

УДК 623.746.07519

## КЛЮЧЕВЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ПОСАДКИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА МАЛОРАЗМЕРНЫЕ СУДА

**Ю. Ф. Подоплёкин,**

доктор техн. наук, профессор

**С. Н. Шаров,**

доктор техн. наук, профессор

ОАО «Концерн «Гранит-Электрон», г. Санкт-Петербург

Приводится обзор основных теоретических вопросов проектирования систем посадки беспилотных летательных аппаратов на малоразмерные суда. Рассматривается способ посадки беспилотных летательных аппаратов на кран-балку, выдвинутую за борт движущегося судна. Обсуждаются траектории их возврата на судно-носитель и особенности приведения его на зацеп кран-балки. Показаны способы управления посадкой в условиях качки судна.

**Ключевые слова** — беспилотный летательный аппарат, информационно-управляющая система, судно.

### Введение

Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в таких сферах как дистанционное зондирование земли, контроль коммуникаций и границ, ретрансляция сигналов, экологический мониторинг снижает себестоимость услуг на порядок и даже больше по сравнению с традиционными космическими или авиационными системами. Прогрессу гражданских систем способствует миниатюризация и удешевление электронных компонентов бортового оборудования.

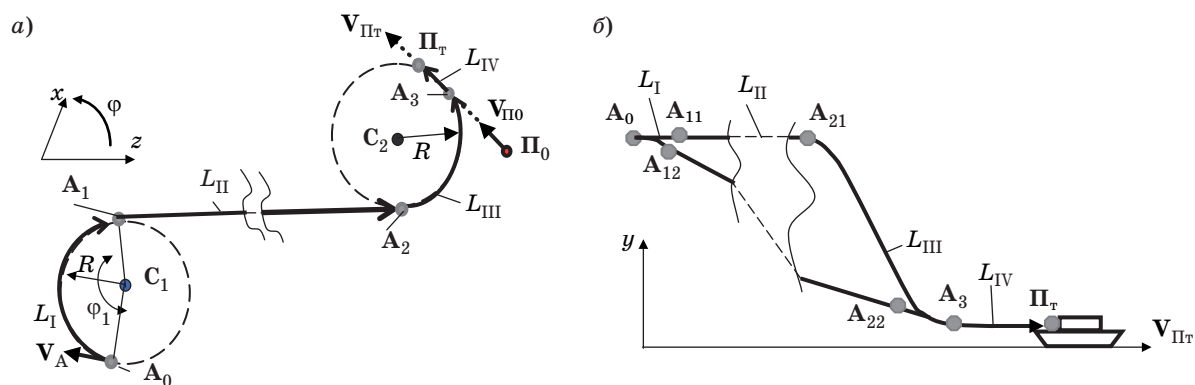
Сравнение БПЛА самолетного и вертолетного типов (тип двигателя, запас топлива, полезная нагрузка) показало ряд преимуществ БПЛА самолетного типа: больший радиус действия; большее время полета; лучшие аэродинамические показатели; больший коэффициент полезной нагрузки.

Однако БПЛА вертолетного типа имеют другое серьезное преимущество, заключающееся в их возможности совершать посадку на площадки ограниченных размеров, что не способны осуществить БПЛА самолетного типа. Возможность размещения и применения многоцелевых комплексов БПЛА на судах малого водоизмещения реализуется только тогда, когда решен вопрос обеспечения их безопасной посадки.

### Сравнительный анализ способов посадки

Вследствие уникальных эксплуатационных и технических особенностей, с которыми сталкивается флот при использовании БПЛА на судах гражданского назначения, не приспособленных для посадки летательных аппаратов, немаловажное значение имеет поиск разработчиком судна проектных решений, обеспечивающих возможность размещения на судне требуемых средств посадки. Например, обеспечение взлетно-посадочной полосы, на которую непосредственно осуществляется посадка с последующим пробегом и торможением. Однако решение этого вопроса в большинстве случаев связано с необходимостью значительного изменения внешней архитектуры судна (изменения положения надстроек, навигационного оборудования, средств погрузки и т. д.) в целях поиска необходимых площадей. Это не всегда является возможным и приемлемым для проектанта судна в связи с вероятными существенными изменениями некоторых его эксплуатационных и технических характеристик.

Наиболее трудной проблемой является посадка «сухим» методом, — в отличие от спуска аппарата на парашюте и посадки на воду, после которой необходим восстановительный ремонт аппарата в результате коррозии от воздействия



■ Рис. 1. Типовые траектории возвращения БПЛА в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскости

соленой воды, что связано со значительными расходами. В связи с этим отрабатываются различные методы посадки БПЛА на палубу судна (некоторые из них основаны на способах, разработанных для посадки БПЛА на сушу): посадка БПЛА в вертикальную сеть, с использованием крыла-парашюта и подхватом штангой, укрепленной на вертикальном шесте на борту судна, и др. [1].

Использование БПЛА на судах и кораблях сдерживается единственной причиной — отсутствием надежных средств их посадки. ОАО «Концерн «Гранит-Электрон» имеет большой практический опыт создания корабельной и бортовой аппаратуры управления БПЛА, а также существенный теоретический задел по способам «сухой» посадки БПЛА на кран-балку с захватным устройством в условиях качки судна [2, 3]. Достоинства способа посадки БПЛА на выдвигающуюся за борт судна кран-балку: 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 и сменной целевой аппаратурой, чаще всего радиолокационной или оптико-электронной (телевизионной, тепловизионной или лазерной). Судовое оборудование включает в себя пульт управления, аппаратуру связи носителя с БПЛА, а также катапульту для пуска БПЛА и посадочное устройство [4, 5].

В зависимости от координатора — устройства, определяющего рассогласование направления полета и координаты БПЛА относительно судового посадочного устройства (точки прицеливания), возможны следующие способы управления движением БПЛА для посадки:

— автономное или автоматизированное управление БПЛА с бортовым координатором, самонаведение на зацеп устройства посадки [6];

— автономное или автоматизированное управление БПЛА с судовым координатором, где сигналы управления, обеспечивающие приведение БПЛА к зацепу посадочного устройства, по каналу связи передаются на борт БПЛА [7].

Возможно комбинированное управление с использованием информации бортового и судового координаторов, а также резервное ручное управление с визуальным наблюдением оператором движения БПЛА.

### Основные задачи управления посадкой

Первой задачей для любого способа управления посадкой является оценка возможности возвращения БПЛА на судно-носитель при имеющемся запасе горючего на борту — это задача определения программной траектории движения с учетом текущих координат и параметров движения обоих объектов, обеспечивающей минимальный путь и необходимые направление и высоту полета на конечном участке.

Траектории возвращения — движение БПЛА в горизонтальной и вертикальной плоскостях, с момента начала сближения в точке  $A_0$  с вектором скорости  $V_A$ , в точку зацепления посадочным устройством (посадка)  $\Pi_T$  (рис. 1, а, б).

В момент зацепления судно движется с вектором скорости  $V_{\Pi T}$ .

В момент времени  $t=0$  (начало маневра сближения) БПЛА находится в точке  $A_0$  с координатами  $x_{A0}, y_{A0}, z_{A0}$ , имеет скорость  $V_A$  и направление движения  $\varphi_{A0}$ . В этот момент судно с устройством посадки находится в точке  $\Pi_0$ , имеет скорость  $V_{\Pi 0}$  и направление движения  $\varphi_{\Pi 0}$ .

В общем случае траектория сближения состоит из четырех характерных частей. Первая часть, соответствующая развороту БПЛА в сто-

рону посадки, — от точки начального положения БПЛА  $A_0$  до точки окончания маневра разворота  $A_1$ .

Если пренебречь инерционностью системы управления БПЛА, то можно считать, что маневр происходит по дуге окружности минимально возможного радиуса  $R$  с центром в точке  $C_1$ .

Длина первого участка  $L_I = \varphi_I R$ , где  $\varphi_I$  — угловое расстояние между  $A_0$  и  $A_1$ ;  $R$  — радиус маневра разворота БПЛА, который определяется допустимой величиной боковой перегрузки и допустимой величиной угла скольжения.

Вторая часть траектории сближения — прямолинейный участок, соединяющий точку окончания первого маневра  $A_1$  и точку  $A_2$ , соответствующую началу второго маневра — выходу на курс судна в горизонтальной плоскости, а в вертикальной плоскости — выходу на малую высоту, обеспечивающую дальнейшее наведение на посадочное устройство. Длина этого участка в горизонтальной плоскости равна расстоянию между центрами окружностей первого и второго разворота БПЛА, т. е.  $L_{II} = |C_2 - C_1|$ . В вертикальной плоскости на этом участке происходит полет на постоянной высоте или равномерное снижение на малую высоту.

Маневр третьего участка — движение в горизонтальной плоскости по окружности радиуса  $R$  с центром в точке  $C_2$  от точки  $A_2$  до точки  $A_3$ , в которой направление движения БПЛА совпадает с направлением движения носителя посадочного устройства. Длина этого участка  $L_{III} = \varphi_{III} R$ , где  $\varphi_{III}$  — угловое расстояние между точками  $A_2$  и  $A_3$ . В вертикальной плоскости на этом участке происходит снижение на малую высоту.

На последнем, четвертом участке обеспечивается точное приведение БПЛА к посадочному устройству. Здесь происходит движение, близкое к прямолинейному, по курсу носителя между точками  $A_3$  и конечной точкой  $\Pi_T$  посадки БПЛА. Длина этого участка  $L_{IV}$  имеет постоянное значение, например, 300—800 м. Эта величина выбирается заранее из условия обеспечения точного приведения БПЛА на устройство посадки. На этом участке компенсируются погрешности реализации расчетной траектории сближения и совершается снижение скорости БПЛА до минимально допустимой величины.

Параметры траектории определяются в зависимости от принятого критерия оптимальности и ограничений на параметры движения БПЛА и судна.

*Обеспечение минимального пути*

$$L(A_0, \Pi_T) \rightarrow \min L_{\Sigma}. \quad (1)$$

Если принять БПЛА материальной точкой для траектории типа рис. 1, а, задача оптими-

зации сводится к поиску  $L(A_0, A_1, A_2, A_3) \rightarrow \min L_{\Sigma}$ , так как длина участка  $L_{IV}$  принимается постоянной. Радиус маневра БПЛА в горизонтальной плоскости ограничен допустимыми значениями боковой перегрузки и угла скольжения, а в вертикальной — допустимыми значениями скорости снижения и угла атаки.

При известных координатах  $A_3$  вариационная задача поиска оптимальной функции с двумя закрепленными концами с указанными выше ограничениями решается аналитически строго [8]. Для траектории посадки БПЛА на движущееся судно координаты  $A_3$  не определены. По этой причине предложен [9] численный метод поиска параметров траектории возвращения БПЛА, оптимальных по критерию (1).

Длина горизонтальной проекции траектории сближения  $L_T$  определяется суммой длин четырех участков:  $L_T = L_{TI} + L_{TII} + L_{TIII} + L_{TIV}$ .

В вертикальной плоскости траектория возврата минимальной длины  $L_B$  грубо определяется постоянной скоростью снижения  $V_y$  как  $V_y = (y_{A0} - y_{A3}) / T_3$ , а точнее, с учетом переходных процессов набора вертикальной скорости и торможения. В вертикальной плоскости (см. рис. 1, б) траектория в общем случае также состоит из нескольких участков: набора постоянной скорости снижения, поддержания постоянной скорости снижения и уменьшения ее до нуля в точке  $A_3$ . Для исключения «просадки» при снижении БПЛА на высоту посадочного устройства необходим участок плавного изменения скорости снижения, например, по экспоненциальной траектории. Длина минимального пути возврата

$$\min L_{\Sigma} = \sqrt{L_T^2 + L_B^2}.$$

*Обеспечение минимального времени возврата*  
 $T_{вз}$  БПЛА на носитель

$$L(A_0, \Pi_T) / V_A \rightarrow \min T_{вз}. \quad (2)$$

Если скорость летательного аппарата и носителя — постоянные величины, то выбранные траектории по критериям (1) и (2) совпадают.

На конечном участке  $L_{IV}$ , длина которого мала и задана, скорость БПЛА снижается до минимально допустимой величины. На выбор типа траектории возврата этот участок не влияет.

Если скорость летательного аппарата зависит от высоты и допускается максимальный расход топлива, то наилучшей траекторией возврата будет высотная траектория. В горизонтальной плоскости она совпадает с рассмотренной ранее. В вертикальной плоскости начальный наиболее протяженный участок траектории — полет на постоянной высоте — позволяет развивать мак-

симальную горизонтальную скорость БПЛА. Снижение из точки  $A_{21}$  в точку  $A_3$  должно занимать минимальный интервал времени и имеет 3 участка, основной из которых — снижение с максимально допустимым траекторным углом наклона. Первый участок — это переход от горизонтального полета в пикирование, а третий — выход на постоянную малую высоту, исключая просадку. Расчет и реализация такого маневра отработаны, например, в ОАО «Концерн «Гранит-Электрон» для противокорабельных крылатых ракет [5, 9, 10].

Расчет протяженности траектории сближения  $L$  в реальном масштабе времени позволяет контролировать возможность возвращения БПЛА на судно-носитель посадочного устройства. Если оставшийся на борту запас горючего  $Q$  уменьшился до критической величины  $Q_{кр}$ , необходимой для возвращения на носитель, то необходимо начинать маневр возвращения БПЛА:  $Q_{кр} = Lq_{уд}$ , где  $q_{уд}$  — расход топлива на единицу пути.

Если при возвращении на носитель не обеспечивается гарантированное сцепление БПЛА с посадочным устройством и необходимо иметь запас топлива для повторного захода на посадку, траектория сближения выбирается из условия *минимального расхода топлива* БПЛА при возврате на носитель. Критерий выбора траектории в этом случае

$$L(A_0, \Pi_r) q_{уд} \rightarrow \min Q, \quad (3)$$

где  $q_{уд}$  — экономичный расход топлива на единицу пути, определяющий оптимальную высоту и скорость возврата БПЛА. В качестве базы для сравнения и первого приближения для выбора оптимальной траектории по критерию (3) можно использовать траектории, выбранные по критериям (1) или (2).

Для каждого участка I, II и III траектории формируется числовой массив  $A_i(x, y, z, t)$ . Таким образом, формируется вектор расчетной траектории сближения  $A_{тр} = [A_I(1:i_1) A_{II}(1:i_2) A_{III}(1:i_3)]$ .

Реальная траектория сближения БПЛА с судном подбирается методом численного моделирования движения БПЛА по маршруту «идеальной» траектории, когда БПЛА с системой управления принимаются идеальным безинерционным звеном. Далее моделируется движение БПЛА по этой траектории с учетом инерционности аппарата и ограничений на управляющие моменты. При этом анализируются погрешности реализации этой траектории в точке  $A_3$ . В качестве меры устранения систематической погрешности, обусловленной инерционностью аппарата и ограничениями на управляющие моменты,

предлагается вводить упреждение в управление на  $n$  шагов относительно «идеальной» траектории  $A_{тр}$  [11].

При отклонении текущих координат, измеряемых автопилотом БПЛА в боковой плоскости  $z(t)$  и высотомером в продольной плоскости  $h(t)$ , от заданных полетным заданием значений система автопилотирования и навигации автономно или при помощи БЦВМ выдает управляющие сигналы на рулевые органы, которые текущие координаты приводят в соответствие высоте полета  $h(t) = h_{тр}(t)$  и траекторным значениям в боковой плоскости  $z(t) = z_{тр}(t)$ .

Погрешность реализации этой траектории в точке  $A_3$  под действием случайных факторов внешней среды и внутренних помех в бортовой аппаратуре будет определять начальное несогласование для системы приведения БПЛА к устройству зацепления на носителе.

### Точное приведение БПЛА на зацеп посадочного устройства

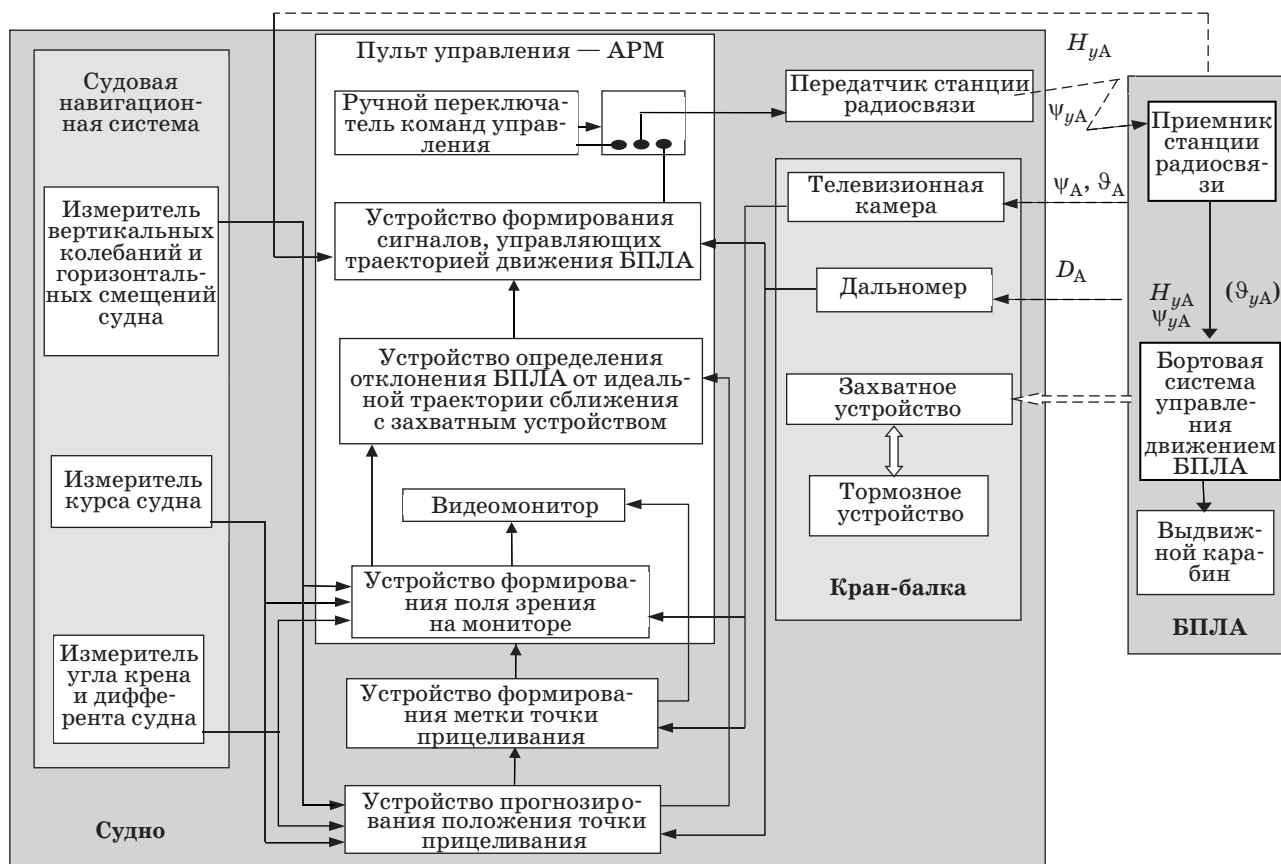
В системах приведения БПЛА к посадочному устройству информация о движении цели воспринимается координатором цели, размещенным в носовой части БПЛА или на судне [12]. На основе этой информации формируются управляющие сигналы, подаваемые в систему управления, которая обеспечивает движение аппарата по направлению к пеленгуемой цели.

На начальном этапе захода на посадку применяется инерциальное наведение на «математическую» цель с коррекцией положения БПЛА и скорости при маневре корабля-носителя по информации, передаваемой по радиолинии. На конечном участке после захвата сигнала используется самонаведение на точку прицеливания посадочного устройства.

Автономная бортовая система БПЛА наводится на точку прицеливания, которая является центром допустимой области на кран-балке, где обеспечивается сцепление БПЛА с посадочным устройством. Если эта точка имеет контраст (например, подсвечена световым фонарем), то приведение к ней летательного аппарата аналогично самонаведению крылатой ракеты на контрастную цель. Особенности здесь следующие.

Указанная точка прицеливания не имеет контраста, так как разместить в ней излучатель или отражатель невозможно по конструктивным ограничениям (в эту точку попадает БПЛА в момент сцепления с посадочным устройством). По этой причине на кран-балке и судне необходимо установить сигнальные маяки (минимум 3 световых фонаря или светоотражателя) с известным геометрическим расположением относительно

Параметры БПЛА



■ Рис. 2. Структурная схема аппаратуры судовой системы посадки БПЛА

точки прицеливания. Здесь приведение БПЛА к точке прицеливания аналогично тому, как наводятся крылатые ракеты на неконтрастные цели. В этом случае наблюдаются контрастные ориентиры, расположенные вблизи цели, или сравнивается наблюдаемое изображение кран-балки с его эталонным изображением по принципу корреляционно-экстремальных систем.

Другой особенностью этого участка является необходимость не только привести БПЛА в точку прицеливания с минимальной погрешностью по координатам в вертикальной и боковой плоскостях, но и выдержать направление движения БПЛА параллельно скорости движения судна с точностью до единиц угловых градусов. Этого ограничения не имеют системы самонаведения ракет. Точная индикация этого направления координатором БПЛА требует продольной базы для размещения курсовых маяков, что проблематично для малоразмерных судов. Достижимые точности определения направления при помощи только поперечной базы расположения трех маяков требуют дополнительных исследований.

Практика проектирования и эксплуатации систем управления конечным положением различного назначения свидетельствует о том, что воздействие внешней среды может проявляться самым различным образом и во многих случаях носить противодействующий нормальному режиму функционирования системы характер.

Динамика этих процессов с бортовым координатором (аналогично головкам самонаведения ракет) хорошо изучена в прошлом веке и описана, например, в работах ОАО «Концерн «Гранит-Электрон». Методический аппарат оценки промаха летательного аппарата под воздействием детерминированных и случайных факторов в настоящее время хорошо отработан и изложен [13—16].

### Судовая система управления посадкой БПЛА

Важнейшим фактором, обуславливающим трудность посадки БПЛА на движущееся судно, является качка. Для компенсации влияния качки естественным техническим средством

является пространственная стабилизация захватного устройства, которая требует использования трехзвенной системы приводов. В работе [7] предлагается жестко закрепить захватное устройство на кран-балке, а стабилизировать его пространственное положение на экране монитора автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора таким образом, чтобы в неподвижной системе координат наблюдать рассогласование текущего местонахождения БПЛА и точки прицеливания на захватном устройстве.

Состав и структурная схема связей аппаратуры судовой системы посадки БПЛА представлены на рис. 2.

Центральное место на судне занимает пульт управления — АРМ. Измерение параметров движения судна обеспечивает навигационная система судна. Кран-балка обеспечивает вынос захватного устройства для посадки БПЛА.

В состав навигационной системы входят измерители вертикальных колебаний и горизонтальных смещений судна, текущего курса судна, крена и дифферента судна. Указанные измерители обеспечивают систему управления посадкой необходимой информацией о текущем положении судна.

В состав АРМ входят переключатель команд управления с ручного режима на автоматический; устройство формирования сигналов управления траекторией сближения БПЛА с судном; устройство определения отклонения БПЛА от идеальной траектории сближения; видеомонитор, на котором отображается наблюдаемое видеобразное изображение и служебные метки; устройство формирования поля зрения для видеомонитора; устройство формирования метки точки прицеливания и устройство прогнозирования положения метки точки прицеливания в момент сцепления БПЛА с захватным устройством.

Важно отметить, что функциональные устройства АРМ реализуются программным путем на ЦВМ универсальной структуры аналогично прибору корабельной системы управления ракетным оружием [10]. Внутриприборные связи реализуются, например, на общей шине ISA, а межприборные — по сети Ethernet.

На кран-балке размещаются телевизионная камера (ТВК), дальномер, захватное и тормозное устройства. Для сцепления с судовым посадочным устройством на БПЛА имеется выдвижной карabin.

Конструктивно поместить ТВК непосредственно в точке прицеливания невозможно. Размещение ее на продолжении «идеальной» посадочной траектории, проходящей через центр допустимой для зацепления зоны посадочного устройства, приводит к существенному увели-

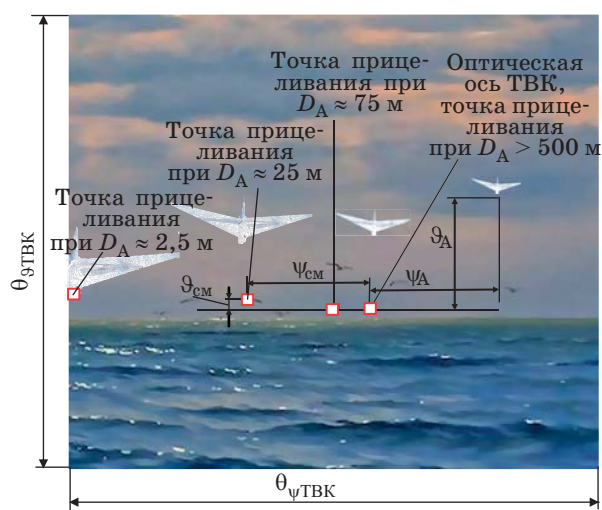
чению поперечного размера посадочной кран-балки, а также к затенению поля зрения телевизионного канала элементами конструкции посадочного устройства.

По этим причинам ТВК целесообразно разместить на внешней стороне посадочного устройства (со стороны подлета БПЛА). В такой схеме размещения угловой размер между направлением «идеальной» траектории посадки и оптической осью поля зрения ТВК не будет постоянным, как в схеме размещения, приведенной в работе [17], а будет изменяться по мере изменения дистанции.

На малой дистанции образуется «слепая» зона, где БПЛА уходит за пределы зоны наблюдения ТВК.

Пример сюжета, наблюдаемого ТВК, который видит оператор на видеомониторе, показан на рис. 3. На нем изображены БПЛА, находящиеся на разных дистанциях  $D_A$  от посадочного устройства. Угловой размер наблюдаемого изображения соответствует угловому полю зрения ТВК в горизонтальной  $\theta_{\psi\text{ТВК}}$  и вертикальной  $\theta_{\vartheta\text{ТВК}}$  плоскостях, с разрешением, например, 1024 и 820 элементов соответственно. Размерными линиями указаны измеряемые угловые координаты БПЛА ( $\vartheta_A, \psi_A$ ) относительно точки прицеливания в вертикальной и горизонтальной плоскостях и аналогичные координаты ( $\vartheta_{\text{см}}, \psi_{\text{см}}$ ) смещения точки прицеливания относительно оптической оси ТВК.

На экран видеомонитора выводится световая метка, соответствующая угловому положению



■ **Рис. 3.** Изображение на мониторе АРМ при отсутствии качки судна или при компенсации угловых и линейных перемещений посадочного устройства и закрепленной на кран-балке ТВК при качке судна

точки прицеливания. Эта метка изображается, например, в виде контрастного квадрата с белым кругом в центре. Положение метки на экране формируется с учетом параллакса — смещением объектива ТВК относительно точки прицеливания на  $z_{см}$  в горизонтальной и  $y_{см}$  вертикальной плоскостях:

$$\psi_{см} = \arcsin(z_{см}/D_A); \vartheta_{см} = \arcsin(y_{см}/D_A), \quad (4)$$

где  $\psi_{см}$  и  $\vartheta_{см}$  — углы смещения метки прицеливания в горизонтальной и вертикальной плоскостях;  $D_A$  — дистанция до БПЛА, измеряемая дальномером, установленным на крап-балке в непосредственной близости от объектива ТВК.

Очевидно, что при значениях  $\psi_{см} \approx \theta_{\psi ТВК}/2$  или  $\vartheta_{см} \approx \theta_{\vartheta ТВК}/2$  БПЛА выйдет из поля зрения ТВК.

Слепая зона  $D_{мин}$  — дистанция, ближе которой БПЛА (точнее, его метка, соответствующая центру выдвинутого карабина) не наблюдается, определяется соотношениями

$$D_{мин} \approx \max[z_{см}/\sin(\theta_{\psi ТВК}/2); y_{см}/\sin(\theta_{\vartheta ТВК}/2)].$$

Расширение поля зрения ТВК с целью увеличить вероятность захвата БПЛА на сопровождение и обеспечить работу в условиях качки судна положительно скажется на уменьшении слепой зоны. Однако точность определения углового отклонения БПЛА от точки прицеливания в горизонтальной и вертикальной плоскостях  $\psi_A$  и  $\vartheta_A$  будет выше при уменьшении угла зрения ТВК [6].

Для измерения дистанции до БПЛА в пределах до 2—3 км может использоваться малогабаритный лазерный локалатор на полупроводниковом импульсном излучателе [10].

При наблюдении статического сюжета измерение углового положения БПЛА в поле зрения ТВК может осуществлять оператор, подводя мышью курсор-метку БПЛА на нижнюю точку фюзеляжа текущего изображения БПЛА. Обозначив эту характерную контрастную точку объекта, метка переходит в автоматический режим сопровождения ее на экране. Алгоритмы и система автоматического сопровождения заданной точки объекта по угловым координатам приведены в работах [2, 17].

В условиях хорошей освещенности и контраста на экране монитора можно наблюдать силуэт БПЛА, а в плохих условиях — только пятно от светового фонаря либо отраженный от световозвращателя сигнал лазерного локалатора. При использовании лазерного локалатора, совмещенного с телевизионной приемной системой, на экране монитора метка БПЛА формируется из пятна отраженного сигнала световозвращателя. Это пятно занимает несколько элементов разрешения даже при отсутствии качки в силу различных

причин расфокусировки, аберрации и вибраций [12]. Угловые координаты БПЛА определяются по энергетическому центру пятна как группы элементов разрешения приемной системы ТВК, сигнал от которых превысил заданный порог обнаружения.

Для удобства наблюдения оператором на изображение реального фонаря БПЛА и точки прицеливания накладывается интенсивное изображение, близкое к круговому, диаметром 5—7 элементов разрешения.

Отметим, что способ формирования метки БПЛА на экране монитора выбирает оператор в зависимости от условий освещенности и возможности наблюдения БПЛА на фоне неба или других объектов. Очевидно, что наблюдение БПЛА на фоне солнца или луны, солнечной и лунной водной дорожки, если их изображение попадает в поле зрения ТВК, серьезно затруднено и требует специальных средств оптической фильтрации. Рекомендуется таких ситуаций избегать, выбирая соответствующий курс движения судна при посадке БПЛА.

Главной особенностью судовых систем управления посадкой БПЛА является качка, поэтому исследование влияния качки в целях оценки возможности посадки БПЛА и поиск технических путей снижения отрицательного влияния качки являются важной научной и практической задачей.

### Смещения захватного устройства при регулярной качке

В общем случае при регулярной качке колебания судна содержат следующие составляющие [18]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{бортовая качка } \gamma_{кч} = \gamma_m \sin(\omega_\gamma t + \varphi_\gamma); \\ \text{килевая качка } \vartheta_{кч} = \vartheta_m \sin(\omega_\vartheta t + \varphi_\vartheta); \\ \text{колебания рыскания} \\ \text{судна } \psi_{кч} = \psi_m \sin(\omega_\psi t + \varphi_\psi); \\ \text{вертикальные колебания центра} \\ \text{масс судна } h_{кч} = h_m \sin(\omega_h t + \varphi_h); \\ \text{боковые колебания судна} \\ z_{кч} = z_m \sin(\omega_z t + \varphi_z); \\ \text{продольные колебания} \\ \text{скорости судна } V_{кч} = \Delta V_m \sin(\omega_v t + \varphi_v), \end{array} \right. \quad (5)$$

где  $\gamma_m, \vartheta_m, \psi_m, h_m, z_m$  — амплитуды угловых и линейных колебаний судна;  $\Delta V_m$  — амплитуда колебаний скорости движения судна;  $\omega_\gamma, \omega_\vartheta, \omega_\psi, \omega_h, \omega_z, \omega_v$  — частоты колебаний;  $\varphi_\gamma, \varphi_\vartheta, \varphi_\psi, \varphi_h, \varphi_z, \varphi_v$  — фазовые углы, соответствующие начальному моменту времени  $t_0$  наблюдения колебаний.

Захватное приспособление (точка прицеливания БПЛА) колеблется относительно своего статического (без качки и хода судна) положения в горизонтальной  $Z_{кч}(t)$ , вертикальной  $Y_{кч}(t)$  и продольной  $X_{кч}(t)$  плоскостях под действием качки судна:

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

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

Особенностью (6) является нелинейная зависимость смещения захватного устройства по осям  $x, y, z$ .

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

Таким образом, для принятой гипотезы смещение захватного устройства  $Z_{кч}(t)$  и  $Y_{кч}(t)$  в условиях регулярной качки определяется суммой трех гармонических составляющих.

При наличии на судне навигационного оборудования, позволяющего измерить параметры качки (5), смещение захватного устройства определяется непосредственно по формулам (6).

Показания акселерометров ( $\ddot{x}_a(t), \ddot{y}_a(t), \ddot{z}_a(t)$ ), ортогонально расположенных на кран-балке у захватного устройства, по каждой координате имеют по три составляющие, обусловленные со-

ответствующими компонентами качки (6), указанные индексами ( $\psi, \vartheta, \gamma, x, y, z$ ) членов в правой части следующих равенств:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_a(t) &= \ddot{x}_{a\psi}(t) + \ddot{x}_{a\vartheta}(t) + \ddot{x}_{ax}(t); \\ \ddot{y}_a(t) &= \ddot{y}_{a\gamma}(t) + \ddot{y}_{a\vartheta}(t) + \ddot{y}_{ay}(t); \\ \ddot{z}_a(t) &= \ddot{z}_{a\gamma}(t) + \ddot{z}_{a\psi}(t) + \ddot{z}_{az}(t). \end{aligned} \quad (7)$$

Если в месте крепления акселерометров установить на осях  $x, y, z$  датчики угловых скоростей, то задача определения смещения захватного устройства при регулярной качке упрощается [17].

### Прогноз смещения захватного приспособления

Снижение величины промаха в условиях качки достигается за счет прогноза положения точки прицеливания в конечный момент  $t_k$  движения БПЛА, т. е. в момент сцепления его с захватным приспособлением [19]. Прогнозируемое положение точки прицеливания  $X_{пр}, Y_{пр}, Z_{пр}$  в текущий момент времени, принимаемый  $t_0=0$ , в соответствии с (5):

$$\begin{aligned} X_{пр}(t_k) &= X_{кч}(t_k, \varphi_\psi(t_0), \varphi_v(t_0)); \\ Y_{пр}(t_k) &= Y_{кч}(t_k, \varphi_\gamma(t_0), \varphi_\vartheta(t_0), \varphi_h(t_0)); \\ Z_{пр}(t_k) &= Z_{кч}(t_k, \varphi_\gamma(t_0), \varphi_\psi(t_0), \varphi_z(t_0)), \end{aligned} \quad (8)$$

где время подхода БПЛА к точке прицеливания ( $t_k$ ) определяется дистанцией  $D_A(t)$  от точки прицеливания до БПЛА в текущий момент времени, с относительной скоростью  $V_{Ан}$  сближения БПЛА и носителя:

$$\begin{aligned} t_k &= (D_A(t=0) + X_{пр}(t_k)) / (V_{Ан}(t) + \\ &+ \Delta V_{\max} \sin(\omega_v t_k + \varphi_v)). \end{aligned} \quad (9)$$

Величины  $Y_{пр}, Z_{пр}$  прогнозируемого смещения точки прицеливания (8) вводятся в закон управления, например, как поправка к наблюдаемому положению точки прицеливания относительно БПЛА в вертикальной и горизонтальной плоскостях:

$$\begin{aligned} \Delta Y_y &= k_y (Y_A - Y_{пр}); \\ \Delta \psi_y &= k_{\psi_y} \arcsin((Z_A - Z_{пр}) / D_A(t)), \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\Delta Y_y$  и  $\Delta \psi_y$  — поправки к сигналам управления высотой и направлением полета в горизонтальной плоскости БПЛА;  $Y_A, Z_A$  — текущие отклонения БПЛА от идеальной траектории (линии, проходящей через точку прицеливания параллельно курсу движения судна) в вертикальной и горизонтальной плоскостях;  $k_y, k_{\psi_y}$  — коэффици-



енты усиления, обеспечивающие выведение БПЛА на идеальную траекторию в непосредственной близости к точке прицеливания, не допуская просадки по высоте и обеспечивая допустимые угловые скорости и ускорения в момент сцепления с захватным устройством.

Наведение БПЛА не в текущее положение посадочного устройства, а в прогнозируемое его положение, соответствующее моменту сцепления с БПЛА, существенно снижает величину динамической ошибки (промаха), обусловленной качкой судна.

При точном измерении амплитуды, частоты и фазы всех компонентов качки и отсутствии случайной составляющей управление равносильно приведению БПЛА в неподвижную точку. Ошибка приведения БПЛА к зацепу определяется ошибками обработки возмущений среды и точностью прогноза пространственного положения посадочного устройства.

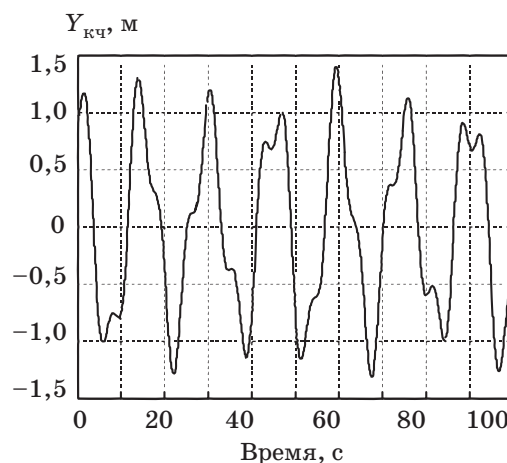
Влияние погрешности в определении параметров компонентов качки на ошибку прогноза положения захватного устройства в момент сцепления с БПЛА иллюстрируют графики (рис. 4 и 5).

Если качка судна регулярная, то смещение захватного устройства в основном определяется уравнениями (5). Параметры качки (амплитуда, частота и фаза) каждой из шести компонентов качки определяется путем подбора их значений на временном интервале, предшествующем моменту определения прогнозируемого положения посадочного устройства. Это достигается путем минимизации невязки синтезируемых и измеряемых смещений захватного устройства.

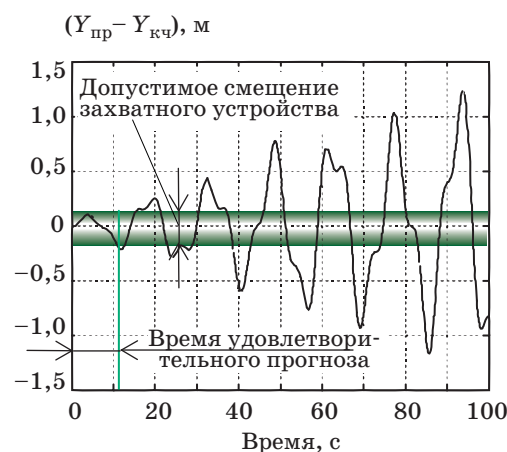
При отсутствии случайной составляющей точность прогноза  $Y_{пр}(t_k)$  и  $Z_{пр}(t_k)$  определяется точностью текущих измерений, т. е.  $\ddot{x}(t)$ ,  $\ddot{y}(t)$ ,  $\ddot{z}(t)$ . Увеличение интервала наблюдения позволит уменьшить влияние высокочастотной по сравнению с периодом качки составляющей, однако уменьшит вероятность постоянства параметров компонентов качки на прогнозируемом интервале.

Графики наглядно иллюстрируют возрастание угловых колебаний точки прицеливания ( $Y_{кч}/D_A$ ,  $Z_{кч}/D_A$ ) по мере сближения БПЛА с судном без прогноза положения точки прицеливания и уменьшение с прогнозированием.

Качественно возможность и целесообразность прогноза параметров смещения посадочного устройства на кран-балке движущегося судна подтверждены на нелинейной модели однокомпонентной бортовой качки [17] и на модели нерегулярной бортовой качки [19] со спектральной плотностью, соответствующей волнению 3 балла [18].



■ Рис. 4. График колебаний точки крепления акселерометров в вертикальной плоскости ( $Y_{кч}$ ) под влиянием трех компонентов аналогов: бортовой качки (амплитудой  $A_1 = 1$  м, периодом  $T_1 = 15$  с, начальной фазой  $\varphi_1 = \pi/2$ ), килевой качки ( $A_2 = 0,33$  м,  $T_2 = 5,7$  с,  $\varphi_2 = -\pi/4$ ) и вертикальной качки ( $A_3 = 0,1$  м,  $T_3 = 11,4$  с,  $\varphi_3 = \pi/6$ )



■ Рис. 5. График разницы истинного  $Y_{кч}(t)$  и прогнозируемого  $Y_{пр}(t)$  значений при погрешности определения девяти параметров качки на 1% в сторону их увеличения

## Заключение

Основными вопросами теории посадки БПЛА на малоразмерные суда, требующими дальнейших исследований, являются следующие.

1. Способ посадки БПЛА на кран-балку имеет ряд преимуществ перед другими способами «мокрой» и «сухой» посадки. Однако требуется разработка метода количественной оценки этих преимуществ. Их отсутствие затрудняет признание приоритета этого способа перед другими.

2. Разработан новый метод расчета оптимальных траекторий возврата БПЛА на судно-носитель и программной реализации алгоритмов

управления для приведения БПЛА в зону захвата его судовой системой управления посадкой. Точность приведения БПЛА в зону обнаружения и сопровождения посадочного устройства бортовым координатором или обнаружения и сопровождения БПЛА судовым координатором определяется точностью навигационных систем БПЛА и судна, а также ветровыми возмущениями атмосферы. Методы ее оценки известны из теории ракетных систем.

Методы точного приведения БПЛА к зацепу посадочного устройства во многом заимствованы из систем самонаведения ракет, теория которых разработана в прошлом веке. Указанные в работе отличия требуют дополнительных исследований как измерительных каналов координаторов, так и алгоритмов управления, особенно в условиях возмущений атмосферы и качки судна, вызванной движением судна.

3. Судовая система управления посадкой БПЛА на кран-балку требует точного навигационного обеспечения в части измерения угловых

и линейных колебаний судна для определения смещения посадочного устройства и поля зрения телевизионного координатора. Эта информация позволит оператору наблюдать процесс приближения БПЛА и контролировать отклонения реальной траектории от траектории, требуемой для посадки БПЛА.

4. Для посадки БПЛА на судно в условиях качки целесообразно прогнозировать ее текущие параметры и заранее определять положение посадочного устройства в момент сцепления с БПЛА. Наведение БПЛА в прогнозированное положение позволяет существенно повысить точность приведения БПЛА к зацепу посадочного устройства и расширить диапазон внешних условий, при которых обеспечивается надежная посадка БПЛА. Определение рациональных способов расчета параметров и прогноза смещения посадочного устройства должно быть предметом дальнейших исследований авторов.

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

## Литература

1. Соловьева В. В. Обзор способов посадки беспилотных летательных аппаратов на малоразмерные суда // Проблемы посадки беспилотных летательных аппаратов на движущееся судно и технические пути их решения: сб. ст. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2010. С. 14–20.
2. Подоплекин Ю. Ф., Шаров С. Н. Проблемы посадки беспилотных летательных аппаратов на движущееся судно и технические пути их решения // Тр. XXXX Российского семинара «Механика и процессы управления»/РАН, Минобороны РФ, Минобрнауки РФ, МСНТ. М., 2010. С. 55–64.
3. Подоплекин Ю. Ф., Толмачев С. Г., Шаров С. Н. Информационно-управляющая система приведения БПЛА на движущееся судно // Информационно-управляющие системы. 2012. № 3. С. 22–28.
4. Дремлюга Г. П., Есин С. А., Иванов Ю. Л., Лященко В. А. Беспилотные летательные аппараты: Состояние и тенденции развития/под ред. д.т.н., проф. Ю. Л. Иванова. – М.: Варяг, 2004. – 176 с.
5. Подоплекин Ю. Ф., Соловьева В. В., Яцковская И. М. Судовой комплекс многофункционального мониторинга наземной и морской поверхности на базе беспилотного летательного аппарата // Проблемы посадки беспилотных летательных аппаратов на движущееся судно и технические пути их решения: сб. ст. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2010. С. 5–13.
6. Шаров С. Н. и др. Автономная бортовая система управления посадкой БПЛА на движущееся судно. Патент на полезную модель. БИ № 31, 10.08.11.
7. Шаров С. Н. и др. Судовая система управления посадкой БПЛА на движущееся судно. Патент на полезную модель. БИ № 28, 10.10.11.
8. Hamidreza Chitsaz, Steven M. LaValle. Time-optimal paths for a Dubins Airplane // Proc. of the 46th IEEE Conf. Decision and Control. 2007. P. 2379–2384.
9. Петухова Е. С. Особенности траектории возвращения беспилотного летательного аппарата на движущийся носитель // Изв. РАН. 2010. Вып. 4(66). С. 40–48.
10. Шаров С. Н. Локационные управляющие системы беспилотных летательных аппаратов. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2009. – 332 с.
11. Andrievsky V. R., Sharov S. N. Technological Ways for Ensuring of Unmanned Aerial Vehicle on a Ship // World Maritime Technology Conf., WMTС 2012, May 29 – June 1, 2012, Saint-Petersburg, Russia. P. 91–92.
12. Шаров С. Н. Информационные управляющие системы беспилотных летательных аппаратов. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2007. – 256 с.
13. Андриевский Б. Р., Фрадков А. Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MatLab. – СПб.: Наука, 1999. – 467 с.
14. Коржавин Г. А., Подоплекин Ю. Ф., Шаров С. Н. Информационные и управляющие системы БПЛА // Изв. АЭН РФ. 2010. № 1. С. 88–98.
15. Ren W., Beard R. W. Trajectory Tracking for Unmanned Air Vehicles With Velocity and Heading Rate Constraints // IEEE Trans. Control Systems Technol. 2004. Vol. 12(5). P. 706–716.
16. Sasongko R. A., Sembiring J., Muhammad H., Mulyanto T. Path Following System of Small Unmanned

Autonomous Vehicle for Surveillance Application // Proc. 8th Asian Control Conf. (ASCC), 2011, Kaohsiung, Taiwan, May 15–18, 2011. P. 1259–1264.

17. Андриевский Б. Р., Шаров С. Н. Определение положения посадочного устройства БПЛА в условиях качки // Морской вестник. 2012. № 2(42). С. 75–77.

18. Справочник по теории корабля / под ред. Я. И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. Т. 2. – 440 с.

19. Толмачев С. Г., Шаров С. Н. Прогнозирование положения захватного устройства при посадке БПЛА на движущееся судно в условиях качки: сб. материалов XX Санкт-Петербургской Междунар. конф. по интегрированным навигационным системам/под ред. В. Г. Пешехонова / ГНЦ РФ ОАО «Концерн «Электроприбор». СПб., 2013. С. 205–208.

## Уважаемые авторы!

**При подготовке рукописей статей необходимо руководствоваться следующими рекомендациями.**

Статьи должны содержать изложение новых научных результатов. Название статьи должно быть кратким, но информативным. В названии недопустимо использование сокращений, кроме самых общепринятых (РАН, РФ, САПР и т. п.).

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 20 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 13, поля не менее двух сантиметров.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание (при отсутствии — должность), полное название организации, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, электронные адреса авторов, которые по требованию ВАК должны быть опубликованы на страницах журнала. При написании аннотации не используйте аббревиатуры и не делайте ссылок на источники в списке литературы.

Статьи авторов, не имеющих ученой степени, рекомендуется публиковать в соавторстве с научным руководителем, наличие подписи научного руководителя на рукописи обязательно; в случае самостоятельной публикации обязательно предоставляйте заверенную по месту работы рекомендацию научного руководителя с указанием его фамилии, имени, отчества, места работы, должности, ученого звания, ученой степени — эта информация будет опубликована в ссылке на первой странице.

**Формулы** набирайте в Word, не используя формульный редактор (Mathtype или Equation), при необходимости можно использовать формульный редактор; для набора одной формулы не используйте два редактора; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта никогда не пользуйтесь вкладкой Other..., используйте заводские установки редактора, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, вставленные в текст; в формулах не отделяйте пробелами знаки: + = -.

Для набора формул в Word никогда не используйте Конструктор (на верхней панели: «Работа с формулами» — «Конструктор»), т. к. этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

**Иллюстрации** в текст не заверстываются и предоставляются отдельными исходными файлами, поддающимися редактированию:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, поддающихся редактированию, используя векторные программы: Visio 4, 5, 2002-2003 (\*.vsd); Coreldraw (\*.cdr); Excel (\*.xls); Word (\*.doc); AdobeIllustrator (\*.ai); AutoCad (\*.dxf); Matlab (\*.ps, \*.pdf или экспорт в формат \*.ai).

— если редактор, в котором Вы изготавливаете рисунок, не позволяет сохранить в векторном формате, используйте функцию экспорта (только по отношению к исходному рисунку), например, в формат \*.ai, \*.esp, \*.wmf, \*.emf, \*.svg.

— фото и растровые — в формате \*.tif, \*.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Наличие подрисовочных подписей обязательно (желательно не повторяющих дословно комментарии к рисункам в тексте статьи).

**В редакцию предоставляются:**

— сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, e-mail), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате \*.tif, \*.png с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40 55 мм;

— экспертное заключение.

**Список литературы** составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

— для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц;

— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц;

— ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;

— при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Список литературы предоставляйте в двух вариантах: первый на языках оригиналов и второй — перевод (не транслитерация, а перевод) списка на английский язык.

Более подробно правила подготовки текста с образцами изложены на нашем сайте в разделе «Оформление статей».

### Контакты

Куда: 190000, Санкт-Петербург,  
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ

Кому: Редакция журнала «Информационно-управляющие системы»

Тел.: (812) 494-70-02

Эл. почта: ius.spb@gmail.com

Сайт: www.i-us.ru