

А. Е. ПЕЛЕВИН

ПРОГНОЗ УГЛА НАКЛОНА ПАЛУБЫ КОРАБЛЯ

Рассматривается метод прогнозирования качки корабля. В отличие от других подходов в настоящем методе прогнозирования угла качки и увеличения его длительности предлагается учитывать динамические модели корабля и возмущений. Для определения текущих параметров динамической модели качки корабля предложено использовать идентификационную процедуру, а модель волнения настраивать для конкретных условий движения. Приводятся результаты моделирования с анализом, а также прогноз угла качки корабля по данным, полученным при испытании тяжелого авианесущего крейсера.

Ключевые слова: прогноз качки корабля, динамическая модель, модель волнения, фильтр Калмана, идентификация параметров модели.

Введение

Посадка летательного аппарата (ЛА) на палубу корабля является сложным процессом, и трудности его выполнения связаны со следующими основными факторами [1]:

- ограниченные размеры палубы корабля;
- движение расчетной точки посадки;
- неуправляемые перемещения, вызванные качкой корабля;
- интенсивные атмосферные возмущения, обусловленные искривлениями и скосами воздушных потоков, набегающих на корабль.

Заход на посадку на движущийся авианосец должен осуществляться не по фиксированной траектории, а по линии, положение которой определяется в том числе углами качки корабля [2, 3].

Морское волнение, как правило, имеет нерегулярный характер и различную интенсивность в каждом конкретном случае, поэтому проводится анализ параметров качки судна для определения безопасной посадки ЛА. Важной составляющей этого анализа является прогнозирование параметров движения палубы. Прогноз осуществляется на основе информации от комплекса навигации и ориентации судна.

В момент посадки ЛА величина смещения его относительно палубы по линейным и угловым координатам не должна превышать предельной величины, определяемой заданными требованиями. Величины этих смещений определяются точностью отработки летчиком задаваемых ему команд для следования ЛА по программной траектории посадки на корабль и обуславливают точность прогноза ориентации палубы в момент посадки ЛА. Например, измеряемые уг-

Пелевин Александр Евгеньевич. Доктор технических наук, заместитель главного конструктора по навигации АО «ЦНИИ «Концерн «Электроприбор» (С.-Петербург). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

ловые перемещения и скорости бортовой и килевой качек сравниваются с предельно допустимыми значениями амплитуд этих качек, прогнозируется область незначительной качки и передается информация летчику о моментах начала и завершения взлетно-посадочных операций в заданных погодных условиях [4].

При решении ряда задач также возникает необходимость в прогнозе углов качек на будущий момент времени: это задачи стабилизации измерительных устройств на качающемся основании [5], посадки беспилотного ЛА на борт движущегося судна [6] (прогнозирование положения захватывающего устройства с учетом качки существенно снижает величину динамической ошибки в момент посадки ЛА на кран-балку) и другие.

Известные методы прогнозирования качки судна основаны на экстраполяции случайных процессов. Прогноз осуществляется с использованием спектрального представления с заданным упреждением на ограниченном временном интервале [5], на основании прогноза по методу фильтра Калмана, настроенного на средние параметры процессов [5, 7–10]. В [11] прогнозирование значений углов крена судна на заданный интервал упреждения проводится по закону равноускоренного движения объекта. Движение качки судна представлено совокупностью синусоидальных форм с рекурсивной оценкой наиболее значимых частот, в предположении медленной изменчивости частоты качки судна [12]. Однако эти методы недостаточно эффективны, поскольку надежный прогноз обеспечивается только на небольшом интервале времени и приемлемые результаты прогнозирования удалось получить в пределах от долей до секунды. Увеличение же временного интервала прогнозирования приводит к сильному увеличению погрешности прогнозирования, что не позволяет на практике успешно использовать эти методы.

Предложенный в [13] подход основывается на использовании модели динамики движения судна в пространстве состояний, но для ее построения обычно недостаточно информации.

В [15, 16] предложено использовать авторегрессионную модель с определением ее порядка и с адаптивной настройкой ее коэффициентов. Хотя передаточная функция авторегрессионной модели имеет достаточной большой порядок (знаменатель от 35 до 40 и числитель 2-3), тем не менее относительная среднеквадратическая ошибка предсказания составляет 10-15% на 5 с вперед, что является достаточно грубым для требований посадки ЛА, поскольку абсолютная максимальная ошибка может достигать 1,5-2°.

В данной статье рассматривается вопрос повышения достоверности прогноза и его длительности на основе учета динамики корабля путем идентификации параметров его модели качки и адаптивного прогноза угла волнового склона.

Постановка задачи

Задачу будем решать при следующих предположениях:

- 1) судно движется с постоянными курсом и скоростью, что характерно для движения корабля при посадке на него ЛА;
- 2) процесс качки судна будем считать стационарным, с малыми углами наклона, вызванными волнением морской поверхности с интенсивностью не выше 5 баллов;
- 3) незначительное влияние вертикальных колебаний на килевые, а также их слабая связь с бортовой качкой, следовательно, вертикальную, килевую и бортовую качки можно рассматривать отдельно друг от друга;

4) наличие жесткой связи палубы с корпусом судна, в условиях качки судна палуба совершает колебательные движения относительно его расчетного положения на тихой воде.

Процесс качки судна в этих условиях достаточно хорошо описывается линейной теорией качки, связывающей линейную зависимость параметров качки с соответствующими параметрами морского волнения.

Рассмотрим решение задачи на примере бортовой качки корабля, прогноз вертикальной и килевой качек осуществляется аналогично.

Уравнение бортовой качки корабля в связанной системе координат $Oxyz$ (ось Ox – продольная, ось Oy – направлена на правый борт, ось Oz – направлена вверх) при малых углах наклона имеет вид [16]:

$$\begin{aligned} \dot{\vartheta} &= \omega_x, \\ (J_{xx} + \lambda_{44})\dot{\omega}_x &= -\mu_{44}\omega_x - mgh_0\vartheta + mgh_0\chi_x \alpha_w + K_\delta\delta + M, \end{aligned} \quad (1)$$

где ϑ – угол бортовой качки;

ω_x – угловая скорость бортовой качки;

λ_{44} – присоединенный момент инерции;

μ_{44} – присоединенная масса при демпфирующих членах;

h_0 – поперечная метацентрическая высота;

α_w – угол волнового склона;

m – масса судна;

g – ускорение силы тяжести;

χ_x – редуцированный коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей судна и от курса набега волны K_b и осадки судна T ;

δ – угол перекаладки руля;

K_δ – коэффициент гидродинамического момента от силы руля, учитывающий скоростной поток, натекающий на него, аппликату центра давления пера руля относительно центра масс и его площадь;

M – аэродинамический возмущающий момент от ветра, действующий на надводную часть судна.

Уравнение (1) перепишем в нормальной форме:

$$\begin{aligned} \dot{\vartheta} &= \omega_x, \\ \dot{\omega}_x &= -2\zeta\omega_x - \omega_0^2\vartheta + \omega_0^2\chi_x \alpha_w + K_\delta\delta + M, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\omega_0^2 = \frac{mgh_0}{J_{xx} + \lambda_{44}}$, $\zeta = \frac{\mu_{44}}{2(J_{xx} + \lambda_{44})}$. Обозначения для K_δ и M не изменены.

Требуется предсказать прогнозируемое значение угла бортовой качки $\vartheta(t+\tau)$ – значение процесса качки в момент $t + \tau$ через время τ от текущего значения на основании ранее измеренных ее параметров движения судна, обозначаемых матрицей $Z(t)$, где $\tau > 0$.

Для оценки качества прогнозирования используем критерий среднего квадрата ошибки:

$$\bar{e}^2(t + \tau) = M \left\{ [e(t + \tau)]^2 | Z(t) \right\} = M \left\{ [\vartheta(t + \tau) - \hat{\vartheta}(t + \tau)]^2 | Z(t) \right\}. \quad (3)$$

Алгоритм прогноза должен выбираться так, чтобы значение критерия $\bar{e}^2(t + \tau)$ было минимально.

Текущие значения параметров качки определяются по информации от навигационного комплекса, т.е. наблюдаются углы качки корабля и их угловые скорости.

Прогноз должен осуществляться на основе информации, получаемой от навигационного комплекса, в состав которого входят инерциальные навигационные системы, вырабатывающие информацию об угле качки ϑ , его угловой скорости ω_x , а также угле перекладки руля δ , скорости и направлении кажущегося ветра V_K и γ_K , поступающих от соответствующих систем. Прогноз должен основываться на информации, полученной в прошлые и текущий моменты времени.

Считаем, что медленно меняющийся момент относительно оси Ox , создаваемый воздействием ветра на надводную часть корабля, в большей части компенсируется углом перекладки руля. Заметим также, что корабль направляется навстречу ветру и идет постоянным курсом при посадке ЛА, поэтому указанный аэродинамический момент – мал.

Ясно, что близкие значения можно предсказать с большей точностью, чем удаленные, и поэтому с увеличением времени прогноза τ средний квадрат ошибки будет расти, вследствие этого определим значение τ , при котором $\bar{e}^2(t + \tau) \leq \bar{e}_0^2$, где \bar{e}_0 – заданная среднеквадратическая ошибка прогноза, т.е. исследуем также возможную максимальную длительность прогноза τ_{max} с обеспечением требуемых точностей.

Основой предлагаемого подхода служит динамическая модель качки судна, известные параметры которой будут использованы на первом этапе анализа решения задачи для оценки возможностей прогноза качки. Затем, на втором этапе, будет решена задача идентификации параметров динамической модели качки корабля, а также задача адаптивного формирования параметров модели кажущегося волнения с оценкой угла волнового склона в текущий момент времени, который используется для прогноза угла качки. В завершение будут приведены результаты моделирования оценки максимального времени прогноза качки на основе натурных данных.

Решение задачи

Дополним уравнения качки корабля (2) уравнениями, описывающими возмущения: волнение и ветер.

Момент волнового воздействия выражается через угол волнового склона α_w . Обычно для описания α_w используется марковский процесс второго порядка [16], отражающий основные свойства волнения в открытом море:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2; \\ \dot{x}_2 &= -a_1 x_2 - a_2 x_1 + c_x w_1, \end{aligned} \quad (4)$$

где $x_1 = \alpha_w$, причем $a_1 = 0,6 \omega_{aw}$; $a_2 = 1,1 \omega_{aw}^2$;

$$c_x = \frac{h_{3\%} \omega_w^2}{5,3g} \cdot 1,85 \omega_{aw} \sqrt{\omega_{aw}} \text{ при размерности } \omega [c^{-1}]. \text{ Здесь } \omega_w \text{ – частота истинного волнения, } \omega_{aw} \text{ – частота кажущегося волнения, определяемая формулой [16, 17]}$$

$$\omega_{aw} = \omega_w \left| 1 - V_x \frac{\omega_w}{g} \cos \beta_w \right|, \quad (5)$$

$h_{3\%}$ – высота волны трехпроцентной обеспеченности, определяется балльно-стью волнения [17],

g – ускорение силы тяжести,

w_1 – порождающий белозумный процесс единичной интенсивности.

В формуле (5) угол β_w представляет собой угол между курсом корабля и направлением набега волн.

Нескомпенсированную составляющую момента ветрового воздействия опишем достаточно адекватной стохастической моделью в виде стационарного марковского процесса, заданного уравнением [16]:

$$\dot{M} = -M/\tau_a + \sigma_a \sqrt{2/\tau_a} w_2, \quad (6)$$

где τ_a и σ_a – интервал корреляции и среднеквадратическое значение момента медленно меняющегося ветрового воздействия, w_2 – порождающий белый шум единичной интенсивности.

Объединим уравнения (2), (4) и (6) в одну матричную систему уравнений. При этом вектор состояния будет иметь следующие компоненты:

$$X = (\vartheta \quad \omega_x \quad \alpha_w \quad \dot{\alpha}_w \quad M)^T,$$

а система и ее матрицы получают вид:

$$\dot{X} = AX + GW, \quad (7)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_0^2 & -2\zeta & \omega_0^2 \chi_x & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -a_2 & -a_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/\tau_a \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ K \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ c_x & 0 \\ 0 & \sigma_a \sqrt{2/\tau_a} \end{bmatrix}.$$

Не меняя обозначений, приведем систему к дискретному виду:

$$X_{K+1} = AX_K + GW_K. \quad (8)$$

Измеряются угол крена и его угловая скорость с интервалом дискретности $\Delta t = 0,1$ с, т.е. измерения формируются в виде:

$$Y_K = HX_K + V_K, \quad (9)$$

где матрица измерений имеет вид:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

где V – вектор погрешностей измерений, представляющий собой дискретный белый шум с интенсивностью компонент, соответствующих погрешностям определения угла качки и его угловой скорости.

Применим традиционные соотношения фильтра Калмана (ФК), получим оценку компонент вектора состояния \hat{X}_K [16]:

$$\begin{aligned} \hat{X}_{K+1/K} &= A\hat{X}_K + B\delta_K, \\ \hat{X}_{K+1} &= \hat{X}_{K+1/K} + K_K (Z_K - H\hat{X}_{K+1/K}), \end{aligned}$$

где $K_{K+1} = P_{K+1/K} H^T (H P_{K+1/K} H^T + R)^{-1}$, $P_{K+1/K} = A P_K A^T + G G^T$, P_K – матрица ковариаций ошибок оценивания, K_K – коэффициент усиления ФК.

Известно (см., например, [18]), что прогноз L шагов, задаваемый соотношением на основе ФК,

$$\hat{X}_{K+L} = A^L \hat{X}_K, \quad (10)$$

где \hat{X}_K – оценка вектора состояния на текущий момент времени, минимизирует критерий (3).

Чтобы проверить возможности прогноза качки на основании изложенного подхода, проведено моделирование для случая, когда модель качки корабля и модель, заложенная в ФК, совпадают. На рис. 1 приведены результаты моделирования качки корабля под воздействием нерегулярного морского волнения. Моделирование проводилось на модели фрегата проекта 11356 [16]: водоизмещение – $D = 5100$ т, длина – 110 м, ширина – 15,5 м, осадка – 5,6 м, метацентрическая высота $h_0 = 1,2$ м при волнении моря 3 балла и скорости ветра 8 м/с, с временными интервалами дискретизации 0,02 с (частота решения задачи движения модели – 50 Гц) и проведением измерений с интервалом 0,1 с (частота измерений – 10 Гц). При моделировании задавались среднеквадратические погрешности шумов измерений: по углу крена – 1 угл. мин, по угловой скорости крена – 0,2°/с.

На рис. 1 представлены графики изменения угла крена, угла волнового склона и момента ветрового воздействия. При этом штриховые линии описывают истинное изменение указанных переменных, а сплошные – их оценку на основе фильтра Калмана. На первом графике видна только одна кривая, что говорит о практическом совпадении оценки и истинного значения. Из рис. 1 видно, что угол волнового склона оценивается с достаточно высокой степенью точности.

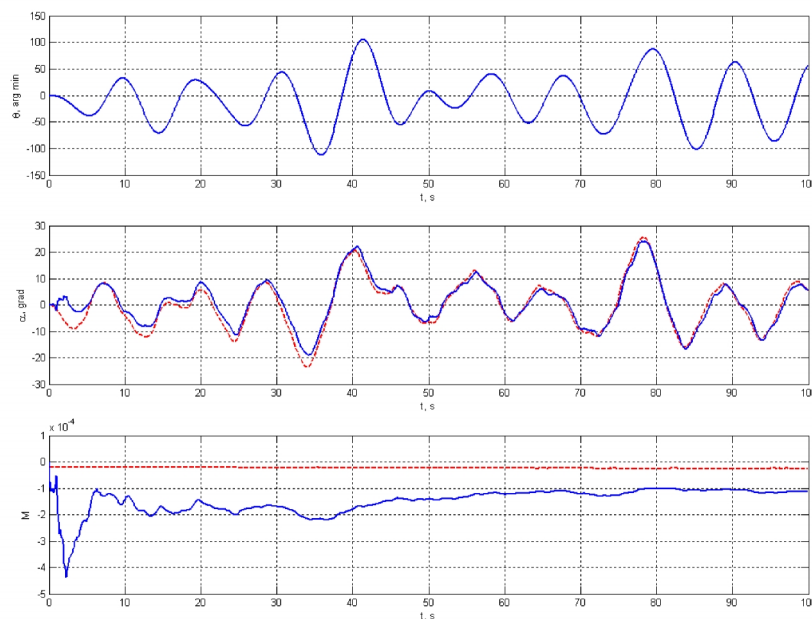


Рис. 1. Результаты моделирования качки корабля под воздействием нерегулярного морского волнения

На рис. 2 на первом графике приведены истинное значение (штриховые линии) и прогноз на время 2 с угла крена (сплошные линии), на втором графике – ошибка прогноза угла крена (жирные прямые соответствуют ограничениям ± 10 угл. мин).

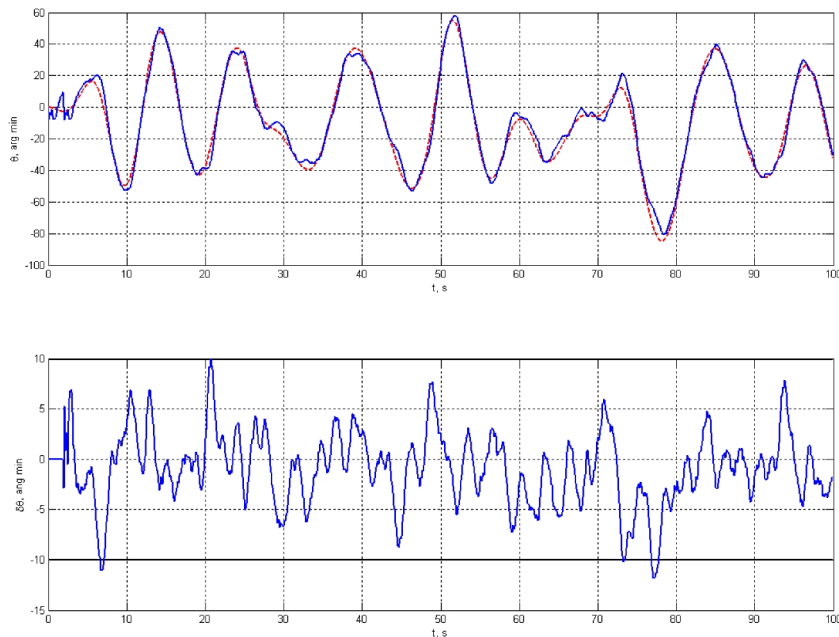


Рис. 2. Ошибка прогноза угла крена и угла волнового склона на время 2 с.

Поскольку параметры модели продольной качки авианосца неизвестны, то для идентификации ее параметров (2) применим подход, изложенный в [19, 20]. Он заключается в использовании следующего алгоритма, выполняемого по шагам.

Шаг 1. Грубую первую оценку параметров динамической модели качки корабля ω_0 и ζ находим по эмпирическим формулам (см., например, [21, 22]). Известно [21], что коэффициент χ_x изменяется в пределах от 0,3 до 0,5, выбираем среднее значение, учитываем балльность и направление набега волн.

Шаг 2. Далее производим оценку полного вектора состояния $\hat{X}_K = (\hat{\vartheta}_K \quad \hat{\omega}_{xK} \quad \hat{\alpha}_{wK} \quad \hat{\alpha}_{wK} \quad \hat{M}_K)^T$ по зафиксированному набору измерений Z^N , т.е. $Z^N = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_N\}$, где $Y_K = [\vartheta_K, \omega_K]^T$ на основе фильтра Калмана.

Шаг 3. На основе метода наименьших квадратов (МНК) идентифицируем неизвестные параметры модели ω_0 и ζ на основе полученной последовательности оценок вектора состояния (с учетом шага дискретности, равного 0,1 с), т.е. определяем оценку параметров модели $\hat{\omega}_0$ и $\hat{\zeta}$. Этот шаг делаем для каждого уравнения дискретной системы (8) в отдельности или используем матричные вычисления.

Шаг 4. Затем повторяем шаги 2 и 3, если проверка неравенств разности двух последовательных оценок параметров не превышает заданных уровней.

Эта идентификационная процедура использовалась при определении параметров модели качки корабля, которые описаны выше. Точность идентифика-

ции составляла 10-15%. Результаты проверки чувствительности указанного подхода прогноза углов качки показали, что такой точности знания параметров модели достаточно для его применения.

На основании экспериментальных данных была проведена идентификация параметров модели килевой качки авианесущего корабля. Его модель килевой качки полагалась аналогичной модели (2). Следующие значения параметров были получены: $\omega_0 = 0,72$ и $\zeta = 0,052$. Сходимость была обеспечена за три итерации. Эти данные использовались и для прогнозирования угла дифферента авианесущего корабля, что позволяло сравнить прогнозные значения угла дифферента с действительными значениями, известными на момент прогноза.

На рис. 3 представлены на первом графике изменение угла дифферента (штриховые линии) и его оценка на основе ФК (сплошная линия), на втором графике – оценка угла волнового склона. Из графиков видно, что угол волнового склона оценивается и его текущее значение используется для прогноза угла дифферента. Ошибка прогноза угла дифферента на 4 с представлена на рис. 4, она не превышает 10 угл. мин.

Заметим, что дополнительно необходимо учитывать постоянную составляющую дифферента, которую можно оценить путем осреднения измеряемых углов дифферента или применением сглаживающего фильтра. Для бортовой качки необходимо использовать информацию об истинном или кажущемся ветре (направление и скорость ветра), создающем также некоторый постоянный крен. И, наконец, для адекватного описания волнового возмущения необходимо использовать характеристики волнения: балльность и направление набега волн.

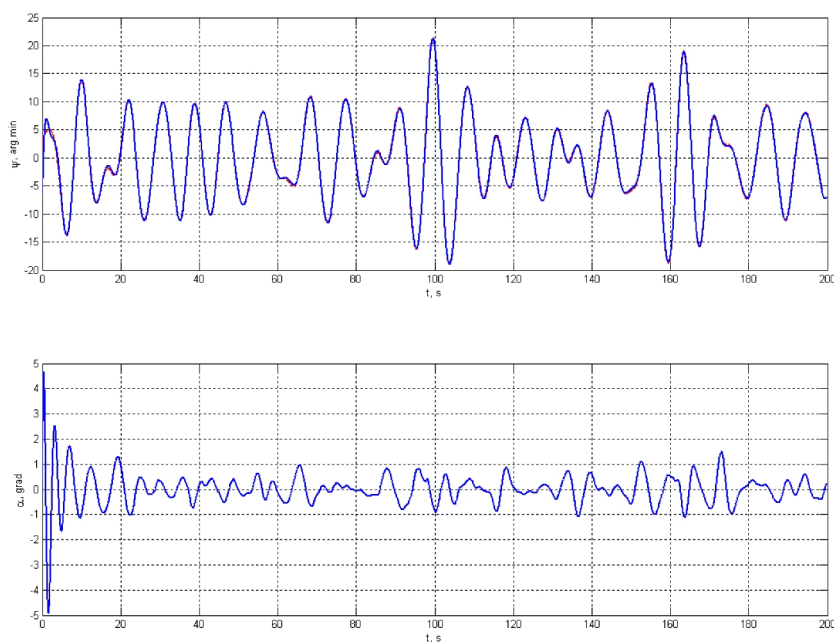


Рис. 3. Продольная качка авианосца под воздействием нерегулярного морского волнения и оценка угла волнового склона набегающей волны

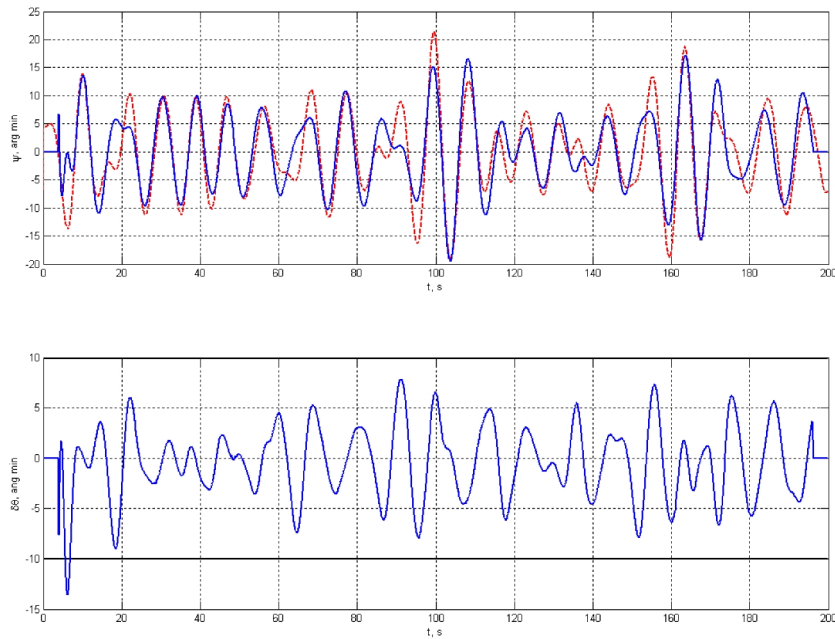


Рис.4. Ошибка прогноза килевой качки авианосца на интервале прогноза, равном 4 с.

Заключение

1. Предложен подход прогноза качки корабля на основе идентифицированной динамической модели, а также моделей волнения и ветрового воздействия, параметры которых зависят от их характеристик.
2. Показано по результатам моделирования, что с использованием этого подхода можно сделать прогноз углов качки на время до половины собственного периода качки.
3. Подход проверен на экспериментальных данных об углах продольной качки авианосца.

Выражаю благодарность заместителю генерального директора – главному конструктору изделия «Луна» И. Е. Гутнеру за то, что привлек к решению данной проблемы и предоставил экспериментальные данные.

ЛИТЕРАТУРА

1. Власов П. Н., Харин Е. Г., Поликарпов В. Г., Ясенюк А. В., Копылов И. А., Копелович В. А., Паденко В. М. Технология проведения тракторных измерений для оценки взлета и посадки самолета на корабль с использованием комплекса бортовых тракторных измерений // Новости навигации. 2013. №2. С.22-29.
2. Гутнер И.Е., Журавлев Л.Д., Зворыкин Е.Н., Молочников А.А., Орлов М.В. Вычисление текущего угла наклона глissады для обеспечения посадки самолета на палубу авианосца // Гироскопия и навигация. 2008. №4. С. 40-48.
3. Бондарев В.Г. Автоматическая посадка самолета на авианосец // Научный вестник МГТУ ГА. 2012. №185. С. 124-131.
4. Нечаев Ю.И., Дегтярев А.Б. Сценарии развития экстремальных ситуаций в бортовых интеллектуальных системах // Искусственный интеллект. 2004. №3. С. 360-370.

5. Ривкин С.С. Стабилизация измерительных устройств на качающемся основании. М.: «Наука», 1978. 320 с.
6. Подоплекин Ю. Ф., Шаров С. Н. Ключевые вопросы теории и проектирования систем посадки беспилотных летательных аппаратов на малоразмерные суда // Информационно-управляющие системы. 2012. №3. С. 22–28.
7. Крайнов В.И., Тупышев В.А. Об экстраполяции вырабатываемых значений углов качки корабля // Гироскопия и навигация. 1994. №1. С. 58–64.
8. Медынский Ю.В. Исследование точностных характеристик систем автоматического управления посадки самолета // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2004. Вып. 14. С. 88–95.
9. Григорьев В.В., Медынский Ю.В., Мотылькова М.М., Мансурова О.К. Прогнозирование процесса вертикальной качки корабля // Изв. ВУЗов. Приборостроение. 2008. Т. 51. №1. С. 29–34.
10. Шаров С.Н., Толмачев С.Г. Прогнозирование положения захватного устройства при посадке беспилотного летательного аппарата на движущееся судно в условиях качки // XXI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. 2014. С. 205–208.
11. Куклина Е.А. Краткосрочное прогнозирование углов крена маломерного судна // Международная научная конференция MICROCAD. Николаев: Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, 2014.
12. Ra W.S., Whang I.H. Real-time long-term prediction of ship motion for fire control applications // Electronics Letter. 2006. Vol. 42. No. 18. P. 168–173.
13. Lainiotis D.G., Charalampous C., Giannakopoulos P., Katsikas S. Real time ship motion estimation // Mastering the Oceans Through Technology Proceedings. 1992. Vol. 1. P. 283–287.
14. Yang X., Pota H., Garratt M., Ugrinovskii V. Ship Motion Prediction for Maritime Flight Operations // Proceedings of the 17th World Congress. The International Federation of Automatic Control. Seoul, Korea. July 6–11. 2008. P. 12407–12412.
15. Lin Z., Yang Q., Guo Z., Li J. An Improved Autoregressive Method with Kalman Filtering Theory for Vessel Motion Prediction // International Journal of Intelligent Engineering & Systems. 2011. Vol. 4. No. 4. P. 11–18.
16. Дмитриев С.П., Пелевин А.Е. Задачи управления и навигации при стабилизации морского судна на траектории. СПб: ГНЦ ЦНИИ «Электроприбор», 2002. 160 с.
17. Бородай И.К., Невзетаев Ю.А. Мореходность судов. Л.: Судостроение, 1982. 288 с.
18. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. Пер. с англ. М.: «Связь», 1976. 496 с.
19. Пелевин А.Е. Идентификация параметров модели объекта в условиях внешних возмущений // Гироскопия и навигация. 2014. №4. С. 111–120.
20. Пелевин А.Е. Использование информации НАП СНС при идентификации параметров модели морского судна // Новости навигации. 2016. №2. С. 21–25.
21. Рemez Ю.В. Качка корабля. Л.: Судостроение, 1983. 328 с.
22. Чижинюмов С.Д. Основы динамики судов на волнении. Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2010. 110 с.

Pelevin A. E. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, Russia)
Prediction of Ship Deck Inclination Angle // *Гироскопия и Навигация*. 2016. Vol. 24. No. 4 (95). P. 122–132.

Abstract. The paper focuses on a ship motion prediction method. Unlike the other approaches, this prediction method with extended prediction duration uses dynamic models of the ship and disturbances. Identification procedure is used to determine the current parameters of ship motion dynamic model, and disturbance model is adjusted for certain motion conditions. Modeling results with the analyses are given, and the prediction of ship oscillation angle by the data obtained at the tests of a heavy aircraft-carrying cruiser.

Key words: ship motion prediction, dynamic model, oscillation model, Kalman filter, model parameter identification

REFERENCES

1. **Vlasov P.N., Kharin E.G., Polikarpov V.G., Yasenyuk A.V., Kopylov I.A., Kopelovich V.A., and Padenko V.M.** Technology of path measurements to estimate the aircraft carrier takeoff and landing using the set of onboard path measurements // *Novosti navigatsii*. 2013. No. 2. P. 22–29.
2. **Gutner I.E., Zhuravlev L.D., Zvorykin E.N., Molochnikov A.A., and Orlov M.V.** Computing the current glideslope angle to provide aircraft carrier landing // *Giroskopiya i Navigatsiya*. 2008. No. 4. P. 40–48.
3. **Bondarev V.G.** Automated aircraft carrier landing // *Nauchnyi vestnik MGTU GA*. 2012. No. 185. P. 124–131.
4. **Nechaev Yu.I., Degtyarev A.B.** Scenarios of emergency situations in onboard intellectual systems // *Iskusstvennyi intellect*. 2004. No. 3. P. 360–370.
5. **Rivkin S.S.** Stabilizatsiya izmeritel'nykh ustroystv na kachayushchemsia osnovanii (Stabilization of Measurement Devices on Oscillating Platform). Moscow: Nauka, 1978.
6. **Podoplekin Yu.F., Sharov S.N.** Key issues in theory and design of UAV landing on small ships // *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*. 2012. No. 3. P. 22–28.
7. **Krainov V.I., Tupysev V.A.** On extrapolation of generated ship motion angles // *Giroskopiya i Navigatsiya*. 1994. No. 1. P. 58–64.
8. **Medynskii Yu.V.** Studying the accuracy of automatic landing control systems // *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*. 2004. No. 14. P. 88–95.
9. **Grigor'ev V.V., Medynskii Yu.V., Motyl'kova M.M., and Mansurova O.K.** Predicting the ship vertical motion // *Izv. VUZov. Proborostroyeniye*. 2008. Vol. 51. No. 1. P. 29–34.
10. **Sharov S.N., Tolmachev S.G.** Prediction of the gripping device position in case of UAV landing on a moving ship in the conditions of ship motions // *20th St. Petersburg International Conference on Integrated navigation Systems*. 2013. P. 205–208.
11. **Kuklina E.A.** Short-term prediction of small ship pitch angles // *International Scientific Conference MICROCAD*. Nikolaev: Admiral Makarov national University of Shipbuilding, 2014.
12. **Ra W.S., Whang I.H.** Real-time long-term prediction of ship motion for fire control applications // *Electronics Letter*. 2006. Vol. 42. No. 18. P. 168–173.
13. **Lainiotis D.G., Charalampous C., Giannakopoulos P., and Katsikas S.** Real time ship motion estimation // *Mastering the Oceans Through Technology Proceedings*. 1992. Vol. 1. P. 283–287.
14. **Yang X., Pota H., Garratt M., and Ugrinovskii V.** Ship motion prediction for maritime flight operations // *Proceedings of the 17th World Congress. The International Federation of Automatic Control*. Seoul, Korea. July 6-11, 2008. P. 12407–12412.
15. **Lin Z., Yang Q., Guo Z., and Li J.** An improved autoregressive method with Kalman filtering theory for vessel motion prediction // *International Journal of Intelligent Engineering & Systems*. 2011. Vol. 4. No. 4. P. 11–18.
16. **Dmitriev S.P. and Pelevin A.E.** Zadachi upravleniya i navigatsii pri stabilizatsii morskogo sudna na traektorii (Navigation and Control Problems in Ship Stabilization and Path-Following). St. Petersburg: CSRI Elektropribor, 2002.
17. **Borodai I.K. and Netsvetaev Yu.A.** Morekhodnost' sudov (Ship Sea-Going Performance). Leningrad: Sudostroyeniye, 1982.
18. **Sage A.P. and Melsa J.L.** Estimation Theory with Applications to Communications and Control. McGraw-Hill, 1971.
19. **Pelevin A.E.** Identification of vehicle model parameters under external disturbances // *Giroskopiya i Navigatsiya*. 2015. No. 2. P. 143–149.
20. **Pelevin A.E.** Using GNSS user data to identify the parameters of sea-going ship model // *Novosti navigatsii*. 2016. No. 2. P. 21–25.
21. **Remez Yu.V.** Kachka korablia (Ship Oscillation Motion). Leningrad: Sudostroyeniye, 1983.
22. **Chizhiumov S.D.** Osnovy dinamiki sudov na volnenii (Basics of Ship Dynamics during Disturbances). Komsomolsk-on-Amur: KnAGTU, 2010.

Материал поступил 20.10.2016