

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра компьютерного моделирования и многопроцессорных систем

Выпускная квалификационная работа магистра

**Исследование метода оценки параметров
равновесной посадки с помощью имитационного
моделирования качки судна**
Егоров Денис Александрович

Направление 02.04.02

«Фундаментальная информатика и информационные технологии»

Магистерская Программа «Распределенные вычислительные технологии»

Научный руководитель

д. т. н. Дегтярев А. Б.

Санкт-Петербург

2021

Оглавление	
Введение.....	3
Постановка задачи	4
Глава 1. Теоретические подходы к корректному определению положения равновесия судна в море.....	5
1.1 Общие теоретические сведения	5
1.2 Алгоритм Ю. И. Нечаева	8
1.3 Описание шагов алгоритма Нечаева	11
1.3.1 Ввод исходной информации	11
1.3.2 Формирование массива измерительной информации.....	12
1.3.3 Последовательность формирования «скользящего окна».....	14
1.3.4 Идентификация режимов колебательного движения.....	15
1.3.5 Определение равновесных параметров посадки	16
1.3.6 Оценка погрешности результатов работы алгоритма.....	17
1.4 Проблемы функционирования алгоритма контроля равновесной посадки.....	18
1.4.1 Проблемы ограниченности выборки	18
1.4.2 Влияние сложности математической модели, используемой для настройки алгоритма.....	23
Глава 2. Практическая реализация в виртуальном полигоне.....	24
2.1 Пошаговое описание реализации алгоритма в Виртуальном полигоне.....	24
2.2 Используемые трехмерные модели судов	24
2.3 Используемые модели морского волнения.....	32

2.4	Верификация Виртуального полигона	33
2.5	Генерация базы знаний	34
2.6	Вычисление коэффициентов А и В в формуле Нечаева.....	36
Глава 3. Полученные результаты и выводы		39
3.1	Результаты расчета коэффициентов в формуле Ю.И.Нечаева	39
3.2	Сравнение полученных результатов для аварийных ситуаций, представленных в разделе 2.2.....	40
3.2.1	Бортовая качка.....	41
3.2.2	Килевая качка	42
3.2.3	Вертикальная качка	43
3.3	Выводы	44
Заключение		46
Используемая литература.....		47

Введение

Равновесная посадка — это угол, на который отклоняется судно от положения равновесия с учетом перемещений грузов, затопления отсеков и других факторов, возникающих во время эксплуатации судна.

Определение равновесной посадки является необходимым предварительным этапом для применения других алгоритмов систем поддержки принятия решений, таких как идентификация затопленного отсека, прогнозирование вероятности опрокидывания аварийного судна, и другие. Вычисление равновесной посадки на реальном судне производится по показаниям датчиков углов крена (бортовая и килевая качка) и датчиков давления водяного столба (вертикальная качка). На масштабных моделях судов измерения производятся по показаниям акселерометра и гироскопа. В линейном случае (симметричные колебания) математическое ожидание отдельно взятой величины будет совпадать с положением равновесия по соответствующей оси координат. Однако, качка судна на морском волнении является, как правило, нелинейным процессом, а значит, требуется поправка относительно математического среднего.

Постановка задачи

Цель данной работы состоит в исследовании метода оценки параметров равновесной посадки с помощью имитационного моделирования качки судна. В процессе исследования необходимо ознакомиться с существующими на данный момент теоретическими подходами к корректному определению положения равновесия плавающего судна в море, далее определиться с алгоритмом, который возможно реализовать в рамках имитационного моделирования качки судна, встроить данный алгоритм в существующий программный комплекс Виртуальный полигон, провести эксперименты с различными моделями волнения и определить рациональность их использования.

Таким образом задача сводится к выполнению следующих шагов:

1. Ознакомления с существующим теоретическим подходом к корректному определению положения равновесия судна в море;
2. На основании полученных теоретических знаний определиться с практическим алгоритмом
3. Реализовать практический алгоритм в программном комплексе Виртуальный полигон
4. Провести ряд экспериментов с помощью имитационного моделирования
5. На основании данных, полученных на предыдущем шаге, определить целесообразность использования сложных нелинейных моделей волнения для определения параметров

Глава 1. Теоретические подходы к корректному определению положения равновесия судна в море

1.1 Общие теоретические сведения

Определение равновесного положения плавающего судна не является основной целью. В большинстве случаев знание значения текущей равновесной посадки являются некоторой отправной точкой для суждения о состоянии судна. Мониторинг их изменения может быть положен в основу системы поддержки принятия решений по действию в экстремальных ситуациях, таких как затопление отсеков, развитие аварии, пожар и прочее, а также при прогнозировании изменения состояния аварийного корабля, принятии решения о времени покидания гибнущего судна и пр.

Существующие проблемы корректного определения положения равновесия плавающего судна в море давно и хорошо известны. Они в первую очередь связаны с тем, что в реальных условиях судно не находится в состоянии покоя, а совершает некоторые колебательные движения вокруг своего положения равновесия. Из-за этого невозможно использовать методику определения равновесных значений посадки, сходную с процедурой, которая используется при креновании[3]. Кренование представляет собой процесс создание искусственного крена судна с помощью перемещения груза в поперечной плоскости. Выполняется данный процесс с целью проверки правильности расчетов нагрузки и остойчивости.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что на борту судна невозможно как непосредственное, так и косвенное измерение положения равновесия.

При этом можно с той или иной степенью точности записывать процессы колебаний судна на волнении, то есть вертикальную, бортовую и килевую качку. Однако при этом использование временных реализаций качки

корабля для определения равновесного положения оказывается еще более проблематичным. Это связано со следующими фактами :

1. Качка корабля, при достаточно быстром изменении нагрузки, особенно в аварийных условиях, в силу возможного поступления воды или перемещения ее из отсека в отсек, не является стационарным процессом[13]. Следовательно, для мгновенных оценок положения равновесия требуются алгоритмы, которые используют данные реализации за небольшой промежуток времени, в которых процесс можно считать квазистационарным. Так же необходимо, чтобы алгоритмы работали достаточно быстро.
2. Характеристики, получаемые при помощи статистической обработки реализаций качки, не всегда могут быть использованы непосредственно для определения равновесного положения. Например, среднее по процессу, обычно рассматриваемое в качестве оценки математического ожидания, не соответствует положению равновесия, особенно если рассматривается случай существенно нелинейных и несимметричных колебаний. Из этого следует, что необходим некоторый алгоритм, использующий заранее полученные записи качки судна, который позволяет адекватно откорректировать среднее значение, приближая его к истинному значению равновесия.

Данную роль как раз и выполняет алгоритм, предложенный Ю.И.Нечаевым.

После регистрации процесса колебаний корабля на волнении следует обработка записанного цифрового сигнала. Одной из простейших характеристик, которую можно оценить с высокой степенью надежности является математическое ожидание процесса. Предполагая о его стационарности и эргодичности, т.е. возможности замены обработки набора реализаций в момент времени t обработкой одной достаточно длинной

временной реализации, можно получить среднее значение процесса. Однако оно не обязательно будет соответствовать положению равновесия.

Для того, чтобы объяснить это, рассмотрим самую общую математическую модель изолированной качки корабля:

$$\ddot{X} + M_d(\dot{X}) + M_r(X) = M(t), \quad (1)$$

где M_d – сила/момент демпфирования, M_r – восстанавливающая сила/момент, M – возмущающая сила/момент. Применим к правой и левой частям уравнения операцию математического ожидания (E).

$$E[\ddot{X} + M_d(\dot{X}) + M_r(X)] = E[\ddot{X}] + E[M_d(\dot{X})] + E[M_r(X)] = E[M_r(X)], \quad (2)$$

Первые два слагаемых оказываются равными нулю, так как, если бы они были ненулевыми, то корабль совершал бы не колебательные движения, а равномерные или равноускоренные. При этом $E[M(t)] = 0$. Отсюда следует:

$$E[M_r(X)] = 0, \quad (3)$$

Получается, что равновесное и среднее значение будут совпадать лишь в линейном варианте. Для проверки данного утверждения, аппроксимируем, возмущающий момент бортовой качки полиномом пятой степени, как это принято в большом количестве работ по качке корабля:

$$M_r(\theta) = a(\theta - \theta_0) + b(\theta - \theta_0)^3 + c(\theta - \theta_0)^5, \quad (4)$$

где θ_0 – равновесный угол крена. Данная аппроксимация дает возможность учесть наличие максимума, угла заката и S-образность диаграммы статической остойчивости. Тогда, учитывая (3), можно записать:

$$aE[\theta] - a\theta_0 + bE[(\theta - \theta_0)^3] + cE[(\theta - \theta_0)^5] = 0, \quad (5)$$

и, следовательно,

$$\theta_0 = E[\theta] + \frac{b}{a}E[(\theta - \theta_0)^3] + \frac{c}{a}E[(\theta - \theta_0)^5], \quad (6)$$

При несимметричных колебаниях, которые чаще всего присутствуют в нелинейном случае, относительно положения равновесия статистические моменты во втором и третьем слагаемых не будут равны нулю. Тогда равновесное значение крена не равно среднему по процессу.

Вычислить данную поправку теоретически не представляется возможным, что заставляет искать приближенные пути оценки равновесного значения. Именно такая процедура и предложена в алгоритме Ю.И.Нечаева[1].

1.2 Алгоритм Ю. И. Нечаева

Базовая структура алгоритма построена на основе данных математического моделирования динамики взаимодействия надводных и подводных объектов с внешней средой и отражает физические закономерности процессов колебательного движения аварийного судна при бортовой, килевой и вертикальной качке. Отработка эффективности алгоритма проверялась в процессе натуральных испытаний, что отражено в [4], а его адекватность – путем сопоставления с данными экспериментальных исследований поведения радиоуправляемых моделей морских судов на естественном волнении.

Рассмотрим алгоритм, представив его в следующем стандартном виде:

$$X_0 = \bar{X} \left[1 + (AX_m + BX_m^2) \frac{|X''_{max}| - |X''_{min}|}{|X''_{max}| + |X''_{min}|} \right] \quad (7)$$

В данной формуле X_0 — отклонение судна от положения равновесия (угол), \bar{X} — среднее значение отклонения, $X_m = |X''_{max}| + |X''_{min}|$ — средний размах отклонения, X'' — угловое ускорение, А и В — коэффициенты, которые необходимо определить для каждого судна путем моделирования. Угол, угловую скорость и угловое ускорение измеряют по трем осям. Данная формула записана только для одной оси, поэтому коэффициенты вычисляются для каждой оси отдельно.

Смещение положения равновесного значения относительно нулевой линии рассматриваемого процесса может происходить в разные стороны, что учитывается знаками коэффициентов A и B .

Перепишем формулу (7) в более компактной форме:

$$X_0 = \bar{X}[1 + F_1(X_m)F_2(X''_{min}, X''_{max})] \quad (8)$$

Здесь $F_1(X_m)$ – функция идентификации, учитывающая особенности судна в процессе «настройки» модели взаимодействия; X_m – средний размах колебаний; $F_2(X''_{min}, X''_{max})$ – функция интерпретации, позволяющая выделять «скрытые» эффекты в зависимости от особенностей колебательного движения судна при линейной и нелинейной качке;

Функция $F_1(X_m)$ представляет собой некоторую нелинейную адаптивную модель, которая обеспечивает идентификацию алгоритма применительно к определенному судну.

$$F_1(X_m) = AX_m + BX_m^2 \quad (9)$$

Коэффициенты A и B в данной функции получаются в процессе математического и/или физического моделирования взаимодействия судна с внешней средой. В второй главе данной работы отражено как вычисляются данные коэффициенты с помощью имитационного моделирования в программном комплексе Виртуальный полигон. Функцию $F_1(X_m)$ можно интерпретировать в следующем виде: в случае, если идентична динамика исследуемого и некоторого базового судна, то коэффициенты A и B сохраняются и соответствуют заданному классу судна.

При этом функция $F_2(X''_{min}, X''_{max})$ характеризует основные физические эффекты и закономерности динамики сложной системы, которые зависят от особенностей восприятия динамических нагрузок при качке судна на нерегулярном волнении. Некоторая стандартная модель преобразования информации на основе этой функции имеет следующий вид:

$$F_2(X''_{max}, X''_{min}) = \frac{|X''_{max}| - |X''_{min}|}{|X''_{max}| + |X''_{min}|} \quad (10)$$

X''_{min} , X''_{max} — это ускорения и получают они в результате обработки измерительной информации.

При расчете смещения области равновесных значений учитываются особенности асимметричной качки. Знаки коэффициентов будут определяться следующим образом:

- при бортовой качке знаку плюс соответствует смещение области средних значений на правый борт, а знаку минус – на левый борт;
- при килевой качке знаку плюс соответствует смещение области средних значений в носовую оконечность, а знаку минус – в корму;
- при вертикальной качке знаку плюс соответствует смещение области средних значений вверх от равновесного значения, а знаку минус – вниз.

На рисунке 1 представлена блок-схема алгоритма:



Рис. 1: Блок-схема алгоритма Ю.И.Нечаева[1]

Далее перейдем к некоторому формальному описанию каждого из шагов представленного алгоритма:

1.3 Описание шагов алгоритма Нечаева

1.3.1 Ввод исходной информации

На этом этапе производится запись пяти процессов: бортовых колебаний (текущие значения крена $\theta(t)$), килевых колебаний (текущие значения дифферента $\psi(t)$) и двух давлений ($p_1(t)$, $p_2(t)$), получаемых от датчиков, расположенных на одной нормали к основной плоскости, и атмосферное

давление $p_a(t)$. Полученные данные используются для вычисления мгновенной осадки по следующему уравнению.

$$T = \frac{(p_1 - p_a)(z_2 - z_1)}{p_1 - p_2} + z_1 \quad (11)$$

В [4] описывается вариант реализации алгоритма, при котором, углы текущего крена измеряются в диапазоне ± 75 градусов, дифферента ± 25 градусов. Считывание сигналов происходит с шагом дискретизации 0,1 с. При реализации в виртуальном полигоне, о чем пойдет речь во второй главе, шаг дискретизации можно задавать динамически, и нет определенного диапазона для измерения углов крена и дифферента, так как показания считываются напрямую из модели.

1.3.2 Формирование массива измерительной информации

После реализации команды на инициализацию работы алгоритма осуществляется шаг накопления массива измерительной информации. Этот процесс выполняется в режиме реального времени непрерывно в течение всего времени работы алгоритма. Накопление информации до начала ее обработки происходит в течение 2 минут на основе предварительной обработки процессов бортовой, килевой и вертикальной качки.

Инициализация работы алгоритма происходит в следующих случаях:

1. Включение системы
2. Резкое изменение характера процесса, породившее его нестационарности, примером может служить ступенчатое изменение положение равновесия

Текущая осадка пересчитывается на основании синхронных данных от двух датчиков давления по формуле (11).

Выходные данные системы в момент времени t представляют собой вектор-столбцы, состоящие из θ_t, Ψ_t, T_t - параметров колебательного

движения при бортовой, килевой и вертикальной качке, которые и определяют результат взаимодействия судна с внешней средой. Измерения фиксируются в дискретные моменты времени $1, 2, 3, \dots, t$ и характеризуют траектории данных параметров, образующих информационный вектор:

$$J = \{\theta_t, \Psi_t, T_t, t \in [0, T]\} \quad (12)$$

При условии, что поведение системы наблюдается с момента времени 1 до момента времени t , то векторы θ_t, Ψ_t, T_t можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \theta_t &= [\theta(t), \theta(t-1), \theta(1)]^T \\ \Psi_t &= [\Psi(t), \Psi(t-1), \Psi(1)]^T \\ T_t &= [T(t), T(t-1), T(1)]^T \end{aligned} \quad (13)$$

где T является оператором транспонирования.

Помимо формирования векторов бортовой, килевой и вертикальной качки, происходит вычисление ускорений этих видов колебаний. Для этого выполняются следующие шаги:

1. Производится фильтрация упомянутых трех процессов с целью удаления высокочастотных колебаний для исключения вибрационной составляющей. Для этого в реализации алгоритма, предложенной в [4] используется окно Хана[8]. В виртуальном полигоне данные берутся из модели, поэтому сглаживание не требуется.
2. При отсутствии специальных датчиков реализуется процедура расчетного восстановления ускорений. На основании конечно-разностного представления второй производной производится вычисление векторов ускорений бортовой, килевой и вертикальной качки.

1.3.3 Последовательность формирования «скользящего окна»

Основной принцип, заложенный в структуру алгоритма, состоит в разработке некоторой универсальной модели интерпретации измерительной информации, представленной в виде коротких временных рядов. Стратегия для данного эксперимента является типичной для алгоритмов реального времени и состоит в том, чтобы найти рациональную последовательности измерений для обеспечения некоторой заданной точности получения окончательного результата после окончания работы системы. Вычислительная технология предусматривает использование так называемого «скользящего окна», в [4] предложен вариант формирования «скользящего окна» в процессе выполнения трех шагов обработки измерительной информации: на первом шаге обработка ведется в течение 2 минут, на втором – 4 минут, на третьем 6 минут, а далее формируется «скользящее окно», длительностью 6 минут..

$$J(X) \rightarrow J_1(X) \rightarrow J_2(X) \rightarrow J_3(X) \rightarrow W_1(X), \dots, W_N(X) \quad (14)$$

где $J(X)$ является вектором измерений, определяющим поток информации после инициализации алгоритма; $J_1(X), \dots, J_3(X)$ являются потоками информации на первом – третьем шагах работы алгоритма; а $W_1(X), \dots, W_N(X)$ являются потоками информации при движении «скользящего окна».

При этом необходимо отметить, что в виртуальном полигоне используется «скользящее окно» длительностью 1 минута

Для исследуемых низкочастотных процессов данная стратегия определяет учет особенностей взаимодействия судна с внешней средой в рамках гипотезы о квазистационарности, в рамкой которой предполагается, что за время обработки «скользящего окна» параметры системы и внешних возмущений не превышают допустимых изменений.

В случае повторной инициализации алгоритма процесс формирования «скользящего окна» начинается заново.

Особенности использования «скользящего окна» обсуждены в следующих разделах.

1.3.4 Идентификация режимов колебательного движения

Поскольку режимы колебаний определяются с помощью соотношения амплитуд ускорений процесса в противоположные стороны от положения равновесия, определение режимов колебаний начинается с определения значений X''_{min} , X''_{max} . Для этого необходимо выделить максимальные и минимальные амплитудные значения процессов. После определения данных значений происходит вычисления их среднего значения.

Для определения или интерпретации режимов колебания судна в алгоритме оценивается функция интерпретации F_2 .

С помощью данной функции можно сделать предварительную оценку особенностей колебательного процесса с учетом некоторых физических закономерностей режимов качки в соответствии со следующей структурой:

$$Procedure(Ident) \in \{Linear(Pr), Nonlinear(Pr)\} \quad (15)$$

линейная система – Linear(Pr):

$$F_2(X''_{max}, X''_{min}) = \frac{|X''_{max}| - |X''_{min}|}{|X''_{max}| + |X''_{min}|} \approx 0 \quad (16)$$

нелинейная система – Nonlinear(Pr):

$$F_2(X''_{max}, X''_{min}) = \frac{|X''_{max}| - |X''_{min}|}{|X''_{max}| + |X''_{min}|} \neq 0 \quad (17)$$

Из формул (16) и (17) следует, что при линейном характере колебаний обеспечивается приближенное равенство текущих значений ускорений при отклонениях от положения равновесия. В данном случае равновесное и среднее значения колебательного процесса оказываются близкими в пределах допустимой погрешности алгоритма, следовательно, работа завершается оценкой текущей погрешности обработки информации и выдачей результатов анализа на выходе системы контроля.

При выполнении условия (17) алгоритм продолжает работу в рамках нелинейной интерпретации данных динамических измерений. Именно в данной ситуации и проявляются особенности алгоритма при идентификации ситуации и определении равновесных параметров посадки.

В качестве критерия разделения этих двух режимов колебаний принимается отличие между X''_{min} и X''_{max} более чем на 20%. Данный порог выбран относительно произвольно. В [4] проведен эксперимент, из результатов которого можно сделать вывод, что примерно при таких значениях погрешность вычислений сопоставима с эффектом от нелинейности процесса качки.

1.3.5 Определение равновесных параметров посадки

В случае невыполнения соотношения (16), определяющего условие равенства ускорений, алгоритм продолжает выполнение операций по обработке измерительной информации в соответствии со стандартной блок-схемой, изображенной на рисунке 1. Операции выполняются в рамках полной структуры алгоритма, определенной формулой (7) и направлены на анализ колебательных режимов в рамках нелинейной модели преобразования информации в соответствии с физическими закономерностями исследуемых процессов:

$$\theta_0 \in W(t), \psi_0 \in W(t) \quad J = \{\theta_t, \psi_t, T_t, t \in [0, T]\} \quad (18)$$

где θ_0, ψ_0, T_0 – параметры равновесной посадки (крен, дифферент, осадка); $W(t)$ – «скользящее окно», в пределах которого вычислены значения θ_0, ψ_0, T_0 ; t – интервал времени формирования «скользящего окна».

Для определения равновесных параметров посадки в соответствие с формулой (7), (8) по подготовленным векторам наблюдений процессов определяются последовательные размахи колебаний, по которым, в рамках «скользящего окна», рассчитываются их средние значения (X_m).

После завершения данного этапа, вычисляются равновесные значения крена (θ_0) и дифферента (ψ_0), а значение T_0 , которое соответствует равновесной осадке в месте установленных датчиков, пересчитывается, исходя из знания координат установки датчиков в плоскости ватерлинии (x_0, y_0) и равновесных значений крена и дифферента.

$$T_{mid} = T_0 - x_0 \tan(\psi_0) - y_0 \tan(\theta_0) \quad (19)$$

1.3.6 Оценка погрешности результатов работы алгоритма

Заключительный этап работы алгоритма состоит в оценке погрешности установленных значений параметров равновесной посадки. В разработанном комплексе, представленном в [4] кроме инструментальных и вычислительных погрешностей большую роль играют факторы условий регистрации и работы аппаратуры. При этом в виртуальном полигоне, поскольку используется имитационное моделирование, измерения точны ровно настолько, насколько позволяет математическая модель и точность компьютера.

Адекватная работа алгоритма возможна только в условиях квазистационарного режима колебаний (априорно предполагается, что

шестиминутный временной интервал соответствует квазистационарному режиму). Поэтому в процессе работы алгоритма необходимо проверять гипотезу о стационарности процессов в рамках «скользящего окна». В случае нестационарного характера, классическим примером может являть следующий случай: на протяжении более, чем двух средних периодов колебаний все значения процесса больше или меньше среднего значения, рассчитанного по текущему «скользящему окну», производится повторная инициализация алгоритма с выдачей соответствующей информации оператору. Однако нестационарная ситуация может возникать в результате временного отказа датчика и попадания из-за этого в информационный вектор нулевых или иных недостоверных значений. В этом случае возможны несколько вариантов реагирования:

1. При выпадении небольшого количества отсчетов (примерно до 30 секунд) при условии восстановления сигнала простое игнорирование выпавшего участка, поскольку в процессе обработки сигнала напрямую не учитываются временные характеристики.
2. При выпадении значительного периода новая инициализация системы алгоритма с отображением старых значений равновесного положения с указанием об их устаревании и/или недостоверности.

1.4 Проблемы функционирования алгоритма контроля равновесной посадки

1.4.1 Проблемы ограниченности выборки

При функционировании алгоритма контроля равновесных параметров посадки судна вычислительные операции выполняются на основе данных динамических измерений. Особенности математического аппарата, применяемого при обработке этих данных, позволяют считать зарегистрированный процесс стационарным. Данный процесс предполагает как неизменность внешних воздействий, то есть постоянную интенсивность нерегулярного волнения, неизменность положения объекта по отношению к

набегающим волнам, неизменность условий регистрации, так и постоянство состояния плавающего объекта, то есть постоянство нагрузки. В действительности регистрируемый процесс стационарным не является в силу изменчивости либо внешних воздействий, таких как волнение, либо состояния судна, примером может служить затопление отсеков рассматриваемого судна. Стационарным его можно принять на небольших промежутках времени – так называемых промежутках квазистационарности. Помимо этого, для эффективной работы всей системы выдача результатов должна осуществляться за как можно меньший промежуток времени. Данное ограничение вынуждает контролировать поведение судна на основе коротких временных рядов, что является наиболее распространенной процедурой интерпретации динамики взаимодействия в режиме реального времени.

Таким образом, проблема заключается в балансе между рассмотрением короткого промежутка времени, достаточного для надежной статистической оценки вычисляемых характеристик, и временного отрезка достаточно большой длины, чтобы обеспечивать повышение точности оценки статистических характеристик, при этом так же необходимо, чтобы на данном промежутку времени регистрируемый процесс можно считать стационарным. Поэтому размер выборки зависит от двух взаимно исключаящих положений: достаточного количества информации, которое зависит от временного масштаба регистрируемого процесса, и возможности пренебрежения временными трендами, дающими возможность считать процесс на зарегистрированном интервале стационарным, которая зависит от временного масштаба процесса изменения параметров – внешних воздействий, затопления отсеков и прочего.

В [4] предлагается вариант реализации алгоритма Ю.И. Нечаева, при котором результаты прогноза выдаются на экран оператора с интервалом $\tau_0=1-2$ мин. в зависимости от особенностей колебательных режимов качки аварийного судна на морском волнении. При обработке результатов

измерений на начальных этапах прогнозирования приходится ограничиваться короткими интервалами:

$$\tau_k = k\tau_0, k = 1, \dots, N_{max} \quad (20)$$

а затем использовать «скользящее окно» N_{max} (размер окна), равное приблизительно 3 – 6 мин. При этом очевидно, что при обработке измерительной информации в условиях реального времени используются только короткие реализации исследуемых процессов. Указанная стратегия обработки измерительной информации представлена на рисунке 2.



Рис. 2: Стратегия обработки информации при контроле поведения аварийного судна на волнении

Величина N_{max} , соответствует формированию «скользящего окна», которое устанавливается в процессе предварительной обработки информации, полученной на основе данных физического и математического моделирования.

Для понимания того, каким должна быть величина «скользящего окна», можно рассмотреть следующие примеры. Для начала можно рассмотреть обыкновенный гармонический процесс с периодом около 18 с.

Среднее/равновесное значение этого процесса равно нулю. Теоретическое значение дисперсии процесса равно 0.5. На рисунке 3 представлены три процесса: исследуемый гармонический процесс, процесс изменения математического ожидания и дисперсии при накоплении статистики. При стационарности со временем эти процессы будут сходиться к своему теоретическому значению. Регулярный волновой процесс, примером которого являются строго повторяющиеся волны одинаковой интенсивности и периода, обладает свойством быстрого установления дисперсии, так как нет изменчивости амплитуд и достаточно длительного установления среднего значения из-за равноценности каждой волны. Однако даже в этом случае необходимо около 4 полных колебаний для установления дисперсии и 12-15 колебаний для установления среднего значения.

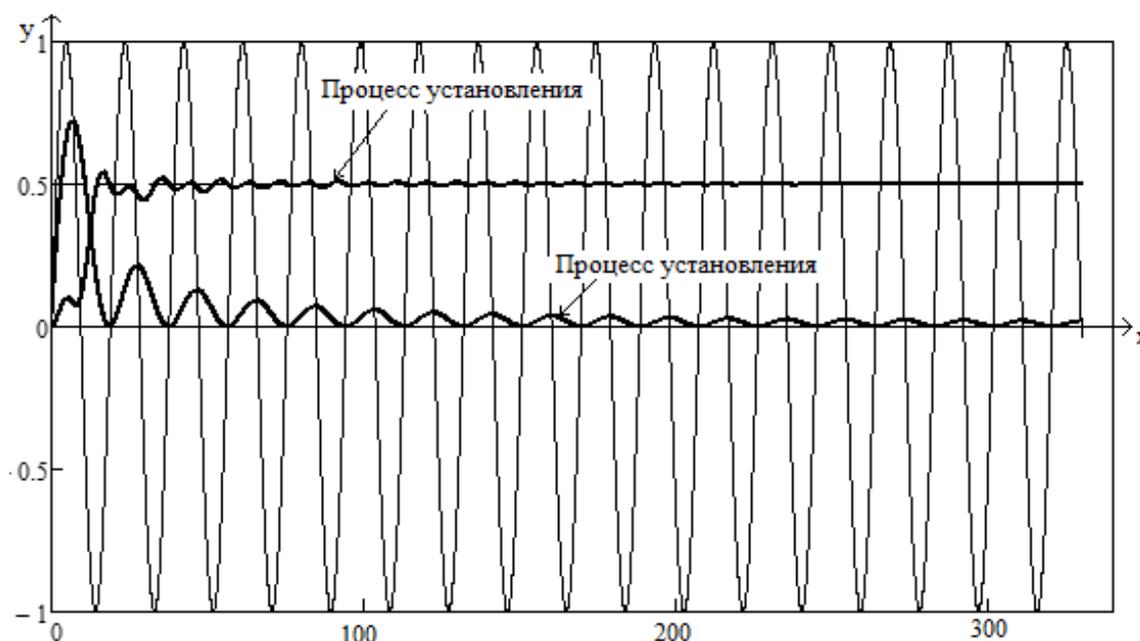


Рис. 3: Процессы установления выборочного среднего и дисперсии для гармонического сигнала.

На рисунке 4 представлен пример суперпозиции трех близких волн $\sin(x) + 0.5 \sin(0.8x) + 1.2 \sin(1.2x)$. Среднее этого процесса равно нулю, а дисперсия 0,75.

Этот процесс более близкий к морскому волнению. При этом сходимость математического ожидания осуществляется за 10-15 циклов колебаний, а дисперсии более, чем за 20 циклов.

В алгоритме вычисления равновесной посадки среднее значение соответствует математическому ожиданию, а размахи колебаний и амплитуды ускорений аналогичны по характеру вычислению дисперсии.

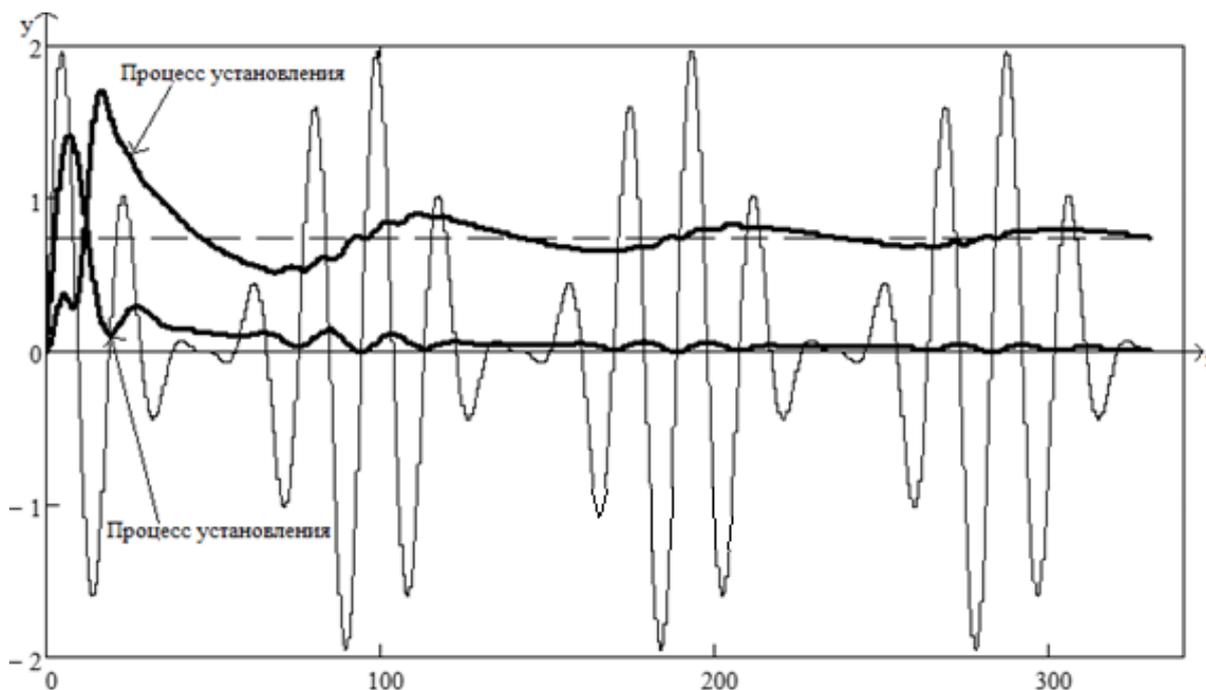


Рис. 4: Процессы установления выборочного среднего и дисперсии для примера суперпозиции трех близких волн.

Таким образом, если принять характерный период колебаний объекта от 8 до 18 секунд, то самая грубая оценка достижения достаточной точности для среднего значения составляет 1.5 – 4 минуты, а для размахов 3 – 6 минут.

Отсюда вопрос необходимости проведения дополнительных исследований о размере окна осреднения, обоснования или корректировки текущего подхода, когда начало работы алгоритма определяется двумя минутами с момента начала записи с использованием далее скользящего окна в 6 минут, является актуальным.

1.4.2 Влияние сложности математической модели, используемой для настройки алгоритма

На рисунке 5 приведен общий характер ошибок прогноза в зависимости от сложности модели. Данный эксперимент был проведен в [4]. Здесь – Err – ожидаемое среднее значение погрешности при фиксированной обучающей выборке, а $E(\overline{err})$ – среднее значение функции потерь (квадрата разности или абсолютного отклонения). Как видно из данного рисунка, погрешность Err в зависимости от сложности модели сначала убывает, а после некоторой структуры, или переусложнения модели, начинает возрастать. В тоже время погрешность $E(\overline{err})$ непрерывно убывает по мере роста сложности модели. Эту важную закономерность следует учитывать при оценке погрешности алгоритма контроля равновесных параметров посадки.

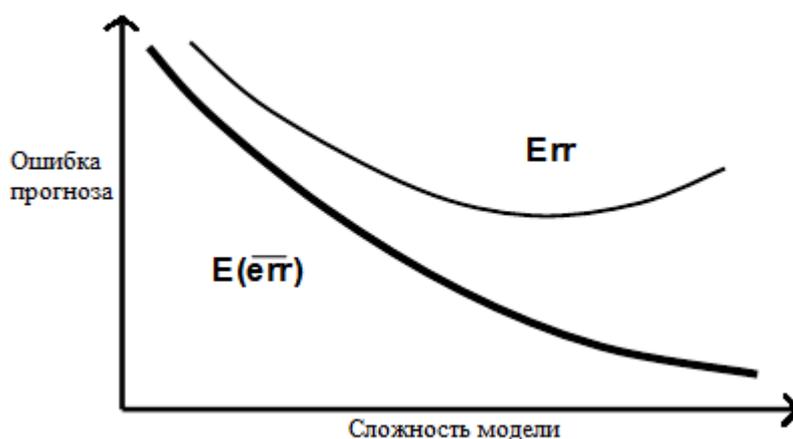


Рис. 5: Зависимость достоверности оценки прогноза от объема выборки, заданного коротким временным рядом

Приведенные соображения являются теоретическим базисом для использования упрощенных изолированных уравнений качки судна при моделировании его динамики на волнении для настройки алгоритма.

Глава 2. Практическая реализация в виртуальном полигоне

2.1 Пошаговое описание реализации алгоритма в Виртуальном полигоне

Из предыдущей главы можно сделать вывод, что задача сводится к тому, что необходимо реализовать алгоритм Нечаева в программном комплексе Виртуальном полигоне.

В данной задаче Виртуальный полигон используется как для определения коэффициентов A и B в уравнении (7) для различных моделей судов, так и напрямую для моделирования качки судна с помощью имитационного моделирования.

Для определения коэффициентов в программу загружается трехмерная модель судна и затем программа моделирует качку этого судна на разных режимах морского волнения (высота, направление волн, количество волновых систем; бортовая и килевая качка, и их комбинация).

Для каждого режима по полученным данным вычисляются все величины из ур. (7) и методом наименьших квадратов [2] вычисляются значения коэффициентов A и B . В данном случае вместо показаний датчиков используются параметры, полученные из программы напрямую, а значит, они настолько точны, насколько позволяет математическая модель и точность компьютера.

2.2 Используемые трехмерные модели судов

Для получения данных были использованы модели трех судов: Аврора, Диоген, МИДВ (см. рис. 2). Модели судов были взяты из файлов в формате BSP из базы данных Vessel Санкт-Петербургского государственного университета[6]. Данный файл поддерживается с помощью пакета Hull[5], с помощью которого можно редактировать корпус корабля и вычислять

некоторые гидростатические характеристики. Параметры судов приведены в табл. 1.

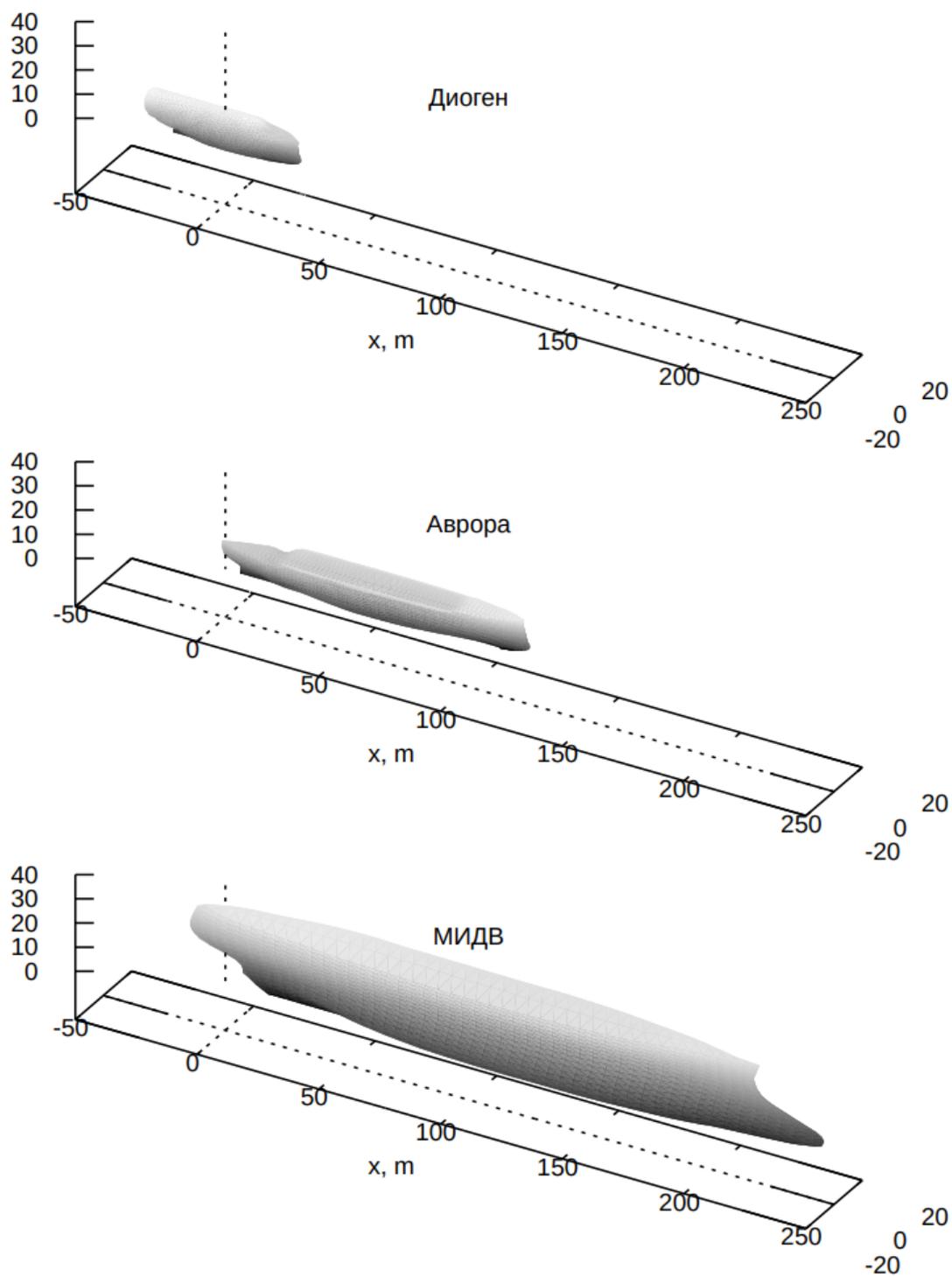


Рис. 6: Трехмерные модели корпусов кораблей Диогена, Авроры и МИДВ

	Диоген	Аврора	МИДВ
Длина, м	60	126.5	260
Ширина, м	15	16.8	32
Глубина, м	15	14.5	31
Кол-во панелей	4346	6335	9252

Таблица 1: Параметры корпуса судов, используемые при тестировании.

Для моделирования различных аварийных ситуаций для данных моделей судов, были так же получены модели, центр тяжести которых был сдвинут на определенный вектор, таким образом были получены случаи с несимметричными диаграммами статической остойчивости, данные диаграммы представлены на рисунках 7а-13б.

Диаграммы статической остойчивости[12], полученные в Виртуальном полигоне и используемые в дальнейшей работе алгоритма:

А1. Аврора в крейсерском положении:

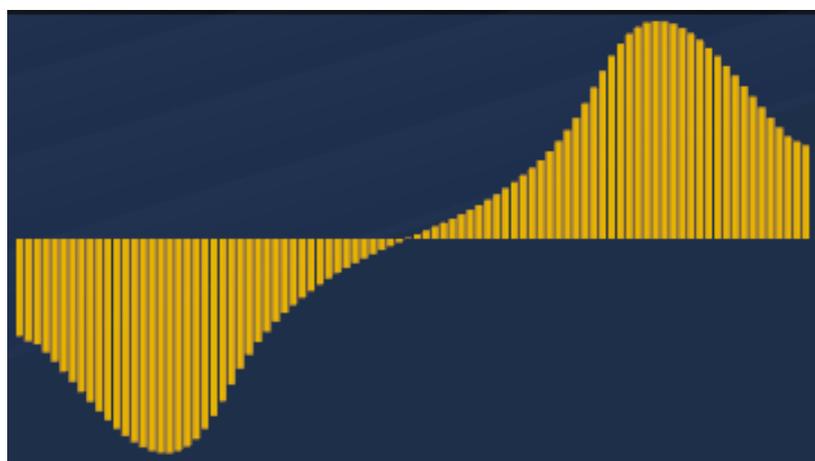


Рисунок 7а: Диаграмма поперечной статической остойчивости для Авроры в крейсерском положении

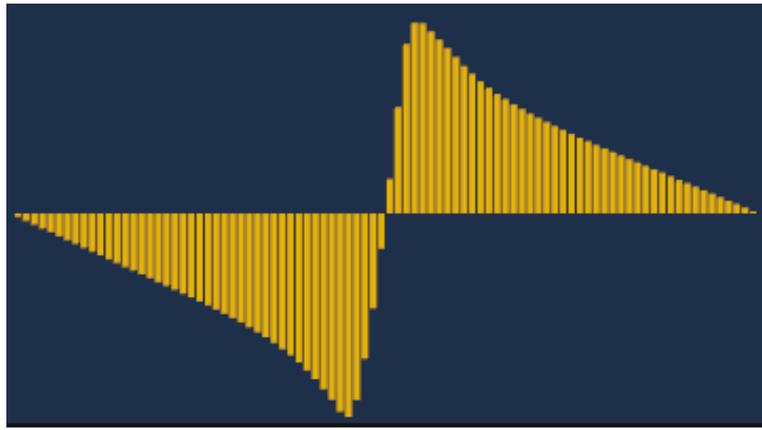


Рисунок 7б: Диаграмма продольной статической остойчивости для Авроры в крейсерском положении

А2. Аврора при сдвиге центра тяжести на вектор $(0.0, +0.5, 0.0)$:

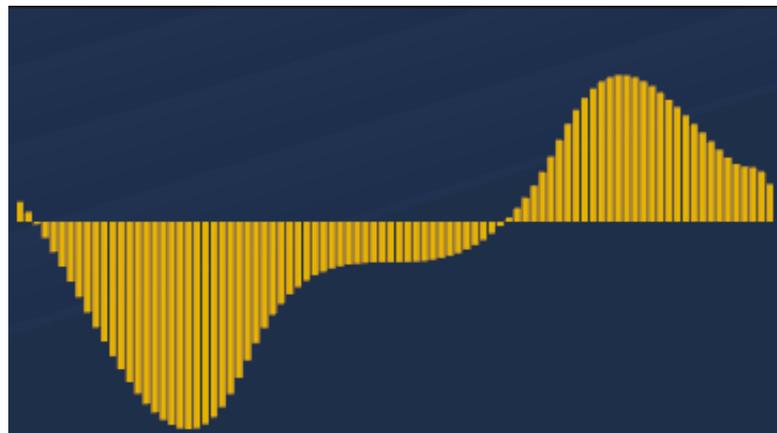


Рисунок 8а: Диаграмма поперечной статической остойчивости для Авроры при сдвиге центра тяжести на вектор $(0,+0.5,0.0)$:

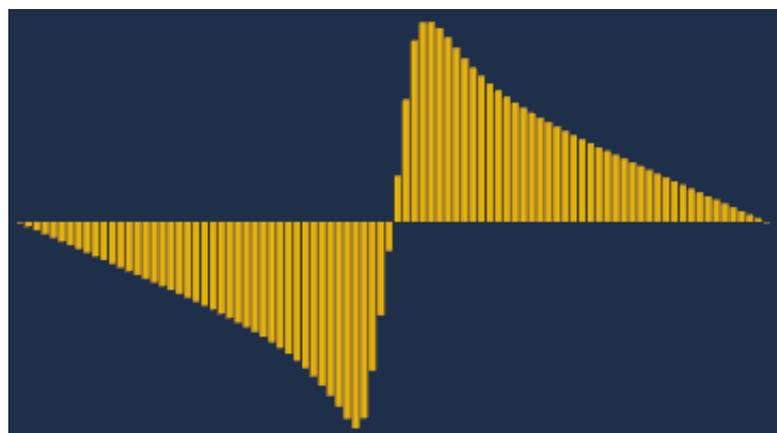


Рисунок 8б: Диаграмма продольной статической остойчивости для при сдвиге центра тяжести на вектор $(0,-0.5,0.0)$:

А3. Аврора при применении к центру тяжести вектора (25.0, 0.0, 0.0):

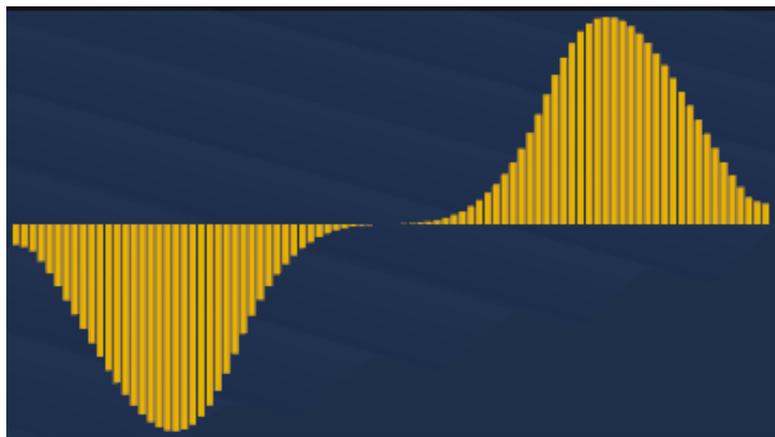


Рисунок 9а: Диаграмма поперечной статической остойчивости для Авроры при сдвиге центра тяжести на вектор (-25.0, 0.0, 0.0):

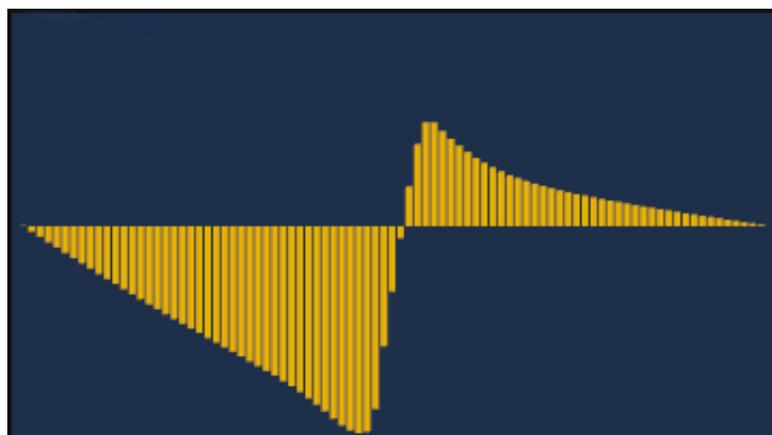


Рисунок 9б: Диаграмма продольной статической остойчивости для Авроры при сдвиге центра тяжести на вектор (-25.0, 0.0, 0.0):

Д1. Диоген в крейсерском положении:

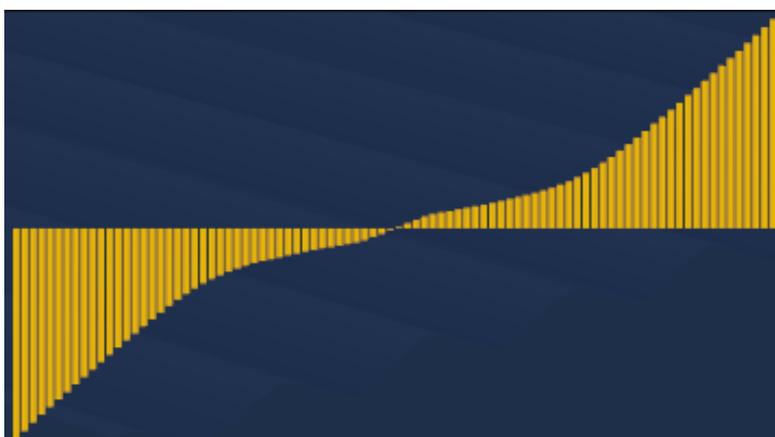


Рисунок 10а: Диаграмма поперечной статической остойчивости для Диогена
в крейсерском положении

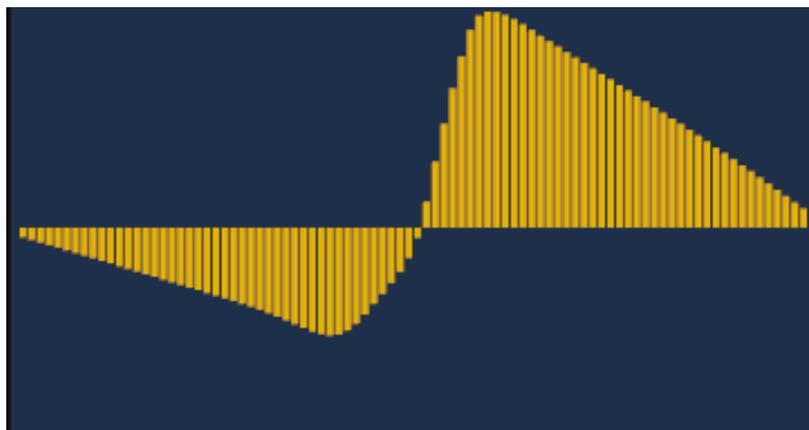


Рисунок 10б: Диаграмма продольной статической остойчивости для Диогена
в крейсерском положении

Д2. Диоген при сдвиге центра тяжести на вектор $(0.0, -0.30, 1.50)$:

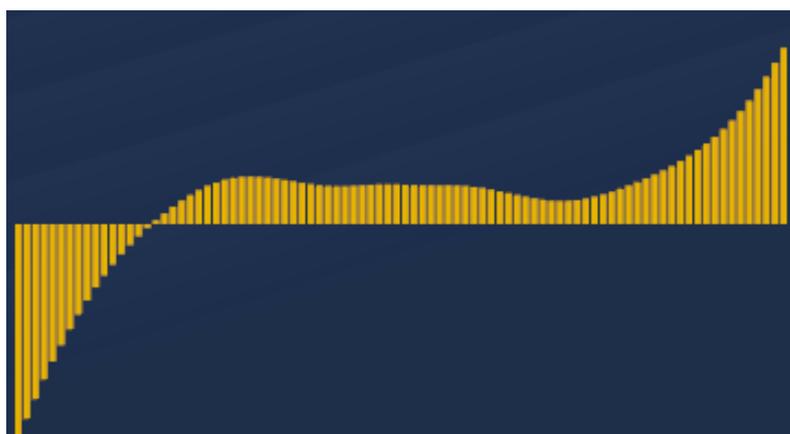


Рисунок 11а: Диаграмма поперечной статической остойчивости для Диогена
при сдвиге центра тяжести на вектор $(0.0, -0.30, 1.50)$

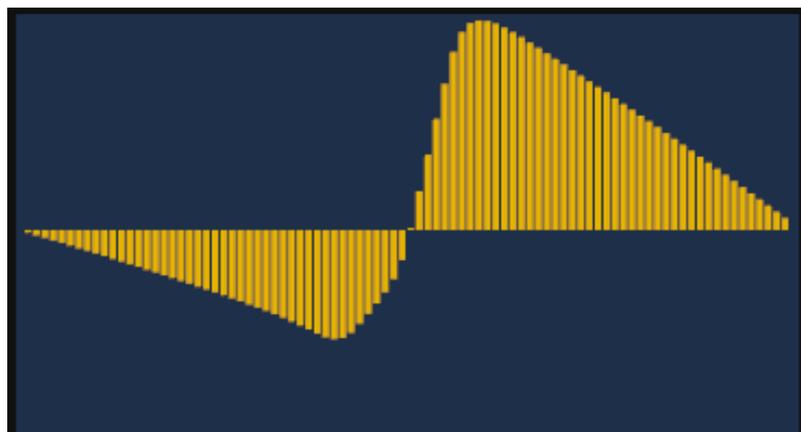


Рисунок 11б: Диаграмма продольной статической остойчивости для Диогена при сдвиге центра тяжести на вектор $(0.0, -0.30, 1.50)$

М1. МИДВ в крейсерском положении:



Рисунок 12а: Диаграмма поперечной статической остойчивости для МИДВ в крейсерском положении



Рисунок 12б: Диаграмма продольной статической остойчивости для МИДВ в крейсерском положении

М2. МИДВ при сдвиге центра тяжести на вектор (0.0, -4.0, 1.0):

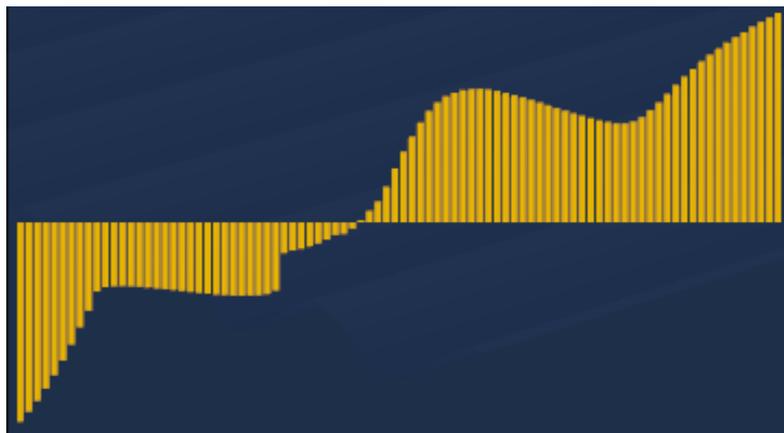


Рисунок 13а: Диаграмма поперечной статической устойчивости для МИДВ при сдвиге центра тяжести на вектор (0.0, -4.0, 1.0)

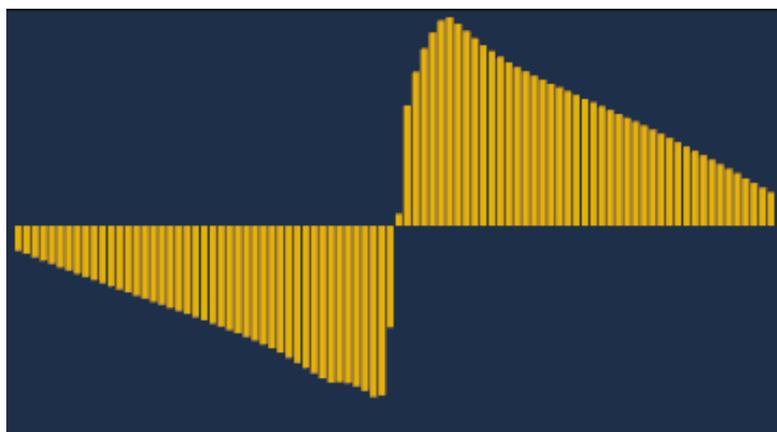


Рисунок 13б: Диаграмма продольной статической устойчивости для МИДВ при сдвиге центра тяжести на вектор (0.0, -4.0, 1.0)

Как можно заметить на представленных выше диаграммах, для Авроры помимо крейсерского положения были получены два случая:

1. Несимметричная диаграмм поперечной статической устойчивости при симметричной продольной
2. Несимметричная диаграмм продольной статической устойчивости при симметричной поперечной

Для Диогена и МИДВ были помимо крейсерского положения были рассмотрены случаи одновременной несимметричности диаграмм продольной и поперечной статической остойчивости.

2.3 Используемые модели морского волнения

В программном комплексе Виртуальный полигон возможно проводить симуляции с различными параметрами.

Одним из таких параметров является вид модели для моделирования волн.

Помимо базового подхода, такого как линейные модели волн, использовались так же и нелинейные модели, обычно данное модели используется для моделирования реальных волн с конечной амплитудой. В реальном мире волны отличаются от синусоиды, у них более крутые гребни и более пологие впадины. Такие волны получаются в виде трохойды и их уравнения имеют параметрическую форму [9][7], однако приближенно могут быть представлены в виде:

$$z_w(x, t) = r * (\sin(kx - \omega t) + \frac{\pi r}{\lambda} * \cos(2(k * x - \omega t))). \quad (21)$$

Так же существуют и другие модели, такие как модель Стокса [10], в которой наблюдается зависимость скорости от крутизны волны и малое перемещение частиц жидкости вблизи поверхности по направлению бега волн. Схематично данные модели представлены на рисунках 14 и 15:

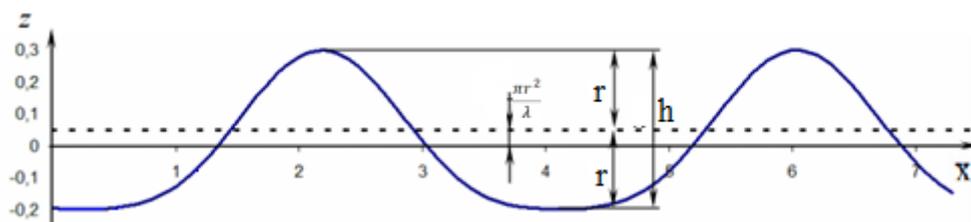


Рис. 14: Схематичное изображение трохойдальных волн (волн Герстнера)

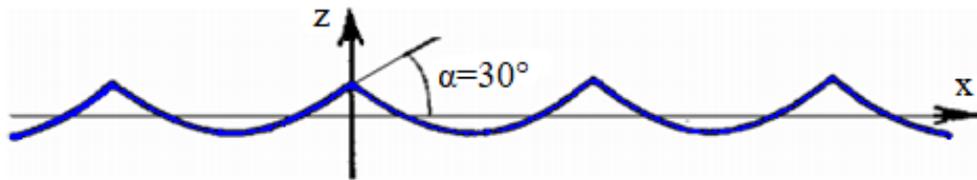


Рис. 15:Схематичное изображение волн Стокса

При этом также необходимо отметить, что для волн Стокса и распространяющейся косинусной волны в Виртуальном полигоне используется один и тот же солвер внешних возмущений, а для модели волн Герстнера используется отдельный.

2.4 Верификация Виртуального полигона

В рамках работы над проектом Виртуального полигона, было создана масштабная модель крейсера «Аврора», напечатанной на 3D принтере.

Так же были проведены испытания в парке Сергиевка, где показания датчиков записывались с телефона под управлением операционной системой Android, находящимся внутри масштабной модели крейсера «Аврора».

В виртуальном полигоне были проведены схематично те же испытания, что и с моделью.

Далее по полученным данным так же были построены графики программой Gnuplot[17]. После этого было решено сравнить показания, полученные с помощью масштабной модели судна и данных из виртуального полигона.

Для этого были выбраны данные, которые мы получается сразу же с сенсоров телефона[18] на базе операционной системы Android, дабы избежать погрешность после интегрирования или дифференцирования. Таким образом сравнение проводилось по линейному ускорению и угловой скорости. После вывода показаний на один график было установлено, что данные показывали сходство (рис. 16).

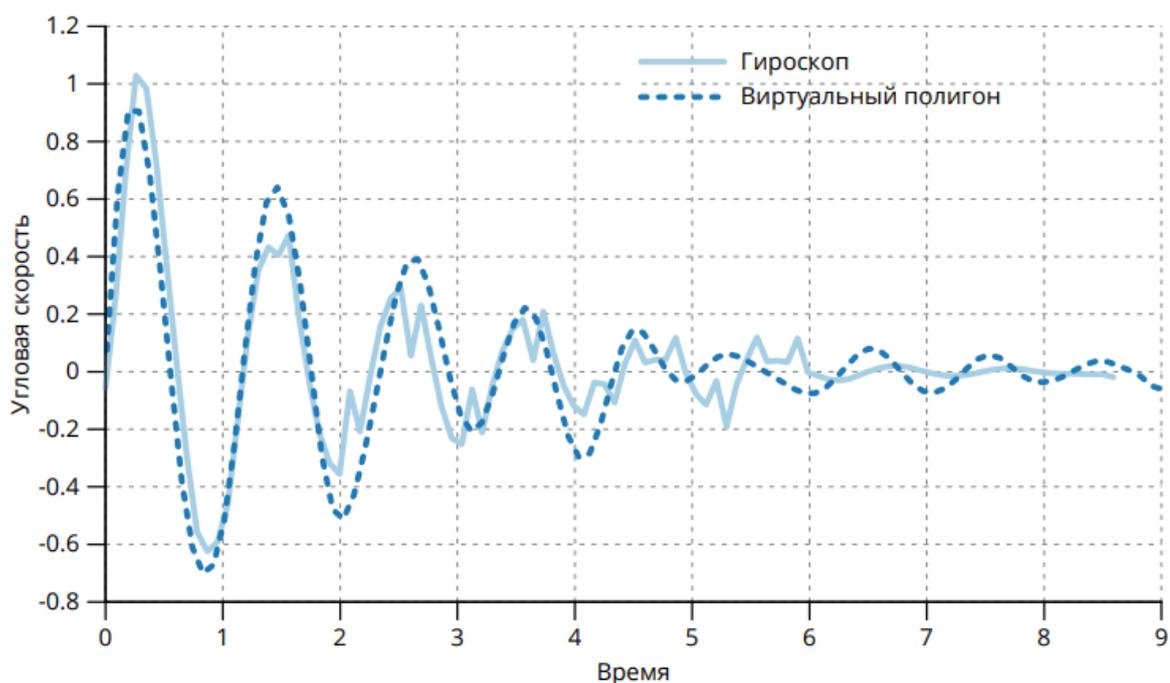


Рис. 16: Графики угловой скорости (бортовая качка), полученные в ходе испытаний с масштабной моделью судна и в Виртуальном полигоне.

Значения скорости нормализованы, масштаб по времени 1:3.

2.5 Генерация базы знаний

Для дальнейшей работы алгоритма необходимо было собрать данные для базы знаний.

Генерация производилась с различными используемыми в Виртуальном полигоне подходами, перечисленными в разделе 2.3

Данные были получены с помощью скрипта, использующего программный интерфейс Виртуального полигона на языке Guile[15]. Этот интерфейс позволяет последовательно запускать симуляции в Виртуальном полигоне с нужными параметрами симуляции и на необходимое время симуляции.

Каждая симуляция запускалась на две минуты с различными параметрами для каждой из трех представленных на рисунке 7 трехмерных моделей судов.

Для каждой симуляции изменялись следующие параметры:

- Амплитуда волн задавалась в 3 позициях 0,5 м, 1 м и 1,5 метра .
- Направление волн в диапазоне от 0 до 2π с шагом $0,5\pi$.

Так же для была для каждого из судов, представленных в разделе 2.3, была проведена симуляция при ровной волновой поверхности для получения некоторого представления о положении равновесия.

Все симуляции проходили ровно 2 минуты, с записью показания датчиков из Виртуального полигона каждые 0,1 сек

Таким образом были получены 12 различных синхронных записей параметров качки судна. Для каждой симуляции каждые 0,1 сек. производилась запись следующих параметров в файл.

- Текущий момент времени внутри Виртуального полигона.
- Декартовы координаты судна. 70
- Углы поворота судна вокруг осей x , y , z .
- Объем подводной части судна.
- Объем надводной части судна.
- Скорость по осям x , y , z .
- Угловая скорость по осям x , y , z .
- Ускорение по осям x , y , z .
- Угловое ускорение по осям x , y , z .
- Период волны.
- Длина волны по осям x , y .
- Частота волны.
- Волновое число по осям x , y .

- Высота волны, определенная по оси t.
- Высота волны, определенная по осям x, y.
- Подъем взволнованной поверхности.
- Угловой момент по осям x, y, z.
- Период волны, полученный из солвера внешних возмущений.
- Длина волны по осям x, y, полученная из солвера внешних возмущений.
- Частота волны, полученная из солвера внешних возмущений.
- Волновое число по осям x, y, полученное из солвера внешних возмущений.
- Высота волны, полученная из солвера внешних возмущений.
- Углы поворота судна вокруг осей x, y, полученные из солвера внешних возмущений.

Поскольку каждая симуляция длится ровно две минуты, в каждом выходном файле 1200 экземпляров данных, представленных выше. В названии выходного файла было отражено, какие параметры были использованы при моделировании, что необходимо для их дальнейшего анализа.

2.6 Вычисление коэффициентов A и B в формуле Нечаева

Перепишем формулу (7) в следующем виде:

$$f(X) = A\varphi_1(X) + B\varphi_2(X) \quad (22)$$

Здесь, $f(X) = X_0 - \bar{X}$, $\varphi_1(X) = \bar{X}X_m \frac{|X''_{max}| - |X''_{min}|}{|X''_{max}| + |X''_{min}|}$, $\varphi_2(X) = \bar{X}X_m \frac{|X''_{max}| - |X''_{min}|}{|X''_{max}| + |X''_{min}|}$

В данном случае X характеризует состояние системы “судно + внешняя среда”.

Используя формулу (22), составляем систему из n уравнений, в нашем случае их 12, выбрав различные параметры, которые были применены при моделировании:

$$f(X_k) = A\varphi_1(X_k) + B\varphi_2(X_k), k = \overline{1,12} \quad (23)$$

Получаем переопределенную систему, для которой не существует "классического" решения.

Воспользуемся методом наименьших квадратов (МНК):

Запишем *невязку*: $r_k = A\varphi_1(X_k) + B\varphi_2(X_k) - f(X_k)$.

Далее введем функцию, равную сумме квадратов невязок:

$$\Phi(A, B) = \sum_{k=1}^{64} r_k^2 = \sum_{k=1}^{64} (A\varphi_1(X_k) + B\varphi_2(X_k) - f(X_k))^2 \quad (24)$$

Необходимо решить задачу минимизации [11] (24), то есть необходимо найти такие A и B , при которых $grad \Phi(A, B) = \bar{0}$.

Выразим частные производные:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial A} = 2 \sum_{k=1}^{64} \varphi_1(X_k) [A\varphi_1(X_k) + B\varphi_2(X_k) - f(X_k)] = 0 \quad (25)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial B} = 2 \sum_{k=1}^{64} \varphi_2(X_k) [A\varphi_1(X_k) + B\varphi_2(X_k) - f(X_k)] = 0 \quad (26)$$

Получаем следующую систему:

$$\begin{cases} A \sum_{k=1}^{64} \varphi_1^2(X_k) + B \sum_{k=1}^{64} \varphi_1(X_k)\varphi_2(X_k) = \sum_{k=1}^{64} \varphi_1(X_k)f(X_k) \\ A \sum_{k=1}^{64} \varphi_2(X_k)\varphi_1(X_k) + B \sum_{k=1}^{64} \varphi_2^2(X_k) = \sum_{k=1}^{64} \varphi_2(X_k)f(X_k) \end{cases} \quad (27)$$

Преобразуем полученную систему:

$$\begin{cases} A(\varphi_1\varphi_1) + B(\varphi_1\varphi_2) = (\varphi_1f) \\ A(\varphi_1\varphi_2) + B(\varphi_2\varphi_2) = (\varphi_2f) \end{cases} \quad (28)$$

Где $(g h) = \sum_{k=1}^{64} g(X_k)h(X_k)$.

Матрица системы (28) называется матрицей Грама[14].

Из данной системы можно выразить искомые А и В с помощью итерационного метода Гаусса[16].

Так же необходимо помнить, что угол, угловую скорость и угловое ускорение измеряют по трем осям. Данная формула записана только для одной оси, поэтому коэффициенты необходимо вычислить для каждой оси отдельно.

Глава 3. Полученные результаты и выводы

3.1 Результаты расчета коэффициентов в формуле

Ю.И.Нечаева

В предыдущем разделе мы пришли к выводу, что необходимо коэффициенты вычислить для каждой оси отдельно, в таблицах 1-9 представлены полученные коэффициенты.

Таблица 2: Коэффициенты в формуле Ю.И.Нечаева для модели Авроры

Аврора и линейные волны		
	А	В
Бортовая качка	0,046	0,02
Килевая качка	0,042	0,025
Вертикальная качка	0,040	0
Аврора и волны Стокса		
	А	В
Бортовая качка	0,041	0,017
Килевая качка	0,049	0,027
Вертикальная качка	0,035	0
Аврора и волны Герстнера		
	А	В
Бортовая качка	0,044	0,019
Килевая качка	0,046	0,028
Вертикальная качка	0,042	0

Таблица 3: Коэффициенты в формуле Ю.И.Нечаева для модели Диогена

Диоген и линейные волны		
	А	В
Бортовая качка	-0,035	0
Килевая качка	-0,03	-0,03
Вертикальная качка	-0,038	0
Диоген и волны Стокса		

	А	В
Бортовая качка	-0,04	0
Килевая качка	-0,035	-0,033
Вертикальная качка	-0,031	0
Диоген и волны Герстнера		
	А	В
Бортовая качка	-0,037	0
Килевая качка	-0,032	-0,027
Вертикальная качка	-0,036	0

Таблица 4: Коэффициенты в формуле Ю.И.Нечаева для модели МИДВ

МИДВ и линейные волны		
	А	В
Бортовая качка	0,060	0,02
Килевая качка	0,053	0
Вертикальная качка	0,052	0,01
МИДВ и волны Стокса		
	А	В
Бортовая качка	0,058	0,03
Килевая качка	0,056	0
Вертикальная качка	0,050	0,015
МИДВ и волны Герстнера		
	А	В
Бортовая качка	0,064	0,02
Килевая качка	0,054	0
Вертикальная качка	0,053	0,02

3.2 Сравнение полученных результатов для аварийных ситуаций, представленных в разделе 2.2

Продублируем формулу 7:

$$X_0 = \bar{X} \left[1 + (AX_m + BX_m^2) \frac{|X''_{max}| - |X''_{min}|}{|X''_{max}| + |X''_{min}|} \right] \quad (29)$$

В таблицах 5-7 представленные данные полученные из данной формулы, при этом X_0 - это расчетное значение равновесного параметра, \bar{X} – это среднее значение, а $\bar{X}(AX_m + BX_m^2) \frac{|X''_{max}| - |X''_{min}|}{|X''_{max}| + |X''_{min}|}$ - это поправка по Ю.И.Нечаеву.

3.2.1 Бортовая качка

Для удобства вывода данные были переведены в градусы.

Рассматривались симуляция с амплитудой волны один метр и направлением 0, то есть волны двигались в направлении от правого борта судна к левому.

Таблица 5: Расчет случаев бортовой качки

Аврора в случае А2 и линейные волны		
Среднее значение	Поправка по Ю.И.Нечаеву	Расчетное значение равновесного параметра
4,850	0,422	5,272
Аврора в случае А2 и волны Стокса		
Среднее значение	Поправка по Ю.И.Нечаеву	Расчетное значение равновесного параметра
4,740	0.626	5,366
Аврора в случае А2 и волны Герстнера		
Среднее значение	Поправка по Ю.И.Нечаеву	Расчетное значение равновесного параметра
4,985	0,404	5,389
МИДВ в случае М2 и линейные волны		
Среднее значение	Поправка по Ю.И.Нечаеву	Расчетное значение равновесного параметра
-3.985	0.349	-3.636
МИДВ в случае М2 и волны Стокса		
Среднее значение	Поправка по Ю.И.Нечаеву	Расчетное значение равновесного параметра
-3.878	0.309	-3,569
МИДВ в случае М2 и волны Герстнера		

Среднее значение	Поправка по Ю.И.Нечаеву	Расчетное значение равновесного параметра
-3.890	0.348	-3,542

3.2.2 Килевая качка

Для удобства вывода данные были переведены в градусы.

Рассматривались симуляция с амплитудой волны один метр и направлением $1,5 \pi$, то есть волны двигались в направлении от кормы к носу судна.

Таблица 6: Расчет случаев килевой качки

Диоген в случае Д1 и линейные волны		
Среднее значение	Поправка по Ю.И.Нечаеву	Расчетное значение равновесного параметра
0.846	-0,281	0,565
Диоген в случае Д1 и волны Стокса		
Среднее значение	Поправка по Ю.И.Нечаеву	Расчетное значение равновесного параметра
0,914	-0,429	0,483
Диоген в случае Д1 и волны Герстнера		
Среднее значение	Поправка по Ю.И.Нечаеву	Расчетное значение равновесного параметра
0,780	-0,315	0,465
Аврора в случае А3 и линейные волны		
Среднее значение	Поправка по Ю.И.Нечаеву	Расчетное значение равновесного параметра
-3,985	0.265	-3.720
Аврора в случае А3 и волны Стокса		
Среднее значение	Поправка по Ю.И.Нечаеву	Расчетное значение равновесного параметра
-4,103	0,463	-3,640
Аврора в случае А3 и волны Герстнера		
Среднее значение	Поправка по Ю.И.Нечаеву	Расчетное значение равновесного параметра

-3,913	0,347	-3,566
--------	-------	--------

3.2.3 Вертикальная качка

Для удобства вывода данные были переведены в градусы.

Рассматривались симуляция с амплитудой волны один метр и направлением 0, то есть волны двигались в направлении от правого борта судна к левому.

Таблица 7: Расчет случаев вертикальной качки

МИДВ в случае М1 и линейные волны		
Среднее значение	Поправка по Ю.И.Нечаеву	Расчетное значение равновесного параметра
0.125	0.085	0.210
МИДВ в случае М1 и волны Стокса		
Среднее значение	Поправка по Ю.И.Нечаеву	Расчетное значение равновесного параметра
0.137	0.113	0.250
МИДВ в случае М1 и волны Герстнера		
Среднее значение	Поправка по Ю.И.Нечаеву	Расчетное значение равновесного параметра
0.126	0.146	0.272
Диоген в случае Д2 и линейные волны		
Среднее значение	Поправка по Ю.И.Нечаеву	Расчетное значение равновесного параметра
3.285	-0.295	2.990
Диоген в случае Д2 и волны Стокса		
Среднее значение	Поправка по Ю.И.Нечаеву	Расчетное значение равновесного параметра
3.066	-0.230	2.834
Диоген в случае Д2 и волны Герстнера		
Среднее значение	Поправка по Ю.И.Нечаеву	Расчетное значение равновесного параметра
3.054	-0.276	2.778

3.3 Выводы

Помимо вычислительных результатов так же необходимо учитывать время, за которое происходит один этап симуляции, поскольку задаваемое время симуляции 2 минуты или 120 секунд, это время симуляции, а не то время, которое будет затрачено на генерацию самой симуляции.

Таблица 13: Сравнение затраченного времени на генерацию симуляций

	Линейные волны	Волны Стокса	Волны Герстнера
Аврора	81 сек (1 минута 21 сек)	84 сек (1 минута 24 сек)	181 сек (3 минуты 1 сек)
Диоген	45 сек (0 минута 48 сек)	48 сек (0 минута 48 сек)	148 сек (2 минуты 28 сек)
МИДВ	65 сек (1 минута 5 сек)	66 сек (1 минута 6 сек)	159 сек (2 минуты 39 сек)

Как было отмечено в предыдущей главе линейные волны и волны Стокса используют один и тот же солвер внешних возмущений, именно поэтому времена, затраченные на генерацию данных симуляций, насколько близки.

Учитывая, численные результаты, полученные в двух предыдущих подразделах, можно сделать вывод, что усложнение модели волн, используемой для получения коэффициентов в алгоритме Ю.И. Нечаева незначительно изменяет полученное значение равновесного параметра, однако при этом достаточно значительно увеличивается время, затраченное на генерацию одной симуляции, если при использовании линейные волн или волн Стокса, генерация двух минут симуляции происходит быстрее чем за две минуты реального времени, то при использовании волн Герстнера, время симуляции приближается к трем минутам реального времени, что уже превышает время симуляции.

При этом при использовании модели волн Стокса получается добиться более приближенных результатов к модели Герстнера, чем при использовании модели линейных волн, не затрачивая при этом дополнительное время.

Таким образом данный режим использования можно признать оптимальным.

Заключение

Таким образом был в рамках данной выпускной квалификационной работы был исследован вопрос оценки параметров равновесной посадки судна с помощью имитационного моделирования. Далее в рамках данной работы был рассмотрен алгоритм, предложенный Ю.И. Нечаевы, он позволяет искать приближенные пути оценки равновесного значения.

Затем был рассмотрен вопрос практической реализации алгоритма Ю.И. Нечаева в программном комплексе Виртуальный полигон.

Наконец был проведен анализ полученных результатов и сделан вывод об режиме оптимального использования.

С точки зрения улучшения в будущем, можно отметить исследование экспериментов с большим количеством судов, а также с более экстремальными режимами морского волнения.

Используемая литература

1. Нечаев Юрий Иванович. Способ контроля непотопляемости судна. — 2014.
2. Математика на пальцах: методы наименьших квадратов [Электронный ресурс]: URL: <https://habr.com/ru/post/277275/> (дата обращения 24.12.2020)
3. Кренования Судна – Морской технологический справочник [Электронныйресурс]URL: [https:// maritimeforum.net /data/spravochnik/krenovanie.html](https://maritimeforum.net/data/spravochnik/krenovanie.html) (дата обращения 10.06.2021)
4. Нечаев Ю.И., Анищенко О.П., Кирюхин И.А. Интеллектуальная система контроля непотопляемости судна // Системы искусственного интеллекта в интеллектуальных технологиях XXI века. - Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2011, с.83-98..
5. Khramushin Vasily. Analytic ship hull shape construction, wave resistance calculations, theoretical blueprint feature curve calculations, and ship stability diagrams (in Russian). — 2010. — Access mode: http://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2010615849&TypeFile=html.
6. Богданов А. В., Храмушин В. Н. «Vessel» — Цифровые теоретические чертежи для проектного анализа гидростатических характеристик, остойчивости и ходкости корабля («Проектные чертежи для анализа гидростатических характеристик, остойчивости и ходкости корабля»). — 2015. — сентябрь.
7. Surfaces for computer-aided design of space forms : Rep. / Massachusetts Institute of Technology ; Executor: Steven A Coons : 1967.
8. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990

9. Gerstner, F.J. (1802), Theorie der Wellen, Abhandlung der Königlichen Böhmischen Gesellschaft der Wissenschaften, Prague. Reprinted in: Annalen der Physik 32(8), pp. 412–445, 1809.
10. Stokes, G.G. (1847), On the theory of oscillatory waves, Transactions of the Cambridge Philosophical Society, 8: 441–455.
11. Постановка задачи оптимизации и численные методы ее решения [Электронный ресурс]: URL: <https://hub.exponenta.ru/post/postanovka-zadachi-optimizatsii-i-chislennye-metody-ee-resheniya356> (дата обращения 19.04.2021)
12. Статическая остойчивость морских судов [Электронный ресурс]: URL: <http://sea-library.ru/ostojchivost-sudna/446-diagramma-staticheskoy-ostojchivosti-sudna.html> (дата обращения 20.03.2021)
13. Понятие о стационарном случайном процессе [Электронный ресурс]: URL: <http://mathhelpplanet.com/static.php?p=matritsa-i-opredelitel-grama> (дата обращения 23.04.2021)
14. Матрица и определитель Грама [Электронный ресурс]: URL: https://scask.ru/a_book_tp.php?id=95 (дата обращения 20.02.2021)
15. GNU's programming and extension language [Электронный ресурс]: URL: <https://www.gnu.org/software/guile/> (дата обращения 23.04.2021)
16. Решение переопределенной СЛАУ [Электронный ресурс]: URL: http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Решение_переопределённой_СЛАУ/ (дата обращения 22.03.2021)
17. Gnuplot homepage [Электронный ресурс]: URL: <http://www.gnuplot.info/> (дата обращения 20.04.2021)
18. Android Sensors Overview [Электронный ресурс]: URL: https://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors_overview (дата обращения 10.02.2021)