

На правах рукописи

Икрянов Игнат Иванович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВИЗУАЛЬНОЙ ПОСАДКИ
ВЕРТОЛЕТА НА ПАЛУБУ КОРАБЛЯ**

05.13.18 - Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2009

Работа выполнена на кафедре компьютерного моделирования, факультета аэромеханики и летательной техники, московского физико-технического института (государственного университета).

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Хлопков Юрий Иванович

Научный консультант: кандидат технических наук,
Тяпченко Юрий Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Крицкий Борис Сергеевич

кандидат технических наук
Захаров Кирилл Васильевич

Ведущая организация НИЦ РЭВ ВМФ - филиал ФГУ «24 ЦНИИ
Министерства обороны Российской Федерации»

Защита состоится 10 декабря 2009 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д.215.001.01 при Военно-воздушной академии им. проф. Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина по адресу 125190, г. Москва, ул. Планетная, д.3, ауд. Д-332.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ВВА им. проф. Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



А.С. Ненашев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Использование вертолетов на кораблях различных типов существенно повышает эксплуатационные возможности, как гражданских судов, так и кораблей ВМФ. Вместе с тем, использование вертолетов палубного базирования предъявляет существенные требования к обеспечению безопасности взлета и особенно посадки на палубу корабля. До сих пор в отечественной практике вертолеты использовались на крупных кораблях, таких как авианосцы, крейсера, эсминцы. В последнее время вертолеты стали размещаться и на малых сторожевых кораблях. Для обеспечения безопасного захода на посадку вертолетов на взлетно-посадочные площадки (ВППл) кораблей ВМФ и судов различного назначения используются оптические индикаторы курса (ИК) и глissады (ИГ) с пассивной (маятниковой) системой стабилизации оптических осей относительно крена и дифферента корабля.

Качка корабля вызывает погрешность стабилизации ИК/ИГ относительно истинной вертикали, которая выражается в колебаниях оптической оси индикаторов курса и глissады. Колебания оптической оси индикаторов, в свою очередь, вызывают искажение сигнала, передаваемого летчику. Погрешность стабилизации индикаторов курса и глissады относительно истинной вертикали зависит от размещения ИК/ИГ на ВППл (расстояния точки подвеса ИК/ИГ от кормы и борта корабля), от конструктивных особенностей ИК/ИГ, от амплитуды и частоты качки корабля по крену и дифференту. Ввиду того, что системы индикаторов курса и глissады в РФ разрабатываются впервые, в отечественной практике полностью отсутствует методики применения систем ИК/ИГ для обеспечения безопасного захода вертолета на ВППл, методики расчета эксплуатационных параметров, а так же критерии и методы оценки качества работы ИК/ИГ. Сведения по подобным методикам в открытой зарубежной литературе отсутствуют.

Таким образом, для обеспечения безопасности посадки вертолетов на ВППл в условиях наличия качки ВППл, разработка методик расчета размещения систем ИК/ИГ на палубе корабля, и применения таких систем

для обеспечения безопасного захода вертолета на ВППл, а так же методов оценки их и сравнения является **актуальной**.

Цели и задачи работы. Целью диссертационной работы является:

1) Создание методики расчета погрешности стабилизации ИК/ИГ относительно истинной вертикали при различных параметрах качки корабля на регулярном и нерегулярном волнении.

2) Создание методики расчета размещения систем ИК/ИГ на палубе кораблей различных типов, при которых погрешность стабилизации ИК/ИГ относительно истинной вертикали будет минимальна.

3) Определение эксплуатационного диапазона разрабатываемой в настоящий момент системы ИК/ИГ ОСПВ 20380 по амплитудам и частотам качки корабля по крену и дифференту. Эксплуатационный диапазон определяется из условия максимально допустимой погрешности стабилизации ИК/ИГ относительно истинной вертикали.

4) Разработка и апробация метода использования ИК/ИГ, который бы позволил расширить эксплуатационный диапазон ИК/ИГ.

Для достижения поставленных целей в работе необходимо решить задачи:

- разработать критерии и метод оценки качества работы индикаторов курса и глиссады;

- выработать критерии оценки и сравнения степени искажения сигнала ИК/ИГ, обусловленные колебаниями ИК/ИГ относительно истинной вертикали в плоскости крена и дифферента;

- сравнивая искажения, вносимые движением ИК/ИГ относительно истинной вертикали в плоскости крена и дифферента, разработать метод расширения эксплуатационного диапазона ИК/ИГ;

- провести апробацию возможности разработанного метода расширения эксплуатационного диапазона ИК/ИГ;

- исследовать влияние расширения эксплуатационного диапазона ИК/ИГ на качество работы ИК/ИГ;

- разработать математические модели движения ИК/ИГ при воздействии на судно регулярного и нерегулярного волнения;

- на основе разработанных моделей построить методики расчета погрешности стабилизации ИК/ИГ относительно истинной вертикали;

- рассчитать амплитуды отклонения ИК/ИГ от истинной вертикали и проанализировать влияние погрешности стабилизации ИК/ИГ на точность передачи в пространство информации по крену и дифференту.

Научная новизна работы. В диссертационной работе предложен новый подход к моделированию движения маятниковых систем под воздействием качки корабля на морском волнении на базе метода Монте-Карло, который основывается на предположении о том, что качку корабля на волнении, при определенных условиях, можно рассматривать как стационарный случайный процесс.

Практическая ценность работы определяется прикладным характером проведенных разработок и исследований, направленных на повышение безопасности посадки вертолета на ВППл судов различных типов. Результаты данной работы были использованы при разработке системы ОСПВ 20380 ЗАО НТЦ "Альфа-М". Данная система прошла необходимые заводские и государственные испытания и поставлена заказчику, о чем имеются соответствующие документы. В работе получены следующие, важные практические результаты:

- разработаны критерии и метод оценки качества работы ИК/ИГ;
- разработаны математические модели, описывающие движение ИК/ИГ при различном расположении на палубе корабля и различных параметрах качки корабля;
- создана методика расчета погрешности стабилизации ИК/ИГ относительно истинной вертикали при различных параметрах качки корабля в условиях регулярного и нерегулярного морского волнения;
- создан метод использования ИК/ИГ, который позволяет расширить область применения ИК/ИГ.

На защиту выносятся следующие положения:

- критерий и метод оценки и сравнения качества работы ИК/ИГ;
- методика расчета погрешности стабилизации ИК/ИГ относительно истинной вертикали при различных параметрах качки корабля в условиях регулярного и нерегулярного морского волнения;
- инженерная методика расчета размещения систем ИК/ИГ на палубе кораблей различных типов;

- принцип использования ИК/ИГ при эксплуатации ИК/ИГ в условиях превышения допустимых значений амплитуды качки корабля по крену и дифференту;

- метод расширения эксплуатационного диапазона ИК/ИГ по параметрам качки корабля по крену и дифференту.

Апробация работы. Основные материалы работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и семинарах: на ежегодных международных конференциях "Авиация и Космонавтика", Москва, 2008-2009; ежегодной Всероссийской конференции ученых, молодых специалистов и студентов "Информационные технологии в авиационной и космической технике", Москва, 2009; на Международном авиационно-космическом научно-гуманитарном семинаре имени С.М. Белоцерковского, Москва, 2009; на IX международной школе-семинаре молодых ученых России и Украины "Методы дискретных особенностей в задачах математической физики", Орёл, 2009; на семинаре кафедры компьютерного моделирования ФАЛТ МФТИ, Москва, 2009. По материалам диссертации опубликовано 6 научных работ, в том числе две статьи [2,6] в журналах, входящих в "перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание учёной степени доктора и кандидата наук".

Объем и структура. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложений, списка литературы и иллюстраций.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность и практическая значимость исследования, сформулированы цели и задачи, обоснована новизна полученных результатов, дано представление о перспективах использования полученных результатов.

В первой главе дается характеристика объектов исследования и характеристика воздействий, которые обусловлены качкой корабля. Объектами исследования являются оптические индикаторы курса и глиссады (ИК/ИГ), предназначенные для визуальной посадки вертолетов на палубы морских судов днем и ночью, в простых и сложных метеоусловиях. Конструктивно ИК/ИГ представляют собой блоки огней, которые

объединены в две сборки, одна из которых используется для индикации курса/глиссады вдоль продольной оси корабля, а вторая под углом в сторону кормы. Обе сборки ИК/ИГ устанавливаются в общую раму, которая крепится к корпусу с помощью карданового подвеса, который в свою очередь обеспечивает свободное движение блоков по крену и дифференту.

Дальность видимости огней курса и глиссады ночью составляет не менее 3 км. Задача летчика найти в пространстве огни и двигаться так, чтобы постоянно видеть зеленые огни глиссады и немигающие синие огни курса. При отклонении от заданной глиссады вверх летчик наблюдает желтые огни, а вниз - красные. При отклонении от заданного курса влево летчик наблюдает синие огни, мигающие с одной частотой, а вправо - с другой.

Качка корабля вызывает погрешность стабилизации ИК/ИГ относительно истинной вертикали, которая выражается в колебаниях оптической оси ИК/ИГ. Колебания оптической оси ИК/ИГ, в свою очередь, вызывают искажение сигнала, передаваемого ИК/ИГ летчику. Погрешность стабилизации ИК/ИГ относительно истинной вертикали зависит от размещения ИК/ИГ (расстояния точки подвеса ИК/ИГ от кормы и борта корабля), от конструктивных особенностей ИК/ИГ, от амплитуды и частоты качки корабля по крену и дифференту.

Существует несколько способов описания качки корабля на морском волнении. В первом способе, разработанном Крыловым А.Н., принимается, что морское волнение периодически по времени, профиль взволнованной поверхности синусоидальный, гребни волн параллельны, волны распространяются в одном направлении. Реакция системы корабля на такое воздействие также может описываться синусоидой. Такая модель хорошо описывает мертвую зыбь и может быть использована для моделирования установившегося ветрового волнения при не очень больших значениях скорости ветра.

Более точные способы, рассматривают морское волнение а следовательно, и качку корабля, как случайный процесс. Одной из характеристик таких процессов является спектральная плотность случайного процесса на выходе линейной системы, которую удобно использовать для моделирования качки корабля в условиях нерегулярного волнения.

Во второй главе строится математическая модель движения ИК/ИГ под воздействием качки корабля. Движение ИК/ИГ рассматривается как сумма двух независимых движений в плоскости крена и в плоскости дифферента.

На рис. 1 показана система координат для описания движения ИК/ИГ. Вертикальные перемещения $h(t)$ центра масс корабля вдоль оси O_0Y_0 обусловлены возникновением восстанавливающей силы и характеризует вертикальную качку корабля. Поворот на углы ψ_K и ψ_D характеризует качку корабля по крену и дифференту соответственно. Будем полагать, что корабль не совершает маневров по курсу и угол рысканья всегда равен нулю.

Записывая уравнения движения ИК/ИГ в обобщенных координатах в виде уравнений Лагранжа 2-ого рода и произведя несложные преобразования, получаем:

$$\ddot{\varphi} + 2C\sqrt{\frac{g}{L}}\dot{\varphi} + \frac{1}{L}(g + \ddot{h}(t) - D\dot{\psi}^2 + R\ddot{\psi})\varphi = \frac{1}{L}((D - L)\ddot{\psi} - (g - \ddot{h}(t))\psi + R\dot{\psi}^2) \quad (1)$$

$$\text{где } C = \frac{B}{2gmL^2\sqrt{\frac{g}{L}}}$$

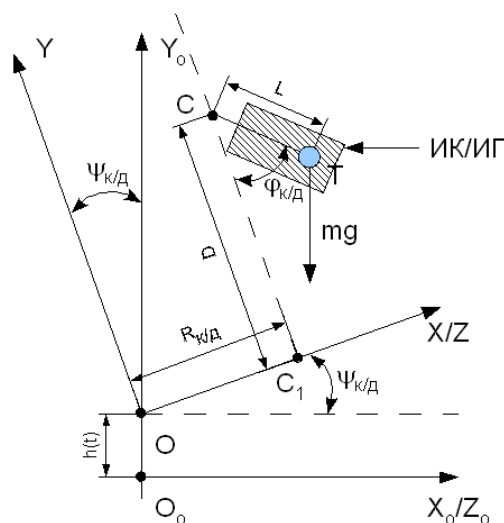


Рис. 1 Система координат для описания плоского движения ИК/ИГ

Это уравнение описывает плоское движение ИК/ИГ.

Основная интересующая нас характеристика движения ИК/ИГ - это абсолютная величина отклонения ИК/ИГ от истинной вертикали.

Данная величина определяется как сумма входного воздействия - угла наклона палубы корабля и выходного сигнала системы - угла наклона ИК/ИГ:

$$\delta = |\varphi + \psi_{K/D}| \quad (2)$$

В уравнение (1) входят члены, характеризующие движение корабля на волнении. Будем полагать:

$$\begin{aligned} h(t) &= 0, \\ \psi_{К/Д} &= \psi_{max} \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (3)$$

После несложных преобразований уравнение (1) принимает вид:

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi} + 2C\omega_0\dot{\varphi} + \omega_0^2 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{D}{L} \psi_{max}^2 \eta^2 - \frac{R}{L} \psi_{max} \eta^2 \sin(\omega t) \right) \varphi = \\ = -\omega_0^2 \psi_{max} \left(\left(1 + \frac{D-L}{L} \eta^2 \right) \sin(\omega t) - \frac{1}{2} \frac{R}{L} \psi_{max} \eta^2 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{где } \eta = \frac{\omega}{\omega_0}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{g}{L}}$$

Подставляя численное решение уравнения (4) и соотношения (3) в (2), получим значение отклонения ИК/ИГ от истинной вертикали. В численном решении уравнения (4) период времени, на протяжении которого идет затухание собственных колебаний маятника, отбрасывается.

Для моделирования нерегулярного морского волнения и, соответственно, качки корабля на нем, удобно использовать методы Монте-Карло, которые базируются на спектральном описании процесса качки. Для использования данного метода плотность спектра качки, полученная экспериментальным путем, аппроксимируется выражением вида:

$$S(\omega) = \frac{A}{\sqrt{2\pi D}} e^{-\frac{(\omega-\omega_m)^2}{2D}} + \frac{A_1}{\sqrt{2\pi D_1}} e^{-\frac{(\omega-\omega_{m1})^2}{2D_1}}$$

Коэффициенты $A, A_1, D, D_1, \omega_1, \omega_{m1}$ подбираются таким образом, чтобы наилучшим образом аппроксимировать полученные экспериментальные данные. После чего предполагается, что качка корабля на волнении задается выражением:

$$\Psi_{К/Д} = \sum_i A_i \sin(\omega_i t + f_i) \quad (5)$$

Для генерации выборок A_i и ω_i используется метод усечения, суть которого состоит в следующем.

График функции $S(\omega)$ вписывается в прямоугольник $OX[S_0;S_1];OY[0;S_0]$. На ось Y подают случайное равномерно распределенное число из ГСЧ (генератор случайных чисел). На ось X подают случайное равномерно распределенное число из ГСЧ. Если точка в пересечении этих двух координат лежит ниже кривой спектральной плотности качки, то событие X произошло – гармоника с соответствующей частотой добавляется в выборку, иначе - нет. После получения, таким образом, выборки $\{\omega_i\}$, производится ее сортировка по возрастанию значений ω_i .

Амплитуда каждой отдельной гармоники определяется из соотношения Винера –Хинчина:

$$A_i = \sqrt{2S(\omega_i)(\omega_{i+1} - \omega_i)}$$

Последняя гармоника в выборке отбрасывается приравниванием ее амплитуды к нулю.

Фазы каждой из гармоник получаются с помощью ГСЧ как равномерно распределенное число на интервале от 0 до 2π .

Определив, таким образом, вектора $\{A_i\}$, $\{\omega_i\}$ и $\{f_i\}$, подставляя выражение (5) в выражение (1) получим:

$$\begin{aligned} & \ddot{\varphi} + 2C\sqrt{\frac{g}{L}}\dot{\varphi} + \frac{1}{L}(g + D \left(\sum_i A_i \omega_i \cos(\omega_i t + f_i) \right)^2 \\ & - R_{K/D} \left(\sum_i A_i \omega_i^2 \sin(\omega_i t + f_i) \right))\varphi = \\ & = \frac{1}{L}(- (D - L) \sum_i A_i \omega_i^2 \sin(\omega_i t + f_i) - g \sum_i A_i \sin(\omega_i t + f_i) \\ & + R_{K/D} \left(\sum_i A_i \omega_i \cos(\omega_i t + f_i) \right)^2) \quad (6) \end{aligned}$$

Выражение (6) описывает движение ИК/ИГ при воздействии на него нерегулярной качки корабля. Решая данное уравнение численно, и подставляя решение и выражение (5) в выражение (2), получим зависимость величины отклонения ИК/ИГ от истинной вертикали при воздействии нерегулярной качки судна от времени $\delta(t)$. Для получения конечного результата произведем выборку значений из полученной зависимости. Первые 100 сек., на протяжении которых происходит затухание собственных колебаний ИК/ИГ, отбрасываются. Оставшийся временной интервал разобьем на

отрезки длительностью по 60 сек. На каждом отрезке определим максимальное значение величины отклонения ИК/ИГ от истинной вертикали и будем считать его результатом испытания, произведенного на данном отрезке времени. Таким образом, после данной операции получится выборка значений величины отклонения ИК/ИГ от истинной вертикали при воздействии нерегулярной качки судна $\{\delta_k\}$, которую можно рассматривать как результат определенного количества испытаний, при этом $\{\delta_k\} \in \delta(t)$. Для повышения точности расчетов рекомендуется получение нескольких выборок.

Далее необходимо на основании одной или нескольких выборок определить доверительный интервал $(\delta_{min}, \delta_{max})$ величины отклонения ИК/ИГ от истинной вертикали по известным формулам.

Для получения инженерной методики расчета погрешности стабилизации ИК/ИГ относительно истинной вертикали анализируется уравнение (1) и делаются упрощающие предположения о характере движения. При размещении ИК/ИГ по ДП, установившееся движение ИК/ИГ имеет вид:

$$\varphi = -\psi_{max} V \sin(\eta\tau - \gamma)$$

где V - коэффициент динамичности, определяющий во сколько раз амплитуда колебаний ИК/ИГ отличается от ψ_{max}

γ - запаздывание по фазе колебаний ИК/ИГ относительно колебаний палубы.

Выражения для V и γ имеют вид:

$$tg(\gamma) = \frac{2C\eta}{1 - \eta^2(1 + \psi_{max}^2 \frac{\xi}{2})}$$

$$V = \frac{1 + (\xi - 1)\eta^2}{\sqrt{\left[1 - \eta^2 \left(1 + \psi_{max}^2 \frac{\xi}{2}\right)\right]^2 + 4C^2\eta^2}}$$

где ξ - характеризует высоту размещения ИК/ИГ над центром качки корабля, а η - отношение частоты качки корабля к собственной частоте ИК/ИГ.

Отклонение ИК/ИГ от истинной вертикали в установившемся режиме определяется величиной:

$$\delta = \varphi + \psi = \psi_{max}(\sin(\eta\tau) - V \sin(\eta\tau - \gamma))$$

$$\delta \leq \psi_{max}(|1 - V\cos(\gamma)| + |V\sin(\gamma)|)$$

В третьей главе определяется эксплуатационный диапазон ИК/ИГ ОСПВ 20380, критерии и методы оценки качества работы индикаторов. Для этого в первой части анализируется изменение области видимости сигналов ИК/ИГ, обусловленное погрешностью стабилизации ИК/ИГ относительно истинной вертикали. На рис. 2а и 2б изображено изменение области видимости сигналов ИК/ИГ (на примере ИГ), обусловленное погрешностью стабилизации. Колебание индикаторов в плоскости дифферента вызывает смещение области видимости вверх и вниз относительно штатного положения. Колебания индикаторов в плоскости крена вызывают разворот области видимости относительно точки подвеса. В результате образуются зоны, находясь в которых летчик будет видеть различные сигналы ИК и ИГ (зоны искаженного сигнала) и зоны, в которых наблюдаемый сигнал не изменяется и соответствует штатному положению индикаторов.

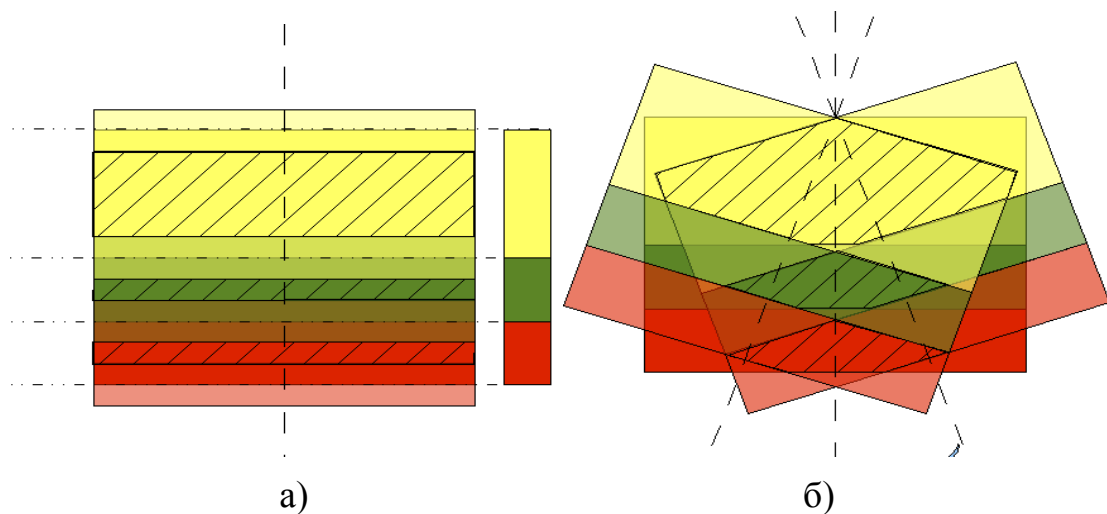


Рис. 2 Изменение области видимости сигналов ИГ, обусловленное колебаниями ИГ относительно истинной вертикали в плоскости а) дифферента, б) крена

На рис. 2а и 2б заштрихованы зоны, в которых сигнал остается неизменным при отклонении ИК/ИГ от истинной вертикали. Для того, чтобы оценить влияние погрешности стабилизации на степень искажения сигналов ИК/ИГ, необходимо определить, на сколько уменьшается зона видимости

неискаженного сигнала при отклонении индикатора от истинной вертикали. Для этого предлагается использовать соотношение:

$$I = 1 - \frac{S_{ne}}{S_0}$$

где S_{ne} - площадь зоны видимости неискаженного сигнала (заштрихованная зона на рисунках 2а, 2б) S_0 - площадь зоны видимости сигнала в штатном положении.

Величина I характеризует степень искажения области видимости сигналов ИК/ИГ и определена на отрезке $[0;1]$. При $I=0$ зоны искаженного сигнала отсутствуют, при $I=1$ отсутствуют зоны неискаженного сигнала. Величина I является основной характеристикой качества работы индикаторов.

На рис. 3 построены зависимости величины I от угла отклонения индикатора от истинной вертикали δ для ИК и ИГ при отклонении в плоскости крена и дифферента.

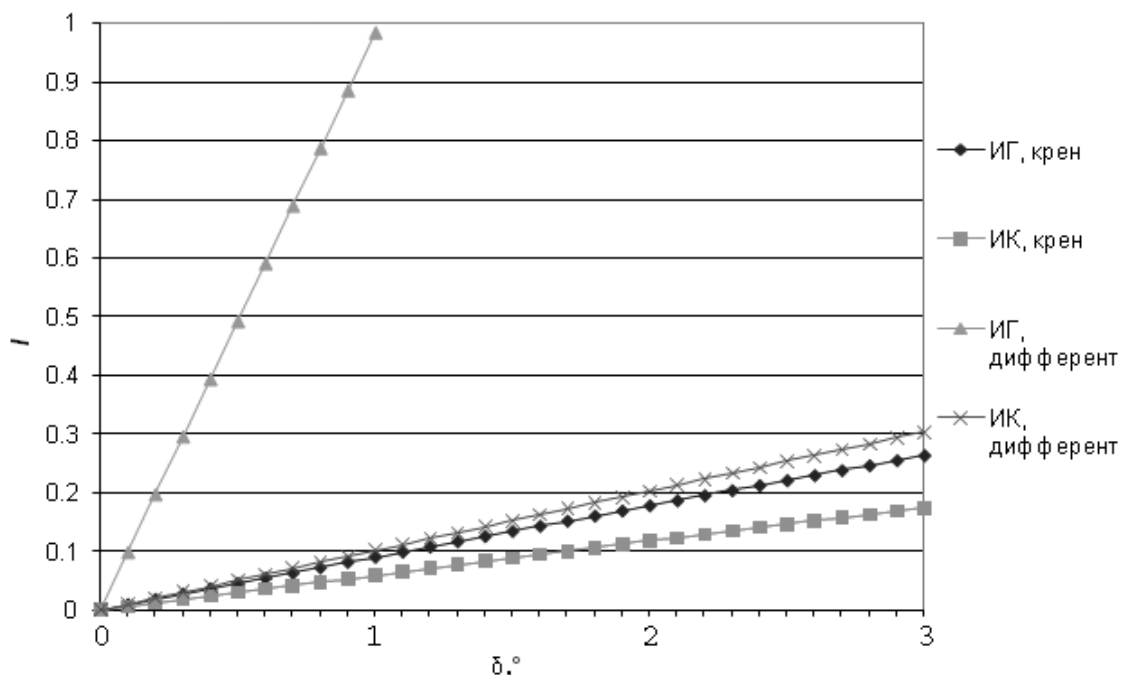


Рис. 3. Степень искажения области видимости сигналов ИГ/ИК обусловленная отклонением индикаторов от истинной вертикали в плоскости крена и дифферента.

Если принять степень искажения сигнала, обусловленную колебаниями ИГ в плоскости дифферента за 1, то степени искажения сигнала, обусловленные колебаниями ИК в плоскости крена/дифферента и ИГ в

плоскости крена будут находиться в следующей пропорции:

$$I_{ИГ}^Д \cong 10 I_{ИК}^Д \cong 11 I_{ИГ}^К \cong 17 I_{ИК}^К$$

Из рис. 3 видно, что искажение передачи сигнала, вносимое колебаниями индикаторов в плоскости дифферента, больше, чем искажение передачи сигнала, вносимое колебаниями индикаторов в плоскости крена. Также видно, что искажения, вносимые ИГ больше чем искажения, вносимые ИК при одинаковом отклонении индикаторов от истинной вертикали.

Наибольшее искажение в передаваемый сигнал вносит погрешность стабилизации ИГ в плоскости дифферента, а наименьшее - погрешность стабилизации ИК в плоскости крена. Если предположить, что степень искажения сигнала не должна превышать $I < 0.1$, то допустимые погрешности стабилизации будут равны: для ИК $\delta_d = 1^\circ$, $\delta_k = 1.7^\circ$, для ИГ $\delta_d = 0.1^\circ$, $\delta_k = 1^\circ$

Для увеличения эксплуатационного диапазона можно смягчить требования к допустимой погрешности стабилизации. Рассмотрим работу ИГ в случае, если величина погрешности стабилизации в плоскости дифферента увеличена до $\delta \in (0.5^\circ; 0.6^\circ)$.

При колебаний ИГ относительно истинной вертикали в плоскости дифферента в диапазоне углов $(0^\circ; 0.6^\circ)$, пилот будет наблюдать один из сигналов: мигающий желтый, непрерывный желтый, мигающий желтый-зеленый, непрерывный зеленый, мигающий зеленый-красный, непрерывный красный, мигающий красный. При отклонении на угол 0.6° непрерывные зеленый и красный сигналы исчезнут.

Для оценки возможности использования ИК/ИГ с погрешностью стабилизации относительно истинной вертикали для обеспечения летчика информацией во время посадки вертолета на ВППл применялась экспертная оценка с использованием опросного листа на базе шкалы Купера - Харпера.

На рис. 4 представлен опросный лист, предназначенный для оценки возможности использования ИК/ИГ с погрешностью стабилизации относительно истинной вертикали для осуществления посадки вертолета на ВППл.

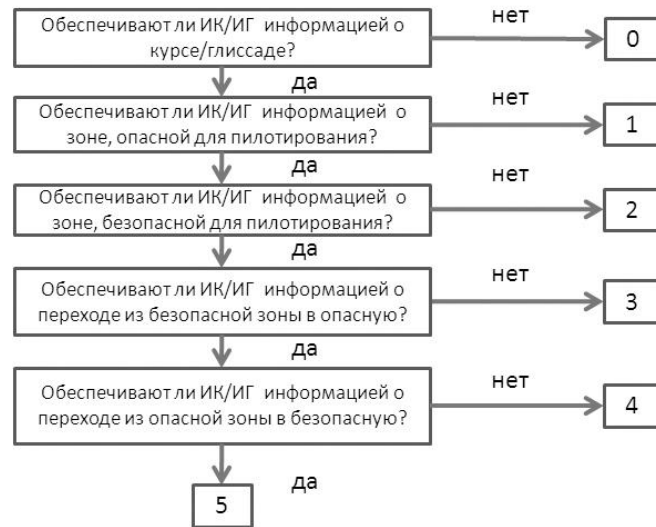


Рис. 4. Опросный лист, предназначенный для оценки возможности использования ИК/ИГ с погрешностью стабилизации относительно истинной вертикали для осуществления посадки вертолета на ВППл.

При создании опросного листа предполагалось, что ИК/ИГ должны, в первую очередь обеспечивать летчика информацией о зоне опасной и безопасной для полетов. Во вторую очередь, используя информацию предоставляемую ИК/ИГ, летчик должен своевременно идентифицировать переход из безопасной в опасную для полета зону. Запоздалая идентификация такого перехода, особенно на завершающем участке глиссады, не оставит летчику времени для парирования такой ситуации и может привести к катастрофе. Ситуация, когда летчик, используя сигналы ИК/ИГ, не может идентифицировать возврат из зоны опасной для полетов в зону безопасную, приводит к тому, что не предпринимая никаких действий, продолжая двигаться прежним курсом, летчик приводит вертолет в зону нежелательную для пилотирования (желтая зона). Идентифицировав переход в зону, нежелательную для пилотирования, летчик предпринимает действия для возврата вертолета в безопасную зону однако, идентифицировать возврат вертолета в безопасную зону пилот не может и снова попадает в опасную для пилотирования зону. Как результат такого неточного управления, возникает длиннопериодическое движение вертолета относительно линии глиссады. В различных ситуациях на последнем участке глиссады вертолет может оказаться как в зоне опасной, так и безопасной для полетов.

Таким образом, предложена следующая шкала оценок работы ИК/ИГ при наличии погрешности стабилизации. Если при заданной погрешности стабилизации ИГ/ИК не обеспечивают летчика информацией совсем, то работа ИК/ИГ оценивается на 0. Если ИГ/ИК не обеспечивают пилота информацией о зоне опасной для полета - выставляется оценка 1. Оценка 2 выставляется в случае если, при заданной величине погрешности стабилизации ИК/ИГ не обеспечивают информацией о зоне безопасной для полета. Оценка 3 выставляется в случае, если используя ИК/ИГ пилот не может своевременно определить переход из зоны безопасной для полетов в зону опасную. Оценка 4 выставляется в случае, если используя ИК/ИГ пилот не может определить переход из зоны опасной для полетов в безопасную зону. В случае если при заданной погрешности стабилизации пилот получает от ИГ/ИГ всю перечисленную информацию, выставляется оценка 5.

Для апробации возможности использования ИК/ИГ с погрешностью стабилизации оптических осей относительно истинной вертикали, автором была разработана программа FSDX, моделирующая посадку вертолета на палубу корабля с использованием ИК/ИГ с маятниковой системой стабилизации оптических осей. Для моделирования качки корабля и движения ИК/ИГ под воздействием качки корабля использовалась методика, описанная во второй части второй главы. Интегрирование уравнения (4) проводилось с помощью метода Рунге-Кутты 4-ого порядка с фиксированным шагом. Шаг интегрирования равнялся $\Delta t=0.016$ сек.

Для моделирования использовался компьютер на базе Intel Pentium 4 Core Duo 3Hz, RAM 2Gb с двумя графическими акселераторами, работающими в режиме SLI на базе графического процессора NVidia 7800 GTX. Объем оперативной памяти каждого графического акселератора составлял 256МБ. При этом была получена частота обновления сцены ~50 fps. Программа реализована на языке C++ с использованием HLSL и библиотеки DirectX 9.0c. Моделирование движения вертолета осуществлялось в двух режимах. В первом режиме воссоздается траектория, полученная в ходе реальных посадок вертолетов на ВППл. Во втором режиме динамика вертолета моделировалась с помощью свободно-распространяемой библиотеки для моделирования динамики летательных аппаратов JSBSim. В данном режиме использовалась находящаяся в

свободном доступе динамическая модель вертолета EUROCOPTER Bo-105. Основная цель данного режима проверить, существует ли принципиальная возможность осуществлять посадку вертолета на ВППл при погрешности стабилизации ИГ в плоскости дифферента $\delta=0.5^\circ$. Данная проверка производилась с помощью субъективной оценки. В опросе участвовало три эксперта.

Результаты, полученные с помощью экспертной оценки с использованием программы FSDX, приведены в таблице 1.

Так же в **третьей главе** определяется эксплуатационный диапазон индикаторов курса и глассады. Расчет эксплуатационного диапазона ИК/ИГ выполнен для следующих значений погрешности стабилизации ИК/ИГ относительно истинной вертикали:

1) $\delta_K = 0.1^\circ, \delta_D = 0.1^\circ$ - эксплуатационный диапазон, соответствующий требованиям ТЗ ОСПВ 20380;

2) $\delta_K = 1^\circ, \delta_D = 0.1^\circ$ - эксплуатационный диапазон, при котором степень искажения информации, обусловленная качкой индикаторов в плоскости крена и дифферента, одинакова и равна $I = 0.1$;

3) $\delta_K = 1^\circ, \delta_D = 0.5^\circ$ - эксплуатационный диапазон, при котором допустимая погрешность стабилизации в плоскости крена определяется из условия $I = 0.1$, а допустимая погрешность стабилизации в плоскости дифферента выбирается таким образом, чтобы работоспособность индикатора была не ниже 4 по адаптированной шкале Купера-Харпера (см. рис. 4);

Таблица 1 Результаты экспертных оценок работы ИК/ИГ при наличии погрешности стабилизации относительно истинной вертикали по адаптированной шкале Купера-Харпера .

Оценка	5	4	3	2	1-0
$\delta,^\circ$	0.1-0.2	0.3-0.5	0.6-0.8	0.9-1.0	>1.1

При расчете эксплуатационного диапазона ИК/ИГ учитывались следующие ограничения, которые накладывает практика эксплуатации судов различных типов:

- максимальный период качки судов по крену ~ 30 сек.;
- максимальный период качки судов по дифференту ~ 15 сек.;
- максимальная амплитуда качки корабля по крену $\sim 15^\circ$;
- максимальная амплитуда качки корабля по дифференту $\sim 6^\circ$;

На основании полученных результатов построены диаграммы для определения допустимых параметров качки корабля в плоскости дифферента и в плоскости крена.

Эти диаграммы позволяют определить, что эксплуатационный диапазон ИК/ИГ определяемый требованиями ТЗ ОСПВ 20380 ($\delta_K = 0.1^\circ, \delta_D = 0.1^\circ$), очень узок. Эксплуатационный диапазон ИК/ИГ по амплитуде и периоду качки корабля в плоскости дифферента при требовании на точность стабилизации ИК/ИГ относительно истинной вертикали лежит в узком интервале периодов качки по дифференту.

Расширение эксплуатационного диапазона за счет снижения требований на точность стабилизации ИК/ИГ до значений $\delta_K = 1^\circ, \delta_D = 0.1^\circ$ не приносит существенного выигрыша, поскольку никак не изменяет требование на погрешность стабилизации ИК/ИГ в плоскости дифферента, хотя и позволяет расширить интервал допустимых значений амплитуд и периодов качки корабля в плоскости крена.

Расширение эксплуатационного диапазона за счет снижения требований на точность стабилизации ИК/ИГ до значений $\delta_K = 1^\circ, \delta_D = 0.5^\circ$ позволяет расширить допустимый диапазон приблизительно в 5 раз по параметрам качки корабля по крену и приблизительно в 15 раз по параметрам качки корабля по дифференту.

Для оценки точности моделирования движения ИК/ИГ на регулярном волнении и с помощью инженерной методики использовалась модель движения ИК/ИГ на нерегулярном волнении на базе метода Монте-Карло. Ввиду того, что плотности спектра качки для судов, на которых применяется система ОСПВ 20380, недоступны, для вычислений использовались расчетные спектры качки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В данной работе были решены сформулированные во введении задачи и получены следующие результаты:

1. Разработаны критерий и предложен метод оценки качества работы индикаторов курса и глissады с маятниковой системой стабилизации оптических осей при воздействии качки корабля по крену и дифференту.

2. Предложен метод расширения допустимого эксплуатационного диапазона индикаторов курса и глissады с маятниковой системой стабилизации оптических осей.

3. Проведена апробация предложенного метода расширения эксплуатационного диапазона с использованием экспертных оценок и имитационного моделирования. Установлено, что использование данного метода позволяет расширить эксплуатационный диапазон индикаторов курса и глissады с маятниковой системой стабилизации оптических осей приблизительно в 15 раз по параметрам качки по дифференту и приблизительно в 5 раз по параметрам качки по крену.

4. Разработана имитационная программа, позволяющая производить субъективную оценку качества работы системы индикаторов курса и глissады при различных параметрах качки корабля и различном размещении ИК/ИГ на ВППл.

5. Разработаны следующие математические модели движения индикаторов курса и глissады с маятниковой системой стабилизации оптических осей под воздействием регулярной и нерегулярной качки корабля.

- модель ИК/ИГ с маятниковой системой стабилизации оптических осей для условий качки корабля на регулярном волнении;

- модель ИК/ИГ с маятниковой системой стабилизации оптических осей для условий качки корабля на нерегулярном волнении;

- упрощенная модель в случае размещения ИК/ИГ в непосредственной близости от диаметральной плоскости корабля;

6. На базе разработанных моделей построены методики расчета погрешности стабилизации индикаторов курса и глissады относительно истинной вертикали при воздействии регулярной и нерегулярной качки корабля и при различном размещении индикаторов на палубе корабля.

7. Разработан комплекс программ для системы Matlab2008b для проведения расчетов с использованием указанных выше методик.

8. Выполненный в диссертации комплекс теоретических и расчетных исследований был внедрен в производство и нашел практическое применение при создании опытных и серийных образцов индикаторов курса и глissады с маятниковой системой стабилизации оптических осей ОСПВ 20380 разработанной компанией ЗАО НТЦ «Альфа-М».

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Икрянов И.И. Моделирование индикаторов курса и глissады с пассивной системой стабилизации оптических осей. // 7-я Международная конференция «Авиация и Космонавтика-2008»: Тезисы докладов – М.:Изд-во МАИ-ПРИНТ – 2008 – с.26.

2. Икрянов И.И., Тяпченко Ю.А. Исследование особенностей отображения информации корабельными индикаторами курса и глissады с маятниковой стабилизацией оптических осей. // Авиакосмическое приборостроение –М.:Изд-во Научтехлитиздат – 2009– №3 –с. 3-10 –ISSN 2073-0020.

3. Икрянов И.И. Использование имитационного моделирования для исследования системы визуальной посадки вертолета на палубу корабля.// 2-я Всероссийская конференция ученых, молодых специалистов и студентов «Информационные технологии в авиационной и космической технике-2009»: Тезисы докладов. – М.:Изд-во МАИ-ПРИНТ – 2009 – с.84.

4. Икрянов И.И. Исследование критериев и разработка методов оценки качества работы индикаторов курса и глissады с маятниковой системой стабилизации оптических осей. // 8-я Международная конференция «Авиация и Космонавтика-2009»– М.:Изд-во МАИ-ПРИНТ – 2009 – с.117.

5. Икрянов И.И. Разработка и сравнение моделей движения индикаторов курса и глissады с маятниковой системой стабилизации оптических осей в условиях качки корабля на регулярном и нерегулярном морском волнении // Тр. Межд. школы-семинара "МДОЗМФ" - Вып.7 - Орел, 2009 - с.58-64.

6. Икрянов И.И. Модели движения индикаторов курса и глissады с маятниковой системой стабилизации оптических осей. // Научно-технические ведомости СПбПУ. Серия Информатика. Телекоммуникации. Управление. – Санкт-Петербург:Изд-во СПбПУ – вып. №5 – 2009 – с.181-187.