  управления рулями высоты БПЛА;  $k_{1z}, k_{2z}, k_{3z}, k_{4z}, k_{5z}$  — коэффициенты участия параметров  $\vartheta, \omega_z, Y, V_y$  и  $\gamma$  в формировании сигналов  $\delta_z$  управления направлением движения БПЛА.

Параметры закона управления (3) выбираются при синтезе системы автопилотирования БПЛА, обеспечивают качественное управление и отработку заданного положения по высоте и направлению полета при определенных ограничениях на величину, скорость и ускорение их отработки, а также обеспечивают парирование ветровых возмущений для удержания БПЛА на заданной траектории.

Для отработки начальных рассогласований и подхода к посадочному устройству с минимальными линейными и угловыми ускорениями на этом участке рекомендуется экспоненциальный закон изменения задающих значений  $Y_3, Z_3, \psi_3, \vartheta_3$  [1]. Возможно использование и других алгоритмов управления или корректирующих сигналов, которые находятся в памяти вычислительной системы АРМ и применяются в соответствии со значениями отклонений параметров БПЛА от расчетных  $\Delta A$  и наблюдаемыми ветровыми возмущениями.

Примеры траекторий сближения БПЛА с посадочным устройством при различных законах управления приведены на рис. 1.

Важно отметить, что рассогласования по величинам  $\Delta Y, \Delta Z, \Delta \psi, \Delta \vartheta$  на порядок и более превосходят допустимые конструкцией посадочного устройства значения, т. е. переходные процессы отработки начальных рассогласований должны затухнуть. Реальный переходный процесс системы управления движением БПЛА во временной области описывается в линейном приближении совокупностью затухающих экспоненциальных и колебательных процессов. Длительность переходного процесса определяется огибающей экспонентой изменения координат с наименьшим затуханием  $\xi$  [1/с].



**Рис. 1.** Траектории сближения БПЛА (с параметрами БПЛА типа «Элерон» [2]) с судном в горизонтальной плоскости. Изменение  $Z_a(X_a)$ , курсового угла  $\psi_a(X_a)$  и его скорости  $\dot{\psi}_a$  при линейном позиционном законе управления и корректирующем воздействии с коэффициентом усиления: *a* —  $k_y = 3$ ; *b* —  $k_y = 5$ ; *c* —  $k_y = 10$ ; а также с нелинейными законами управления для БПЛА типа «Орлан»: *z* — с ограничением на углы поворота рулей  $\delta_a$ ; *d* — с однократным релейным реверсом; *e* — с нелинейным, близким к экспоненциальному по координате  $Z_a(X_a)$

Интегрируя систему (2) с начальными условиями (1), соответствующими параметрам БПЛА и судна, с помощью вычислителя АРМ оцениваются ожидаемые значения параметров движения БПЛА и судна в момент  $t = t_k$ , который определяется из условия  $X_a(t_k) = X_{п.у}(t_k)$  в принятой системе координат. Для «сухой» посадки БПЛА значения остальных параметров движения БПЛА должны быть в пределах, допустимых конструкцией посадочного устройства, т. е.

$$A(t_k) \leq \Delta_k,$$

$$\text{включая } V_a(t_k) - V_{п.у}(t_k) \leq V_{пос} + \Delta_{k_v}. \quad (4)$$

Здесь  $\Delta_k$  — вектор допустимых значений линейных и угловых координат, а также посадочной скорости БПЛА для безаварийного сцепления БПЛА с посадочным устройством;  $V_{пос}$  — среднее расчетное значение посадочной скорости БПЛА.

Например, для посадочного устройства [4]  $\Delta_{k_y} = \Delta_{k_z} = \pm 0,1$  м,  $\Delta_{k_\psi} = \Delta_{k_\vartheta} = \Delta_{k_\gamma} = \pm 5^\circ$ ,  $\Delta_{k_v} = \pm 0,25 V_{пос}$ .

Если условия (4) выполняются, то обеспечивается «сухая» посадка БПЛА при отсутствии качки судна.

Решением обратной задачи определяется зона пространства траекторных параметров БПЛА для каждой дистанции, в которой принимается решение о возможности безаварийной посадки. Начальные рассогласования по величинам  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ ,  $\Delta \psi$ ,  $\Delta \vartheta$  на порядок и более превосходят допустимые конструкцией посадочного устройства

значения  $\Delta_{k_y}$ ,  $\Delta_{k_z}$ ,  $\Delta_{k_\psi}$ ,  $\Delta_{k_\vartheta}$ , т. е. переходные процессы отработки начальных рассогласований по всем координатам должны затухнуть.

На видеомониторе АРМ оператор наблюдает за сближением БПЛА с судном. На экран АРМ (кроме текущего положения БПЛА в вертикальной и горизонтальной плоскостях относительно посадочного устройства по результатам наблюдения углового положения телевизионным каналом и дистанции дальномером) выводятся проекции расчетной траектории сближения БПЛА с судном и зона возможных отклонений от нее.

При выходе БПЛА из допустимой зоны, например, в результате резкого порыва ветра, необходимо принять решение о невозможности «сухой» посадки, после чего либо внести изменения в закон программного сближения (или самонаведения), либо поменять скорость и курс судна.

### Анализ движения судна

Качка судов в море в общем случае нерегулярна, изменчива и лишена видимой закономерности. Это послужило основанием для описания волн с помощью вероятностных методов, которые, в отличие от классического подхода гармонических колебаний, описываются соответствующими законами распределения. В связи с этим качка судна, перемещение определенных точек его корпуса описываются энергетическим спектром [5]. Для расчетов качки судов применяются типовые обобщенные спектры [6]. Такое описание

используется для оценки запаса остойчивости или вероятности механического повреждения судна и не пригодно для текущего описания колебаний судна.

Для моделирования динамики судна на волнении в настоящее время применяются различные расчетные методики. Традиционным является использование аналитических моделей, основанных на линейной теории волн и качки. Эти модели позволяют получить простые и удобные на практике расчетные формулы и методики [7]. Однако допущения линейной теории приводят к неточным и не согласующимся с экспериментами результатам, например, при штормовом волнении.

Исключим штормовые условия, полагая, что использование судового БПЛА в таких условиях проблематично, особенно посадка его на кран-балку.

Для описания динамики движения судна используются две декартовы системы координат: 1) неподвижная; 2) подвижная, связанная с судном. Горизонтальная плоскость неподвижной системы совпадает с невозмущенной поверхностью моря. Начало подвижной системы координат находится в центре тяжести судна.

Для системы посадки БПЛА важно знать смещение посадочного устройства в системе координат, принятой ранее для наведения БПЛА, что требует соответствующих преобразований показаний навигационной системы судна, приведенных, например, в работе [8].

Для уравнений движения судна при качке удобно использовать систему обобщенных координат, связанную с исходными системами определенными соотношениями. Эти соотношения, как и сами обобщенные координаты, определяются конкретной численной моделью судна. Принимаем судно жестким, двигающимся с постоянной скоростью и постоянным курсом. В качестве обобщенных координат, определяющих движение судна при качке, приняты угловые и линейные перемещения, а именно:  $\gamma_{кч}$  — бортовая качка (rolling);  $\vartheta_{кч}$  — килевая качка (pitching);  $\psi_{кч}$  — рыскание (yawing);  $x_{кч}$  — горизонтально-продольные колебания (surging);  $z_{кч}$  — горизонтально-поперечные колебания (swaying);  $h_{кч}$  — вертикальная качка (heaving).

Судно как твердое тело имеет шесть степеней свободы, движение в которых описывается уравнениями, подобными (4). Отличие в том, что необходимо учитывать движение присоединенной массы воды и возмущающее воздействие волн.

Посадка БПЛА самолетного типа (конечный участок приведения к посадочному устройству) занимает по времени не более нескольких минут, поэтому принимаем гипотезу регулярной качки и ее линейную модель. Если качка регулярная и процесс установившийся, то колебания в основном соответствуют собственной частоте колеба-

ний судна по каждой из степеней свободы и частоте возмущающего действия волн.

Параметры качки судна, измеряемые навигационной системой судна, содержат следующие составляющие [5–7]:

$$\left\{ \begin{aligned} \gamma_{кч} &= \sum_{j=1}^{n_\gamma} \gamma_{mj} \sin(\omega_{\gamma j} t + \varphi_{\gamma j}) + s_\gamma(t); \\ \vartheta_{кч} &= \sum_{j=1}^{n_\vartheta} \vartheta_{mj} \sin(\omega_{\vartheta j} t + \varphi_{\vartheta j}) + s_\vartheta(t); \\ \psi_{кч} &= \sum_{j=1}^{n_\psi} \psi_{mj} \sin(\omega_{\psi j} t + \varphi_{\psi j}) + s_\psi(t); \\ h_{кч} &= \sum_{j=1}^{n_h} h_{mj} \sin(\omega_{hj} t + \varphi_{hj}) + s_h(t); \\ z_{кч} &= \sum_{j=1}^{n_z} z_{mj} \sin(\omega_{zj} t + \varphi_{zj}) + s_z(t); \\ v_{кч} &= \sum_{j=1}^{n_v} v_{mj} \sin(\omega_{vj} t + \varphi_{vj}) + s_v(t), \end{aligned} \right. \quad (5)$$

где для каждой  $j$ -й гармоники  $\gamma_{mj}$ ,  $\vartheta_{mj}$ ,  $\psi_{mj}$ ,  $h_{mj}$ ,  $z_{mj}$  — амплитуды угловых и линейных колебаний судна;  $v_{mj}$  — амплитуда колебаний скорости движения судна;  $\omega_{\gamma j}$ ,  $\omega_{\vartheta j}$ ,  $\omega_{\psi j}$ ,  $\omega_{hj}$ ,  $\omega_{zj}$ ,  $\omega_{vj}$  — частоты колебаний;  $\varphi_{\gamma j}$ ,  $\varphi_{\vartheta j}$ ,  $\varphi_{\psi j}$ ,  $\varphi_{hj}$ ,  $\varphi_{zj}$ ,  $\varphi_{vj}$  — фазовые углы, соответствующие начальному моменту времени  $t_0$  наблюдения колебаний;  $S_i[s_\gamma(t), s_\vartheta(t), s_\psi(t), s_h(t), s_z(t), s_v(t)]$  — случайные составляющие  $i$ -го параметра качки, обусловленные нестационарностью волнения морской поверхности и погрешностью гармонической аппроксимации качки.

Посадочное устройство (точка прицеливания БПЛА) перемещается относительно своего статического (без качки и хода судна) положения (принятого за ноль системы координат в предыдущем разделе) в горизонтальной  $Z_{кч}(t)$ , вертикальной  $Y_{кч}(t)$  и продольной  $X_{кч}(t)$  плоскостях под действием качки судна. При учете только одной гармонической колебательной составляющей по каждой координате указанные перемещения определяются следующими выражениями:

$$\left\{ \begin{aligned} Z_{кч}(t) &= R_\gamma(\cos\gamma_0 - \cos(\gamma_0 - \gamma(\omega_\gamma t + \varphi_\gamma))) + \\ &+ R_\psi(\cos\psi_0 - \cos(\psi_0 + \psi(\omega_\psi t + \varphi_\psi))) + \\ &+ z_m \sin(\omega_z t + \varphi_z) + s_z(t); \\ Y_{кч}(t) &= R_\vartheta(\sin\vartheta_0 - \sin(\vartheta_0 - \vartheta(\omega_\vartheta t + \varphi_\vartheta))) + \\ &+ R_\vartheta(\sin\vartheta_0 - \sin(\vartheta_0 + \vartheta(\omega_\vartheta t + \varphi_\vartheta))) + \\ &+ h_m \sin(\omega_h t + \varphi_h) + s_y(t); \\ X_{кч}(t) &= R_\psi(\sin\psi_0 - \sin(\psi_0 + \psi(\omega_\psi t + \varphi_\psi))) + \\ &+ \int_0^t \Delta V_m \sin(\omega_v t + \varphi_v) dt + s_x(t), \end{aligned} \right. \quad (6)$$

где  $R_\gamma, R_\vartheta, R_\psi$  — расстояния точки прицеливания до осей колебаний судна, соответствующие радиусам колебаний по углам  $\gamma, \vartheta, \psi$ ;  $\gamma_0, \vartheta_0, \psi_0$  — углы наклона  $R_\gamma, R_\vartheta, R_\psi$  при отсутствии качки;  $h_m, z_m$  — амплитуды гармонических колебаний точки прицеливания посадочного устройства в горизонтальной и вертикальной плоскостях.  $R_\gamma, R_\vartheta, R_\psi, \gamma_0, \vartheta_0, \psi_0$  — постоянные величины, определяемые конструкцией судна, его загрузкой и расположением на нем кран-балки с посадочным устройством.

Принимаем жестким крепление посадочного устройства к кран-балке и крепление кран-балки к судну. В этом случае угловые колебания посадочного устройства соответствуют колебаниям качки судна (5)  $\gamma_{п.у} = \gamma_{кч}, \vartheta_{п.у} = \vartheta_{кч}, \psi_{п.у} = \psi_{кч}$ , а колебания в горизонтальной и вертикальной плоскостях  $Z_{п.у} = Z_{кч}, Y_{п.у} = Y_{кч}$  соответствуют уравнениям (6).

Особенностью (6) является нелинейная зависимость смещения посадочного устройства по осям  $x, y, z$  от угловых колебаний судна.

Если навигационная система судна обеспечивает в текущем времени измерение переменных параметров качки судна [значения амплитуды, частоты и фазы (5) каждой из гармоник], а значения постоянных конструктивных параметров судна  $R_\gamma, R_\vartheta, R_\psi, \gamma_0, \vartheta_0, \psi_0$  известны, то соотношения (6) определяют смещение захватного устройства  $X_{кч}(t), Y_{кч}(t)$  и  $Z_{кч}(t)$  в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

В условиях регулярной качки максимальные значения случайных составляющих  $s_i$  малы по сравнению с амплитудами основных гармоник (5). Смещение захватного устройства  $Z_{кч}(t)$  и  $Y_{кч}(t)$  в условиях регулярной качки определяется суммой трех гармонических составляющих, а угловые смещения соответствуют  $\gamma_{кч}, \vartheta_{кч}, \psi_{кч}$ .

Если момент времени  $t_k$ , при котором БПЛА достигнет посадочного устройства, не определен, то условие безаварийной посадки (3) при идеальной траектории сближения примет вид

$$\begin{aligned} \max Y_{кч} &\leq \Delta_{к y}; \max Z_{кч} \leq \Delta_{к z}; \\ \psi_m &\leq \Delta_{к \psi}; \vartheta_m \leq \Delta_{к \vartheta}; \\ \gamma_m &\leq \Delta_{к \gamma}; V_a - V_{п.у} \pm \Delta V_m \leq V_{пос} + \Delta_{к v}. \end{aligned} \quad (7)$$

Условия (7) могут выполняться при малых углах качки (амплитуда до  $\leq 5^\circ$ ) в части угловых смещений и для линейных смещений ( $\max Y_{кч} \geq \Delta_{к y}, \max Z_{кч} \geq \Delta_{к z}$ , соответствующих угловой амплитуде до  $\approx 1^\circ$ ) без учета влияния случайной составляющей.

Статистическая обработка показаний навигационной системы судна позволяет определить параметры качки (5), максимальные или средние значения случайных составляющих  $s_i$ , кото-

рые включают в себя и погрешности измерения, что в свою очередь позволяет заранее определить погрешности прогнозируемых значений  $Y_{кч}(t_k), Z_{кч}(t_k), \psi_{кч}(t_k), \vartheta_{кч}(t_k), \gamma_{кч}(t_k)$ .

При реализации наведения БПЛА в прогнозируемое положение посадочного устройства условие безаварийной «сухой» посадки, в отличие от (4), примет вид

$$\mathbf{A}(t_k) - \mathbf{\Pi}_{кч}(t_k) + \mathbf{S}_{\max} \leq \Delta_{к}, \quad (8)$$

где  $\mathbf{A}(t_k)$  — вектор основных параметров БПЛА  $X_a, Y_a, Z_a, \psi_a, \vartheta_a, \gamma_a$  при  $t = t_k$ ;  $\mathbf{\Pi}_{кч}(t_k)$  — вектор прогнозируемых параметров положения посадочного устройства  $X_{кч}, Y_{кч}, Z_{кч}, \psi_{кч}, \vartheta_{кч}, \gamma_{кч}$  при  $t = t_k$ ;  $\mathbf{S}_{\max}$  — вектор максимальных значений  $s_x, s_y, s_z, s_\gamma, s_\vartheta, s_\psi, s_\vartheta$  отклонения движения посадочного устройства судна от принятой линейной модели (5) качки или их значений, обеспечивающих допустимую вероятность риска нестыковки БПЛА с посадочным устройством.

Отметим, что в условии (8)  $t_k$  является известной величиной, которая грубо определяется отношением измеряемых одновременно дистанции и скорости сближения БПЛА с судном и уточняется по результатам интегрирования уравнений (2).

### Увеличение точности прогноза положения посадочного устройства

Увеличение точности прогноза положения посадочного устройства достигается при уменьшении амплитуды качки судна. Все технические средства уменьшения качки судна, включая стабилизацию движения судна на курсе [9], положительно влияют на абсолютные значения смещения посадочного устройства.

Увеличение числа гармоник при аппроксимации показаний навигационной системы (5), использование второй и третьей гармоник целесообразно, если позволяет уменьшить значения составляющих вектора  $\mathbf{S}_{\max}$ .

Существует ряд методов прогнозирования параметров качки как случайного процесса [10]. В простейшем случае в ходе наблюдения изменений  $s_i$  определяются среднеквадратические и максимальные отклонения от основной гармоники колебаний, при помощи которых находятся для каждой  $i$ -й координаты посадочного устройства их среднеквадратические отклонения  $\sigma s_i$  и максимальные значения изменения  $\Delta s_i$ , которые используются в неравенствах (8).

Важно отметить, что анализировать параметры качки и отклонение их основных гармоник  $\mathbf{S}_{\max}$  можно до появления БПЛА в точке, где определяются его параметры  $\mathbf{A}(t = 0)$ . Есть время, чтобы иметь достаточную статистику для точной количественной оценки  $w(s_i)$  — плотности



■ Рис. 2. Схема информационного взаимодействия судна и БПЛА при посадке

распределения погрешности прогнозирования каждой  $i$ -й координаты.

При возможности изменения курса движения судна нужно на время посадки БПЛА выбирать курс движения судна относительно волнового фронта, обеспечивающий минимальные значения, в первую очередь,  $S_{\max}$ . На их величину оказывают существенное влияние параметры волн (регулярность, форма, высота, длина, частота, направление и др.), параметры судна (размеры и форма корпуса, весовая нагрузка, собственные частоты качки, скорость, направление движения и др.), маневрирование судна (изменения курса и скорости судна).

На регулярном волнении, при равенстве периода собственных колебаний судна кажущемуся периоду волны, возникает резонанс. На нерегулярном волнении также возможна резонансная качка — при близости периода собственных колебаний кажущемуся периоду (или кратной ему величине) волновой гармонике, соответствующему максимуму волнового спектра. Изменением курса и скорости судна можно изменить кажущийся период волн и тем самым уменьшить амплитуду качки и значения  $S_{\max}$ .

Предварительно рекомендуемый курс можно определить по штормовой диаграмме, имеющейся в руководстве судоводителя каждого судна [7], более точно путем определения не только амплитуд колебаний, но и дисперсий, и максимальных значений случайных составляющих  $S_{\max}$  на различных курсах движения судна.

Найдя закон изменения погрешности  $s_i$ , по результатам измерения параметров качки можно оценить риск  $P_i$  превышения допустимого уровнем (8) значения  $[s_i]$  по каждой координате  $i$ :

$$P_i = 1 - \int_0^{[s_i]} w(s_i) ds_i, \quad (9)$$

где  $w(s_i)$  — плотность распределения значений  $s_i$ ;  $[s_i]$  — допустимое значение  $s_i$ .

После проведения оценки (9) на различных курсах движения судна уточняется направление наиболее благоприятного курса, обеспечившего минимальный риск при сцеплении БПЛА с посадочным устройством судна при качке.

### Функционирование системы совместного управления движением судна и БПЛА

Функционирование совместного управления движением судна и БПЛА при посадке, обмен информацией, хронологическая последовательность принимаемых решений и управляющих сигналов показаны на упрощенной схеме (рис. 2). Судовые функции реализуются при помощи АРМ под контролем оператора. Аппаратура БПЛА че-

рез канал связи непрерывно или через определенные полетным заданием интервалы времени передает на судно информацию мониторинга, траекторные параметры движения и оценку текущего запаса топлива.

Функционирование АРМ, особенности использования судового телевизионного канала и дальномеров для наблюдения процесса сближения рассмотрены в работе [1] и более подробно в работе [2].

Маневр БПЛА для повторного захода на посадку заслуживает отдельного рассмотрения, так как алгоритмы и программы, реализующие маневр, оптимальный по длине пути и расходу топлива на первом этапе возвращения БПЛА, здесь не пригодны, так как отсутствует участок прямой траектории движения [2].

### Заключение

Совместное управление движением судна и БПЛА при посадке помогают оператору принимать решение с известной величиной риска принятия ошибочного решения о реализации «сухой» или «мокрой» посадки на основе анализа внешних условий, динамики движения БПЛА и судна. Точность оценки этого риска зависит от адекватности математической модели реальным параметрам движения БПЛА и точности измерителей параметров внешних условий и параметров качки судна.

В связи с отсутствием опыта эксплуатации БПЛА на судах целесообразно проводить математическое моделирование с максимально адекватной моделью приведения БПЛА к посадочному устройству с воспроизведением:

- воздушных возмущений, вызванных движением судна, и ветровых порывов;
- всех компонентов качки судна, включая случайные составляющие;
- запаздывания сигналов судовой системы управления движением сближения БПЛА с посадочным устройством;
- особенностей бортового координатора БПЛА при автономном приведении его к посадочному устройству.

Организация этих работ ускорит использование БПЛА на судах и кораблях.

Исследования проводятся при поддержке РФФИ, грант № 13-08-00925А.

### Литература

1. Подоплекин Ю. Ф., Шаров С. Н. Ключевые вопросы теории и проектирования систем посадки беспилотных летательных аппаратов на малоразмерные суда // Информационно-управляющие системы. 2013. № 6. С. 14–24.



2. Посадка беспилотных летательных аппаратов на суда: проблемы и решения / А. А. Александров, М. С. Дворяшин, В. В. Морозов, Е. С. Петухова, Ю. Ф. Подоплекин, В. В. Соловьева, С. Г. Толмачев, С. Н. Шаров, И. М. Яцковская; под науч. ред. Г. А. Коржавина. — СПб.: Судостроение, 2014. — 192 с.
3. Боднер В. А. Системы управления летательными аппаратами. — М.: Машиностроение, 1973. — 504 с.
4. Пат. на полезную модель 133094 Российская Федерация, МПК В 64 F1 / 00 (2006.01). Судовая система управления посадкой беспилотного летательного аппарата / С. Н. Шаров, М. С. Дворяшин, В. В. Соловьева. — № 2013114440/11; заявл. 02.04.2013; опубл. 10.10.2013, Бюл. № 28. — 2 с.
5. Бородай И. К., Мореншильдт В. А., Виленский Г. В. Прикладные задачи динамики судов при волнении. — Л.: Судостроение, 1983. — 264 с.
6. Справочник по теории корабля. Т. 2 / под ред. Я. И. Войткунского. — Л.: Судостроение, 1985. — 440 с.
7. Чижумов С. Д. Основы динамики судов на волнении. — Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2010. — 110 с.
8. Толмачев С. Г., Шаров С. Н. Прогнозирование положения захватного устройства при посадке БПЛА на движущееся судно в условиях качки: сб. материалов XX Санкт-Петербургской Международ. конф. по интегрированным навигационным системам/ под ред. В. Г. Пешехонова. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «Электронприбор», 2013. С. 205–208.
9. Клячко Л. М., Тарасов Н. Н., Острецов Г. Э. Управление движением судна с компенсацией возмущений//Морской вестник. 2014. № 3(51). С. 52–56.
10. Андриевский Б. Р., Шаров С. Н. Определение положения посадочного устройства БПЛА в условиях качки//Морской вестник. 2012. № 2(42). С. 75–77.

UDC 623.746.07519

**Ship and UAV Joint Motion Landing Control**Podoplekin Yu. F.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, cri-granit@peterlink.ruSharov S. N.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, cri-granit@peterlink.ru<sup>a</sup>JSC «Concern «Granit-Electron», 3, Gospitalnaia St., 191014, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** The key conditions for a damage-free (“dry”) landing of a unmanned aerial vehicle (UAV) on a ship is the playback accuracy of UAV programmed motion, the attitude stabilization accuracy of the ship landing gear, and the forecast accuracy of the landing gear attitude relative to the UAV in the moment of the clutch. The aim of this work is studying the possibility and practicability of joint control over the ship and UAV to provide the best conditions for damage-free landing. **Results:** Algorithms were proposed for the information exchange between the ship and UAV on the base of the analysis of their movement at all stages from launch to landing. The information from the navigational and other airborne instruments sent on the radio to the ship helps to control the return of the UAV, correct its programmed trajectory in a real time, and provide the permissible deviations of its movement parameters at the moment of its clutch with the landing gear. The ship is a solid body with six degrees of freedom. It is analyzed with due regard for the added mass of water and the wave-disturbance effect. Pitch and roll are represented as a confined sum of harmonic oscillations and a random component for each coordinate. The nonlinear shift of the landing gear installed on an outboard davit is also taken into account. On the base of the landing gear oscillation analysis, the landing gear attitude is predicted for the moment of its clutch with the UAV. Preliminary pitch and roll analysis along with the determination of the ship’s head and speed optimums provide the best forecast accuracy. **Conclusion:** The joint motion control of the ship and UAV allows us to provide the most favorable conditions for the landing, helping the operator (with a certain risk of an erroneous decision) to perform a “dry” or “wet” (emergency) landing.

**Keywords** — Unmanned Aerial Vehicle, Ship an UAV Data Management System.**References**

1. Podoplekin Yu. F., Sharov S. N. Key Aspects of Theory and Design of Landing Systems of UFV on Small Vessels. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2013, no. 6, pp. 14–24 (In Russian).
2. Aleksandrov A. A., Dvoryashin M. S., Morozov V. V., Petukhova E. S., Podoplekin Iy. F., Soloviyova V. V., Tolmachev S. G., Sharov S. N., Yatskovskaya I. M. *Posadka bespilotnykh letatel'nykh apparatov na suda: problemy i reshenia* [UAV Landing on Sea Vessels: Problem Definition and Solutions]. Ed. by G. A. Korzhavin. Saint-Petersburg, Sudostroenie Publ., 2014. 192 p. (In Russian).
3. Bodner V. A. *Sistemy upravleniia letatel'nyimi apparatami* [Aerial Vehicle Control Systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 504 p. (In Russian).
4. Sharov S. N., et al. *Sudovoi sistema upravleniia posadkoi BPLA* [UAV Marine Landing System]. Patent RF, no. 133094, 2013.
5. Boroday I. K., Morenschild V. A., Vilenskiy G. V. *Prikladnye zadachi dinamiki sudov pri volnenii* [Ship's Disturbance Dynamics Application]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1983. 264 p. (In Russian).
6. Voytkunskiy Y. I. *Spravochnik po teorii korablia* [Reference Book on Ship Theory]. Vol. 2. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1985. 440 p. (In Russian).
7. Chizhiumov S. D. *Osnovy dinamiki sudov na volnenii* [Dynamics Basis in a Seaway]. Komsomol'sk-na-Amure, KnAGTU Publ., 2010. 110 p. (In Russian).
8. Tolmachev S. G., Sharov S. N. Forecast of Gripping Device Attitude for UAV Landing on Vessel under Pitch and Roll Conditions. *20th Saint-Petersburg Intern. Conf. on Integrated Navigation Systems*. Ed. by V. G. Peshekhonov. Saint-Petersburg, Concern Elektropribor Publ., 2013, pp. 205–208 (In Russian).
9. Klyachko A. M., Tarasov N. N., Ostretsov G. E. Motion Control of Ships with Disturbance Compensation. *Morskoi vestnik*, 2014, no. 3(51), pp. 52–56 (In Russian).
10. Sharov S. N., Andrievskiy B. R. Determining the Position of Landing Gear of Unmanned Aerial Vehicle in Condition of Rolling Ship. *Morskoi vestnik*, 2012, no. 2(42), pp. 75–77 (In Russian).