

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Кафедра механики и процессов управления

Идентификация параметров динамической модели качки судна

Выполнил студент гр. 43602/2
Научный руководитель

А. А. Иоселевский
А. А. Суханов

2014

Актуальность задачи

Проблемы, вызванные качкой

- Опасность аварий
- Невозможность использования некоторого оборудования
- Плохая обитаемость

Задача стабилизации

- Обеспечение комфортности
- Увеличение периода работы пассажирских судов
- Обеспечение стабилизации судна как носителя

Проблема обеспечения стабилизации

- Необходимость определения параметров математической модели

Цель работы

Цель работы

- Математическое моделирование движения судна на волнении
- Выбор методики идентификации параметров динамической модели бортовой качки

Решаемые задачи

- Создание математической модели бортовой качки
- Создание математической модели морского волнения
- Разработка необходимого для моделирования ПО
- Проведение сравнительного анализа методов идентификации
- Выбор **оптимального** метода идентификации

Объект исследования

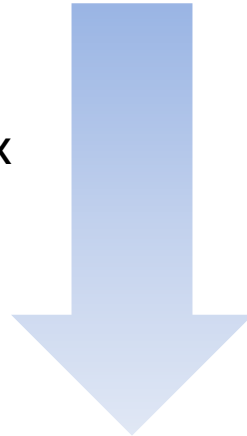


Математическая модель бортовой качки

Уравнение бортовой качки

$$(J_{xx} + \lambda_{44})\ddot{\theta}(t) + \mu_{44}\dot{\theta}(t) + Dh_0\theta(t) = 2C_{yR}\frac{\rho V^2}{2}S_R l_R u(t) + Dh_0\kappa\alpha(t)$$

- $\theta(t)$ – угол крена
- $u(t)$ – угол поворота бортовых рулей
- $\alpha(t)$ – угол волнового склона



$$\ddot{\theta}(t) + \mathbf{a_1}\dot{\theta}(t) + \mathbf{a_2}\theta(t) = \mathbf{b_2}u(t) + b_1\alpha(t)$$

Математическая модель волнения

Уравнение ординаты волновой поверхности

$$\eta(x, z, t) = \sum_{i=1}^N A_i \sin(k_i(x \cos(\chi_0 + \chi_i) + z \sin(\chi_0 + \chi_i)) - \omega_i t + \varphi_i)$$

Рассматривается
бортовая волна

- $z = 0$
- $\chi_0 = \pi/2$
- $\chi_i = 0, \quad i = 1 \dots N$

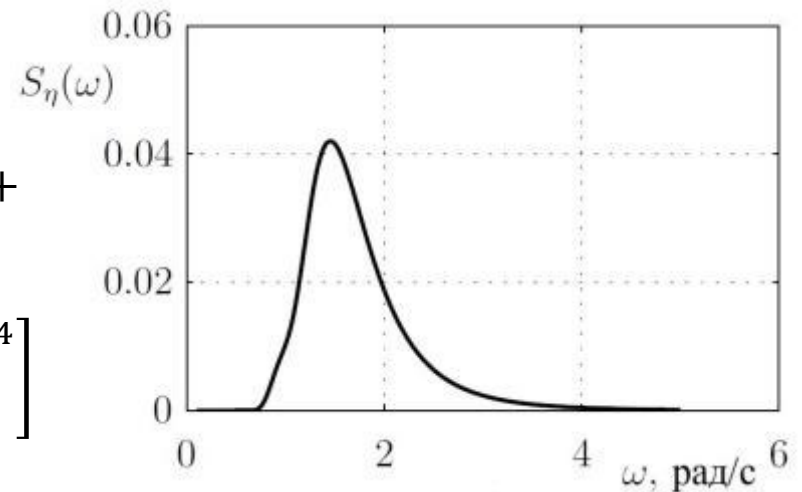


$$\operatorname{tg} \alpha(t) = -\frac{\partial \eta}{\partial z} = -\sum_{i=1}^N A_i k_i \cos(-\omega_i t + \varphi_i)$$

Спектр морского волнения

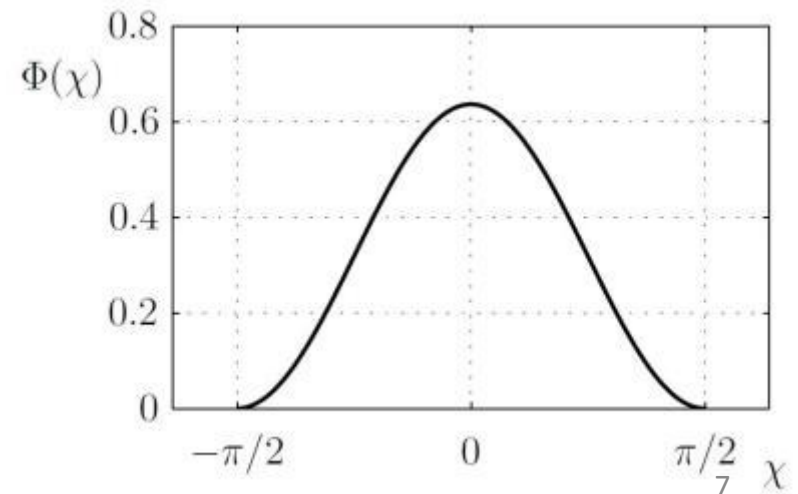
- Спектр Вознесенского-Нецветаева

$$S_{\eta}(\omega) = 9.43 \frac{m_{01}}{\bar{\omega}_1} \left(\frac{\omega_{m1}}{\omega} \right)^6 \exp \left[-1.5 \left(\frac{\omega_{m1}}{\omega} \right)^4 \right] + \\ + 17.29 \frac{m_{02}}{\bar{\omega}_2} \left(\frac{\omega_{m2}}{\omega} \right)^8 \exp \left[-2 \left(\frac{\omega_{m2}}{\omega} \right)^4 \right]$$



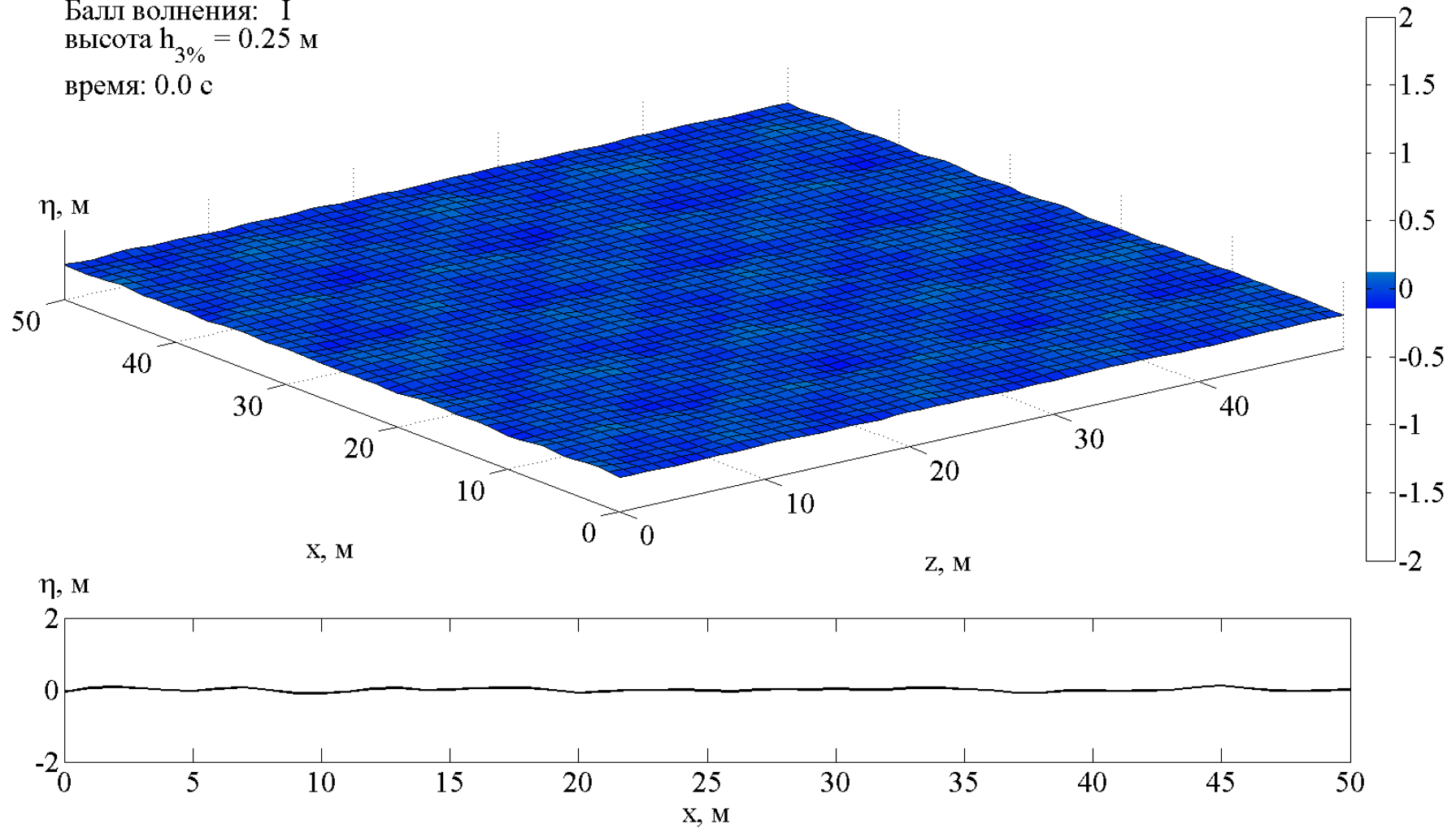
- Спектр Артура

$$\Phi(\chi) = \frac{\pi}{2} \cos^2 \chi$$



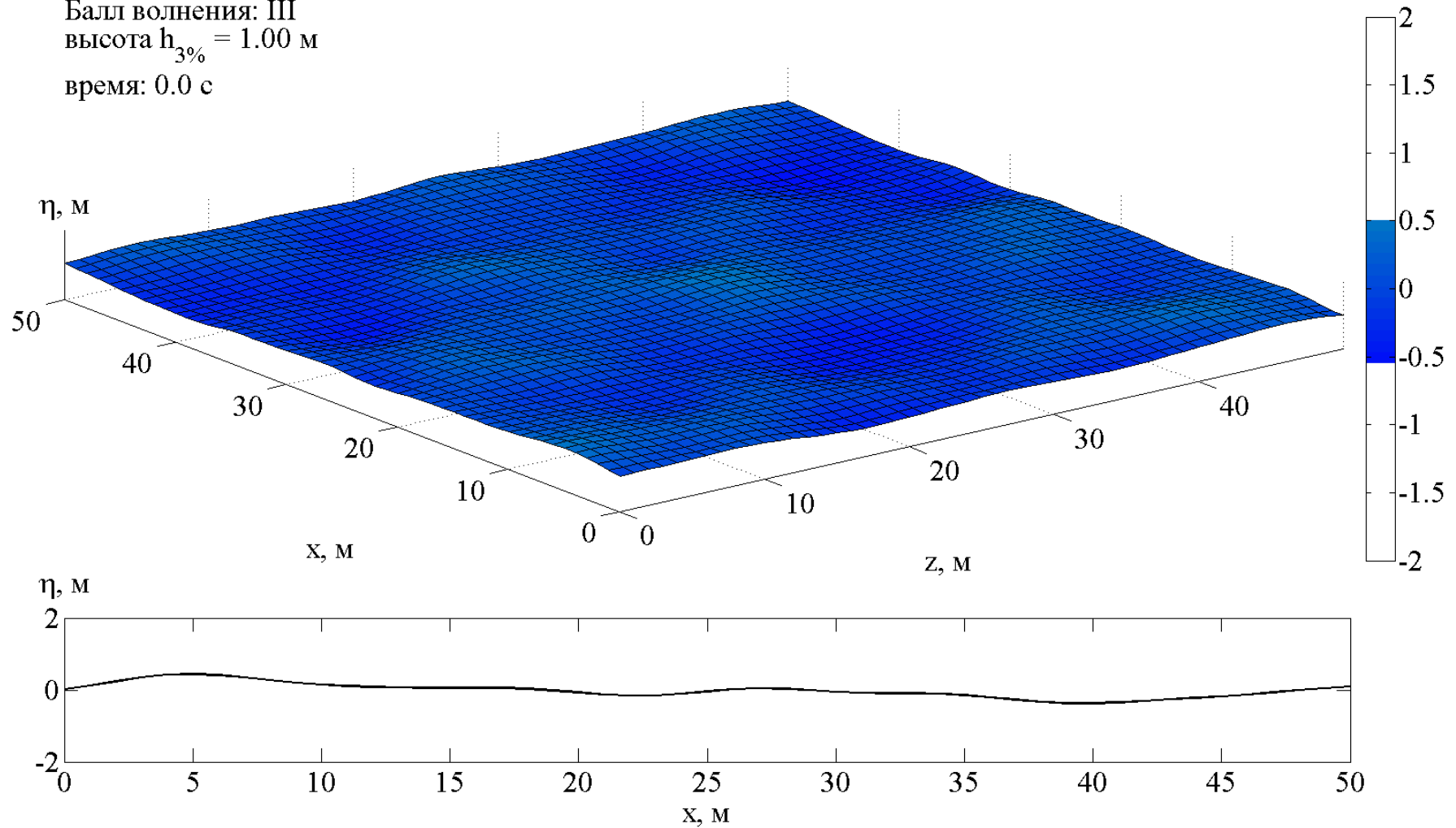
Результаты моделирования волнения

Балл волнения: I
высота $h_{3\%} = 0.25$ м
время: 0.0 с

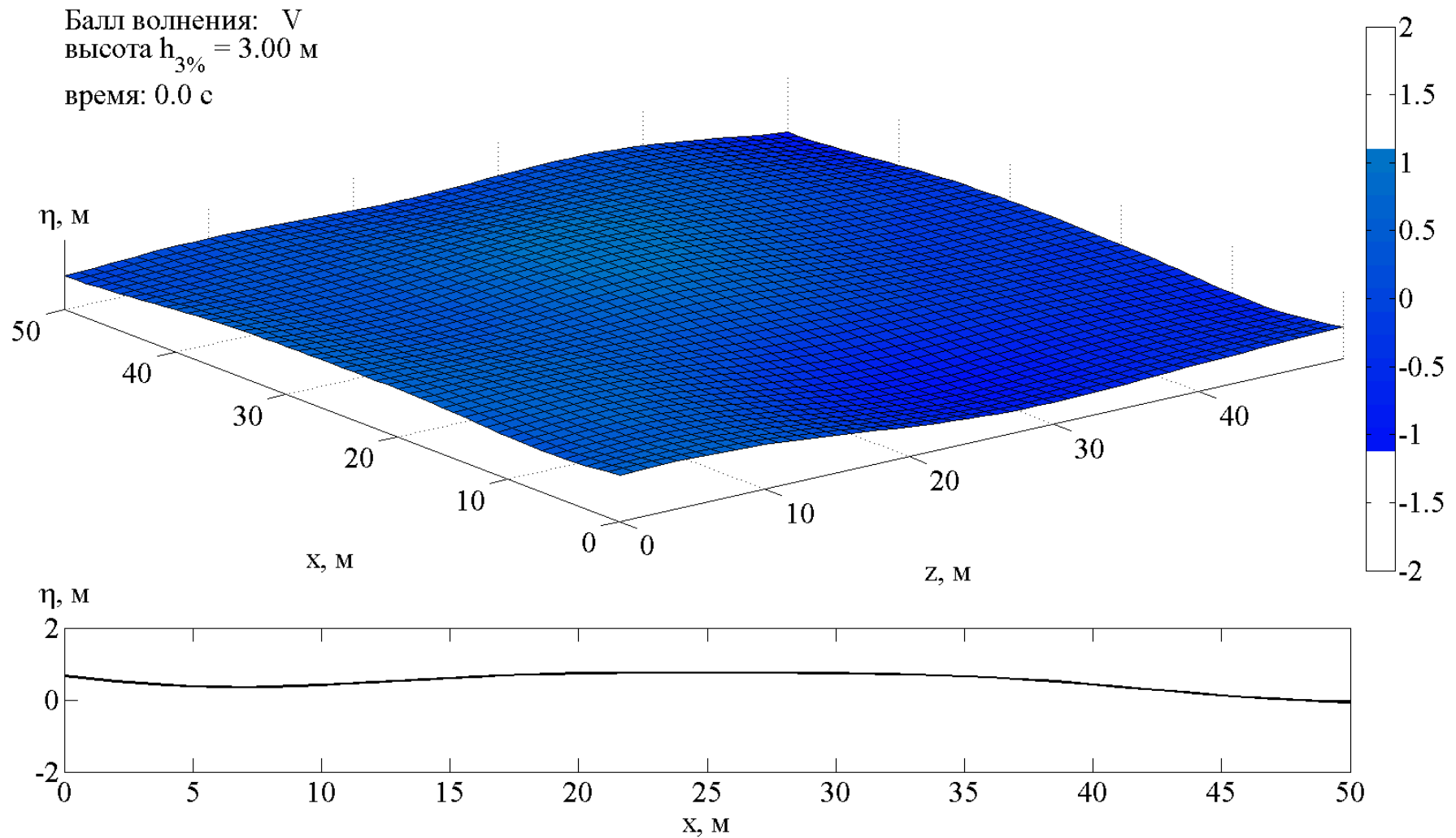


Результаты моделирования волнения

Балл волнения: III
высота $h_{3\%} = 1.00$ м
время: 0.0 с

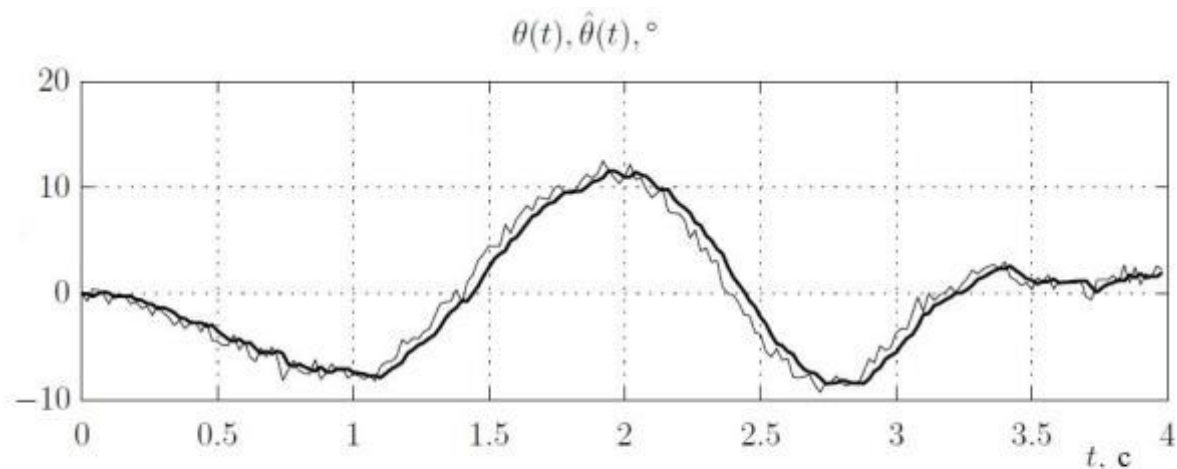


Результаты моделирования волнения

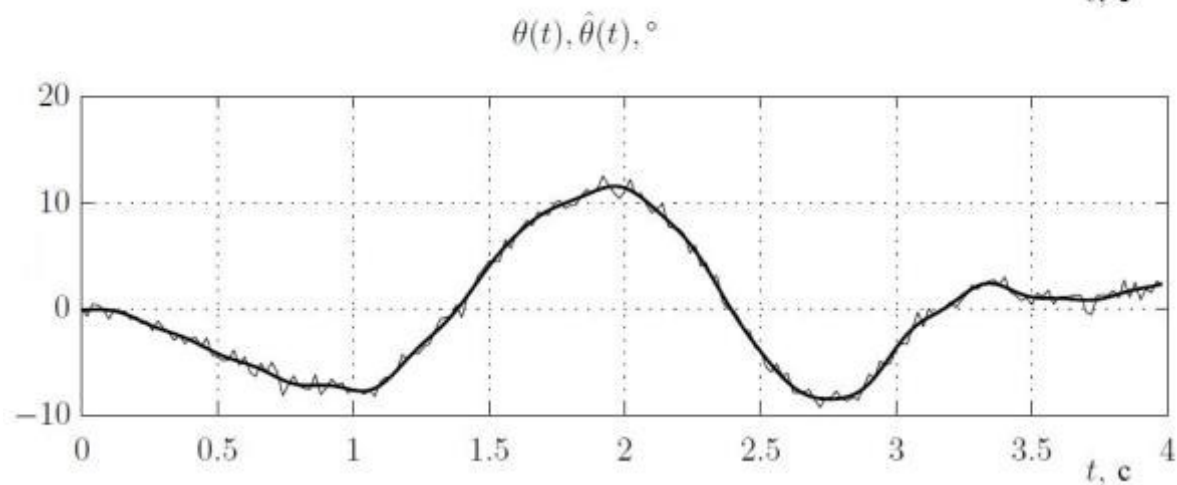


Фильтрация сигналов

- Во временной области
- + простота реализации
- наличие запаздывания



- В частотной области
- + отсутствие запаздывания
- влияние оконной функции



Методы идентификации

- **Специальные методы:** импульс, ступ. воздействие, гармоника
 - + простота реализации
 - большая погрешность при волнении
- **Спектральные методы:** $S_{\theta}(\omega) = |H_{u\theta}|^2 S_u(\omega)$
 - + требует меньше времени, чем последовательность гармоник
 - экспериментальный спектр $S_{\theta}(\omega)$ не является гладким
 - требует определения параметров
- **Параметрические методы:** МНК, ОМНК, МИП
 - + непосредственное определение параметров
 - + позволяют учитывать возмущение
 - отсутствие сходимости при определенных условиях

Параметрические методы

- Метод наименьших квадратов (ARX-модель)

$$V_N(\gamma, Z^N) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{1}{2} [\theta(t) - \varphi^T(t)\gamma]^2$$
$$\hat{\gamma}_N = \arg \min V_N(\gamma, Z^N) = \left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi(t)\varphi^T(t) \right]^{-1} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi(t)\theta(t)$$

- Обобщенный метод наименьших квадратов (ARMAX-модель)

$$\hat{\gamma}_N = \arg \min V_N(\gamma, Z^N) = \arg \min \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{1}{2} [\theta(t) - \varphi^T(t, \gamma)\gamma]^2$$

- Метод инструментальных переменных (ARX-модель)

$$\hat{\gamma}_N = \left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \xi(t)\varphi^T(t) \right]^{-1} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \xi(t)\theta(t)$$

Параметры математической модели

Уравнение бортовой качки

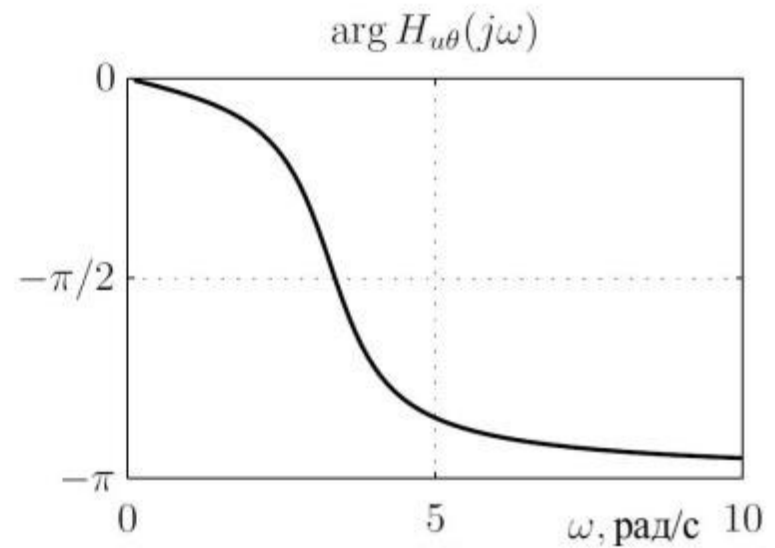
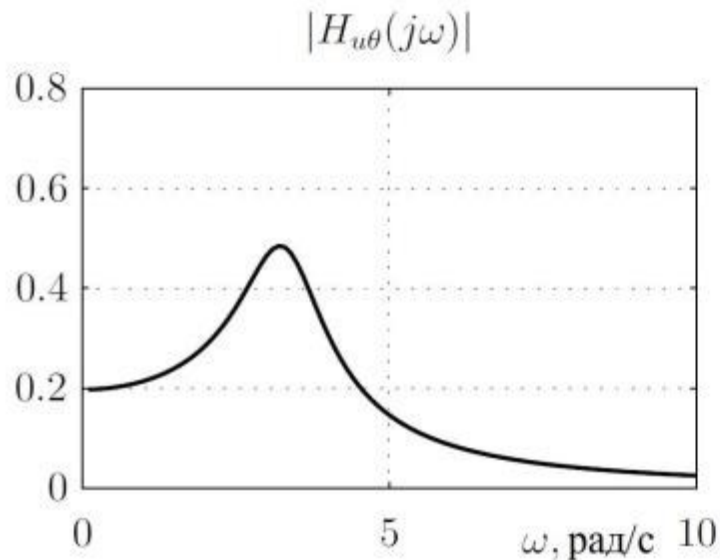
$$\ddot{\theta}(t) + a_1 \dot{\theta}(t) + a_2 \theta(t) = b_2 u(t) + b_1 \alpha(t)$$

$$a_1 = 1.400$$

$$a_2 = 11.37$$

$$b_2 = 2.240$$

$$b_1 = 11.37$$



Результаты идентификации

Фильтрация во временной области

Балл	Ошибка МНК, %			Ошибка ОМНК, %			Ошибка МИП, %		
0	—	—	—	14.0	2.6	2.4	0.3	0.1	0.3
I	—	—	—	18.0	7.4	0.6	0.0	4.8	5.4
II	—	—	—	52.0	11.7	20.0	0.6	4.3	1.6
III	—	—	—	43.0	31.4	32.4	1.3	2.0	2.0

Фильтрация в частотной области

Балл	Ошибка МНК, %			Ошибка ОМНК, %			Ошибка МИП, %		
0	0.9	0.9	2.9	36.6	7.6	43.2	41.0	10.0	42.1
I	46.7	12.7	11.4	55.1	10.4	29.4	78.1	18.4	82.3
II	66.9	7.5	21.6	77.3	10.1	50.7	83.8	17.5	85.8
III	47.7	28.1	22.5	52.0	28.8	33.2	82.7	24.9	88.3

Результаты идентификации (при постоянном крене в 1 градус)

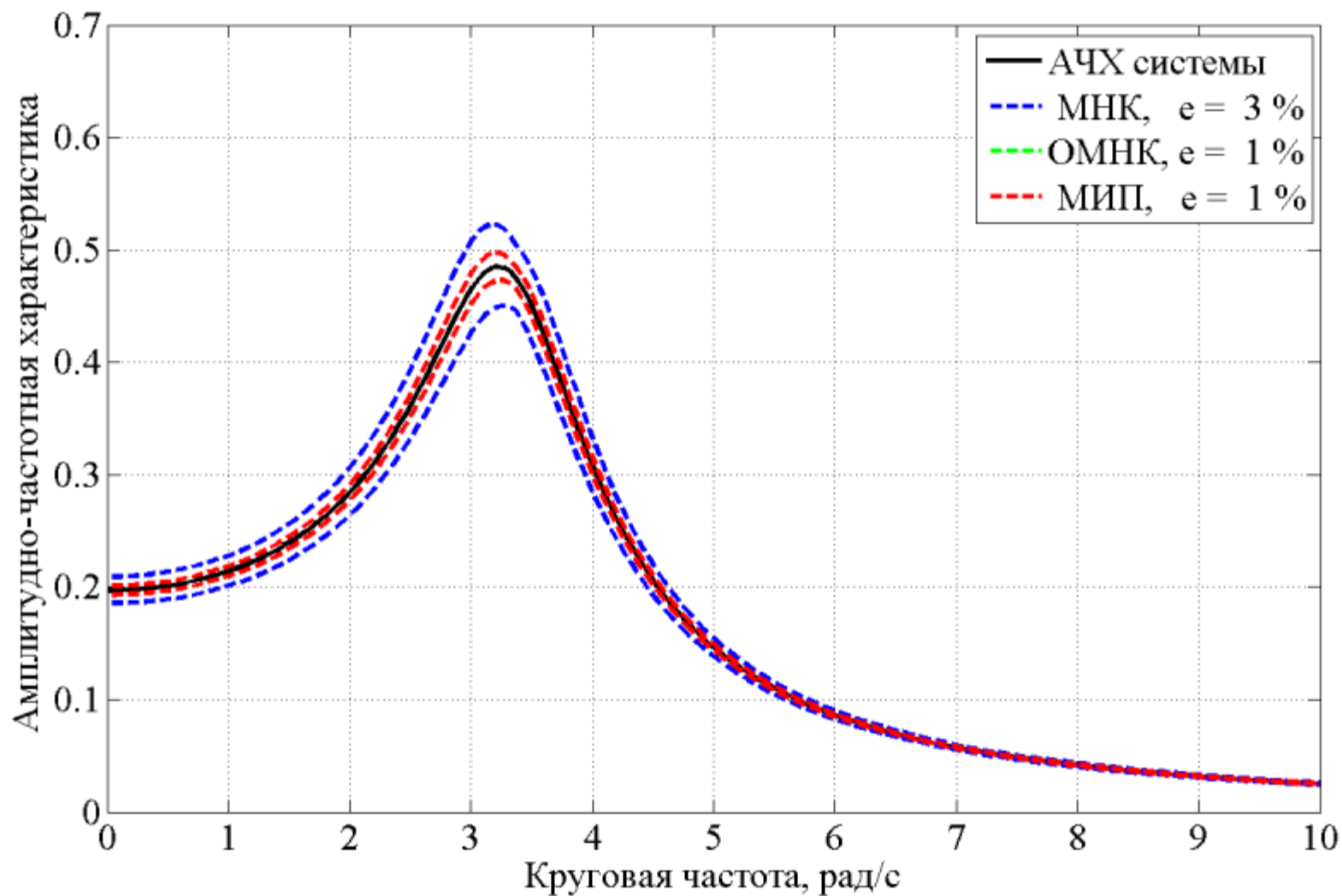
Фильтрация во временной области

Балл	Ошибка МНК, %			Ошибка ОМНК, %			Ошибка МИП, %		
0	—	—	—	29.9	2.3	2.2	1.3	0.1	1.4
I	—	—	—	19.4	6.1	2.9	4.8	0.7	1.1
II	—	—	—	51.3	14.7	21.1	3.4	4.2	1.6
III	—	—	—	40.0	32.4	30.1	4.7	0.7	2.7

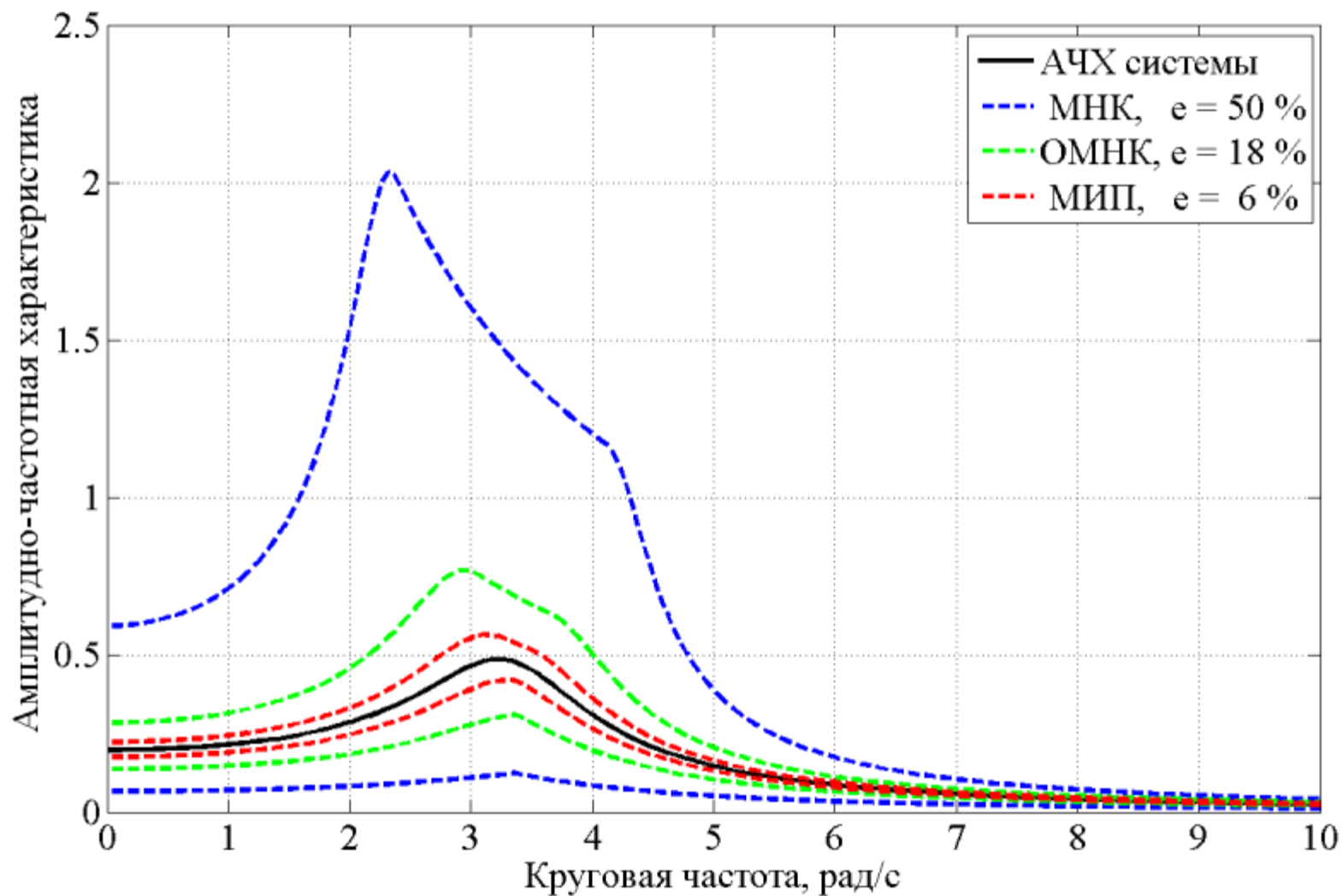
Фильтрация в частотной области

Балл	Ошибка МНК, %			Ошибка ОМНК, %			Ошибка МИП, %		
0	0.4	1.6	4.3	37.4	10.1	44.2	59.1	14.6	61.1
I	47.8	8.8	9.6	64.8	4.1	43.9	88.8	21.7	91.4
II	66.1	9.2	25.2	76.5	11.2	52.1	81.6	16.2	86.3
III	53.1	29.1	27.4	67.4	31.3	54.6	—	22.0	—

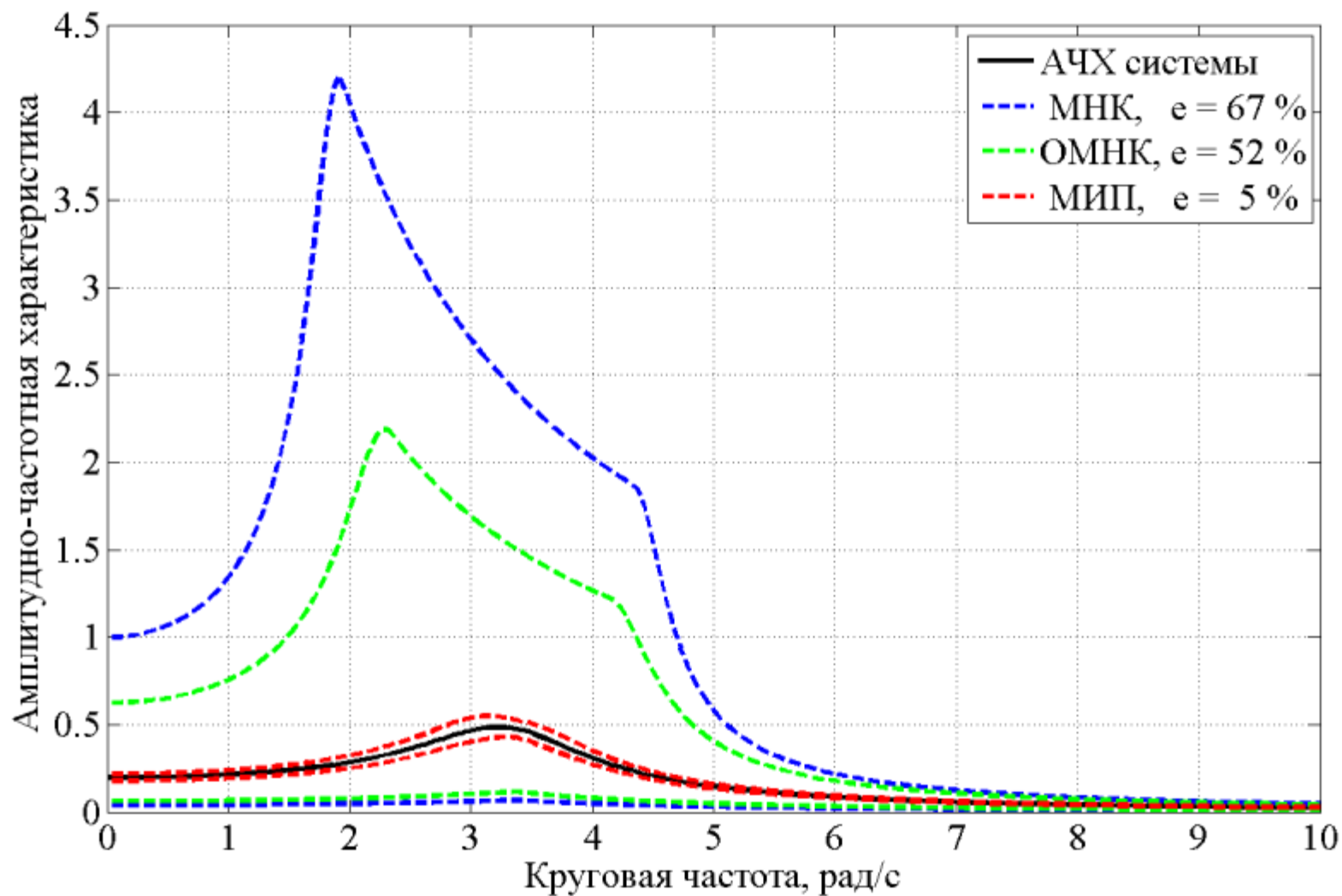
Без волнения



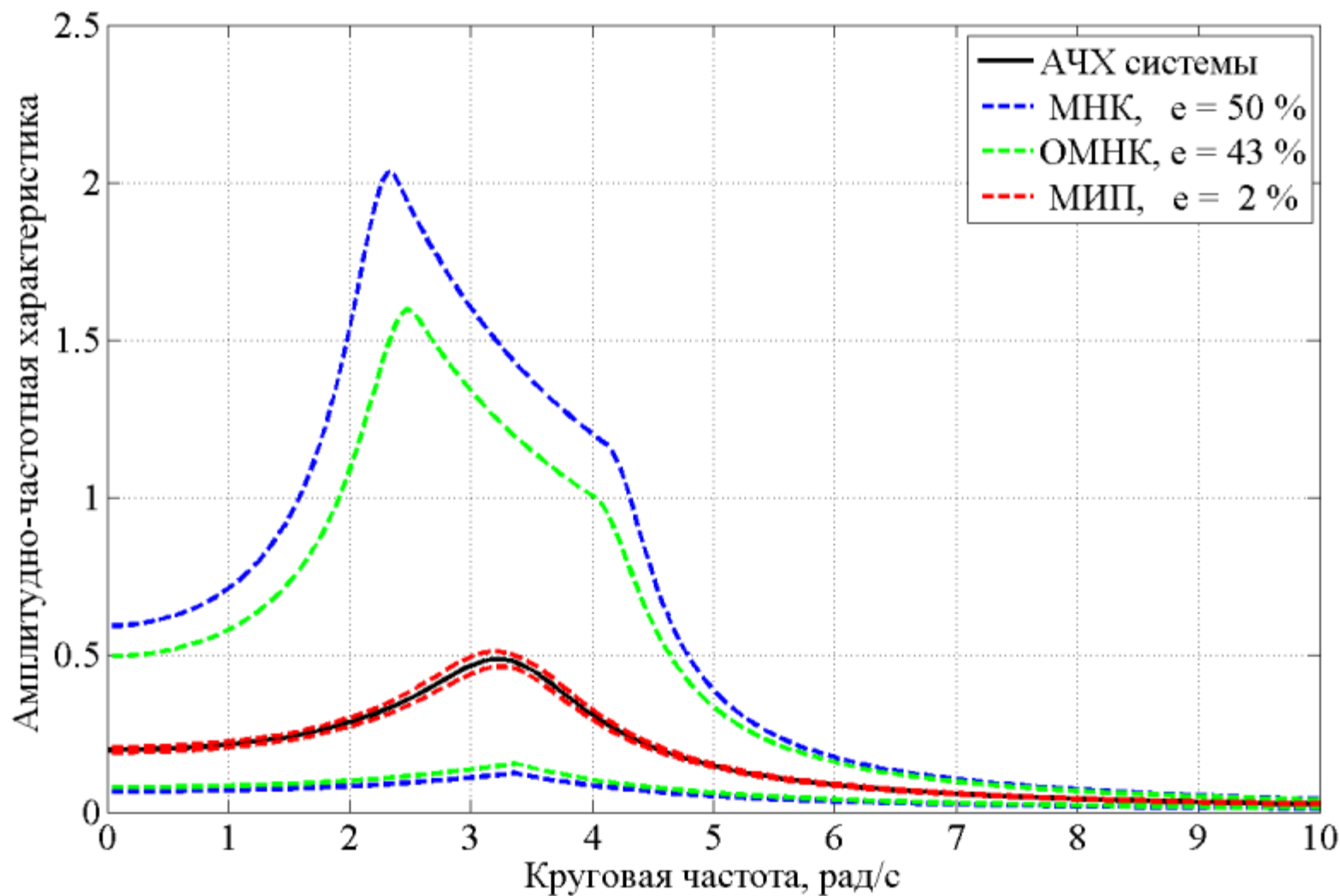
Волнение I балл



Волнение II балла



Волнение III балла



Основные результаты

- Проведен анализ существующих методов идентификации
- Построена математическая модель бортовой качки судна на волнении
- Построена математическая модель волнения
- Проведен сравнительный анализ параметрических методов идентификации совместно с методами фильтрации
- Выбран наиболее эффективный метод – МИП совместно с фильтрацией во временной области
- Разработанное ПО для расчета параметров волнения подано на регистрацию в Роспатент

Телеграфная волна

Телеграфная волна

- шаг дискретизации
 $h = 0.02 \text{ с}$
- минимальный
интервал постоянства
сигнала

$$T = 0.5 \text{ с}$$

- коэффициент
телеграфной волны

$$K = T/h = 25$$

