

Л.Н. Блохин, д.т.н, А.П. Кривоносенко, к.т.н.
О.В. Ермолаева, А.Н. Юрченко (НАУ, Україна)

ОСОБЕННОСТИ ИМИТАЦИИ ТРЕХСТЕПЕННОЙ «КАЧКИ» КОРАБЛЯ И ЕЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ

Описаны процедура составления модели динамики пространственной «качки» «тяжелого» корабля, а затем особенности и результаты воспроизведения желаемой «качки» на платформе существующего трехстепенного стенда-имитатора движений.

В связи с прогрессом в технике, постоянным ростом точностных требований к качеству бортовых навигационных и управляющих систем подвижных объектов в настоящее время в процессах создания или модернизации указанных выше систем и комплексов, необходимо осуществлять так называемые [1] этапы их динамической аттестации. Суть такой аттестации в следующем. Испытываемое изделие устанавливается на динамический многомерный стенд-имитатор натуральных движений подвижного объекта в заданном крейсерском возмущенном движении. Сигналы, характеризующие возмущенное движение объекта – это многомерный стохастический процесс с известными по результатам испытаний прототипов объекта динамическими характеристиками, например, матрицами спектральных и взаимных спектральных плотностей вектора выходных сигналов стенда-имитатора. По результатам эксперимента идентифицируются модели динамики изделия, включая матрицы спектральных плотностей неконтролируемого при эксперименте вектора возмущений (помех), действующих в изделии при его функционировании в динамических условиях близких, к имитируемому на стенде.

К сожалению, по известным литературным источникам, например [2], нельзя прямо установить модели динамики кораблей разных классов, однако, имеется возможность получения таких моделей косвенным путем. Известны результаты диссертационных исследований [3], заключающиеся в измерении специальными оптическими системами деформации «тяжелого» корабля (ПКИК «Юрий Гагарин»), которые производились в его различных эксплуатационных режимах. Понимая, что, во-первых, волнение океана (моря) характеризуется эллиптическим циклическим движением частиц воды и, во-вторых, океан настолько могучая стихия, что наличие на его поверхности даже «тяжелого» судна практически никак не сказывается на динамических характеристиках волнения океана (моря), составим ориентировочную модель динамики трехмерной угловой качки корабля. Учтем также, что при частотной полосе каналов действующего стенда около 1 Гц, т.е. на порядок более высокой, чем основная частота волнения океана, для имитации «качки» корабля нет необходимости изменять существующую структуру управления стендом.

Следовательно, учитывая, что составляющая морской качки около 0,1 Гц, а частотные полосы пропускания каналов стенда-имитатора на порядок выше, входные сигналы в стенд-имитатор формировались специально моделируемым последовательным многомерным фильтром непосредственно из компьютерного псевдобелого шума.

Составленная желаемая модель динамики стенда – матрица спектральных плотностей вектора программных сигналов r_0 представлена в таблице 1, а блок-схема тракта имитации на рис. 1.

МАТРИЦА СПЕКТРАЛЬНЫХ ПЛОТНОСТЕЙ ВЕКТОРА ПРОГРАММНЫХ СИГНАЛОВ r_0

Таблица 1

$$S_{r_0 r_0} = \begin{bmatrix} S_{\psi\psi} & S_{\psi\vartheta} & S_{\psi\gamma} \\ S_{\psi\vartheta} & S_{\vartheta\vartheta} & S_{\vartheta\gamma} \\ S_{\psi\gamma} & S_{\vartheta\gamma} & S_{\gamma\gamma} \end{bmatrix}, \text{ [град}^2 \cdot \text{с];}$$

где

$$S_{\psi\psi} = \frac{1,5^2}{\pi} \left| \frac{(2,65s+1)(1,4s+1)(0,8s+1)}{(1,68^2 s^2 + 2 \cdot 0,3 \cdot 1,68s + 1)(0,88^2 s^2 + 2 \cdot 0,3 \cdot 0,88s + 1)(0,66^2 s^2 + 2 \cdot 0,3 \cdot 0,66s + 1)} \right|^2$$

;

$$S_{\vartheta\vartheta} = \frac{3,54^2}{\pi} \left| \frac{(2,65s+1)}{(1,68^2 s^2 + 2 \cdot 0,1 \cdot 1,68s + 1)} \right|^2$$

$$S_{\gamma\gamma} = \frac{2,5^2}{\pi} \left| \frac{(2,65s+1)(1,4s+1)}{(1,68^2 s^2 + 2 \cdot 0,4 \cdot 1,68s + 1)(0,88^2 s^2 + 2 \cdot 0,3 \cdot 0,88s + 1)} \right|^2$$

$$S_{\psi\vartheta} = 0,5 \cdot \frac{1,5 \cdot 3,54}{\pi} \frac{|2,65s+1|^2 (1,4s+1)}{(1,68^2 s^2 + 2 \cdot 0,3 \cdot 1,68s + 1)(1,68^2 s^2 - 2 \cdot 0,1 \cdot 1,68s + 1)(0,88^2 s^2 + 2 \cdot 0,3 \cdot 0,88s + 1)} \times \frac{(0,8s+1)}{(0,66^2 s^2 + 2 \cdot 0,3 \cdot 0,66s + 1)}$$

$$S_{\psi\gamma} = 0,5 \cdot \frac{1,5 \cdot 3,54}{\pi} \frac{|2,65s+1|^2 (-1,4s+1)}{(1,68^2 s^2 - 2 \cdot 0,3 \cdot 1,68s + 1)(1,68^2 s^2 + 2 \cdot 0,1 \cdot 1,68s + 1)(0,88^2 s^2 - 2 \cdot 0,3 \cdot 0,88s + 1)} \times \frac{(0,8s+1)}{(0,66^2 s^2 - 2 \cdot 0,3 \cdot 0,66s + 1)}$$

$$S_{\vartheta\gamma} = 0,4 \cdot \frac{1,5 \cdot 2,5}{\pi} \frac{|2,65s+1|^2 |1,4s+1|^2}{(1,68^2 s^2 + 2 \cdot 0,3 \cdot 1,68s + 1)(1,68^2 s^2 - 2 \cdot 0,4 \cdot 1,68s + 1)(0,88^2 s^2 + 2 \cdot 0,3 \cdot 0,88s + 1)} \times \frac{(0,8s+1)}{(0,66^2 s^2 + 2 \cdot 0,3 \cdot 0,66s + 1)}$$

$$S_{\gamma\vartheta} = 0,4 \cdot \frac{1,5 \cdot 2,5}{\pi} \frac{|2,65s+1|^2 |1,4s+1|^2}{(1,68^2 s^2 - 2 \cdot 0,3 \cdot 1,68s + 1)(1,68^2 s^2 + 2 \cdot 0,4 \cdot 1,68s + 1)(0,88^2 s^2 + 2 \cdot 0,3 \cdot 0,88s + 1)} \times \frac{(-0,8s+1)}{(0,66^2 s^2 - 2 \cdot 0,3 \cdot 0,66s + 1)}$$

$$S_{\vartheta\psi} = 0,7 \cdot \frac{3,54 \cdot 2,5}{\pi} \frac{|2,65s+1|^2 (1,4s+1)}{(1,68^2 s^2 + 2 \cdot 0,1 \cdot 1,68s + 1)(1,68^2 s^2 - 2 \cdot 0,4 \cdot 1,68s + 1)(0,88^2 s^2 + 2 \cdot 0,3 \cdot 0,88s + 1)}$$

$$S_{\psi\gamma} = 0,7 \cdot \frac{3,54 \cdot 2,5}{\pi} \frac{|2,65s+1|^2 (-1,4s+1)}{(1,68^2 s^2 - 2 \cdot 0,1 \cdot 1,68s + 1)(1,68^2 s^2 + 2 \cdot 0,4 \cdot 1,68s + 1)(0,88^2 s^2 - 2 \cdot 0,3 \cdot 0,88s + 1)}$$

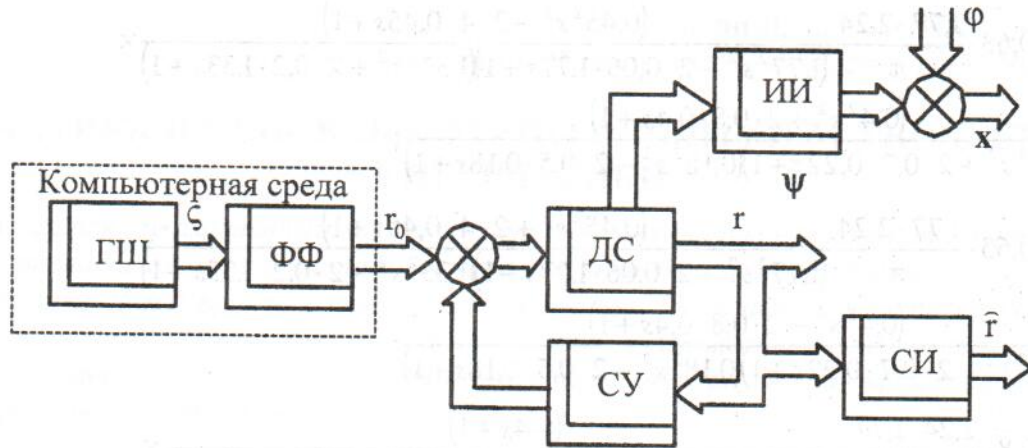


Рис. 1. Блок-схема тракта имитации

В блок-схеме введены следующие обозначения: ГШ – генераторы шумов; ФФ – многомерный фильтр, формирующий вектор программных сигналов стенда r_0 ; ДС – динамический стенд; СУ – штатная система управления стендом; ИИ – испытываемое изделие; x – вектор выходных сигналов испытываемого изделия; φ – вектор помех на выходе изделия в исследуемом режиме движения объекта; \hat{r} – вектор оценочных значений угловых координат стенда-имитатора.

По результатам проведенных исследований тракта имитации, по осциллограммам координат \hat{r} , проведения их первичной обработки и соответствующей аппроксимации полученных графических зависимостей составлены матрицы спектральных плотностей вектора выходных сигналов \hat{r} стенда-имитатора (табл. 2).

МАТРИЦА СПЕКТРАЛЬНЫХ ПЛОТНОСТЕЙ ВЕКТОРА ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ \hat{r} СТЕНДА-ИМИТАТОРА

Таблица 2

$$S'_{\hat{r}\hat{r}} = \begin{bmatrix} S_{\psi\psi} & S_{\psi\vartheta} & S_{\psi\gamma} \\ S_{\psi\vartheta} & S_{\vartheta\vartheta} & S_{\vartheta\gamma} \\ S_{\psi\gamma} & S_{\vartheta\gamma} & S_{\gamma\gamma} \end{bmatrix}, [\text{град}^2 \cdot \text{с}];$$

где

$$S_{\psi\psi} = \frac{5^2}{\pi} \left| \frac{(0,4^2 s^2 + 2 \cdot 0,8 \cdot 0,4s + 1)}{(1,33^2 s^2 + 2 \cdot 0,2 \cdot 1,33s + 1)(0,22^2 s^2 + 2 \cdot 0,7 \cdot 0,22s + 1)} \right|^2;$$

$$S_{\vartheta\vartheta} = \frac{3,14^2}{\pi} \left| \frac{(0,45^2 s^2 + 2 \cdot 4 \cdot 0,45s + 1)}{(1,77^2 s^2 + 2 \cdot 0,06 \cdot 1,77s + 1)(0,18^2 s^2 + 2 \cdot 0,5 \cdot 0,18s + 1)} \right|^2;$$

$$S_{\gamma\gamma} = \frac{3,14^2}{\pi} \left| \frac{(4s + 1)}{(1,33^2 s^2 + 2 \cdot 0,55 \cdot 1,33s + 1)(0,4^2 s^2 + 2 \cdot 1,5 \cdot 0,4s + 1)} \right|^2;$$

$$S_{\psi} = 0,63 \cdot \frac{1,77 \cdot 2,24}{\pi} \frac{(0,45^2 s^2 - 2 \cdot 4 \cdot 0,45s + 1)}{(1,77^2 s^2 - 2 \cdot 0,06 \cdot 1,77s + 1)(1,33^2 s^2 + 2 \cdot 0,2 \cdot 1,33s + 1)} \times \\ \times \frac{(0,4^2 s^2 + 2 \cdot 0,8 \cdot 0,4s + 1)}{(0,22^2 s^2 + 2 \cdot 0,7 \cdot 0,22s + 1)(0,18^2 s^2 - 2 \cdot 0,5 \cdot 0,18s + 1)};$$

$$S_{\psi\delta} = 0,63 \cdot \frac{1,77 \cdot 2,24}{\pi} \frac{(0,45^2 s^2 + 2 \cdot 4 \cdot 0,45s + 1)}{(1,77^2 s^2 + 2 \cdot 0,06 \cdot 1,77s + 1)(1,33^2 s^2 - 2 \cdot 0,2 \cdot 1,33s + 1)} \times \\ \times \frac{(0,4^2 s^2 - 2 \cdot 0,8 \cdot 0,4s + 1)}{(0,22^2 s^2 - 2 \cdot 0,7 \cdot 0,22s + 1)(0,18^2 s^2 + 2 \cdot 0,5 \cdot 0,18s + 1)};$$

$$S_{\psi\gamma} = 0,8 \cdot \frac{2,24 \cdot 1,77}{\pi} \frac{(-4s + 1)}{(1,33^2 s^2 + 2 \cdot 0,2 \cdot 1,33s + 1)(1,33^2 s^2 - 2 \cdot 0,55 \cdot 1,33s + 1)} \times \\ \times \frac{(0,4^2 s^2 + 2 \cdot 0,8 \cdot 0,4s + 1)}{(0,4^2 s^2 - 2 \cdot 1,5 \cdot 0,4s + 1)(0,22^2 s^2 + 2 \cdot 0,7 \cdot 0,22s + 1)};$$

$$S_{\psi\gamma\delta} = 0,8 \cdot \frac{2,24 \cdot 1,77}{\pi} \frac{(4s + 1)}{(1,33^2 s^2 - 2 \cdot 0,2 \cdot 1,33s + 1)(1,33^2 s^2 + 2 \cdot 0,55 \cdot 1,33s + 1)} \times \\ \times \frac{(0,4^2 s^2 - 2 \cdot 0,8 \cdot 0,4s + 1)}{(0,4^2 s^2 + 2 \cdot 1,5 \cdot 0,4s + 1)(0,22^2 s^2 - 2 \cdot 0,7 \cdot 0,22s + 1)};$$

$$S_{\gamma\delta} = 1 \cdot \frac{1,77 \cdot 1,77}{\pi} \frac{(4s + 1)}{(1,33^2 s^2 + 2 \cdot 0,55 \cdot 1,33s + 1)(0,4^2 s^2 + 2 \cdot 1,5 \cdot 0,4s + 1)} \times \\ \times \frac{(0,45^2 s^2 - 2 \cdot 4 \cdot 0,45s + 1)}{(1,77^2 s^2 - 2 \cdot 0,06 \cdot 1,77s + 1)(0,18^2 s^2 + 2 \cdot 0,5 \cdot 0,18s + 1)};$$

$$S_{\delta\gamma} = 1 \cdot \frac{1,77 \cdot 1,77}{\pi} \frac{(-4s + 1)}{(1,33^2 s^2 - 2 \cdot 0,55 \cdot 1,33s + 1)(0,4^2 s^2 - 2 \cdot 1,5 \cdot 0,4s + 1)} \times \\ \times \frac{(0,45^2 s^2 + 2 \cdot 4 \cdot 0,45s + 1)}{(1,77^2 s^2 + 2 \cdot 0,06 \cdot 1,77s + 1)(0,18^2 s^2 - 2 \cdot 0,5 \cdot 0,18s + 1)}.$$

После проведения описанных выше работ тракт имитации многомерной угловой «качки» «тяжелого» судна оказался пригодным к выполнению предписанных ему функций. На подготовленном, указанном выше способом, стенде-имитаторе «качки» корабля были успешно проведены экспериментальные исследования одной из корабельных навигационных систем и выполнена ее динамическая аттестация в условиях, близких к натурным.

Список литературы

1. Блохин Л.Н., Буриченко М.Ю. Статистична динаміка систем управління. Підручник для ВНЗ України. – К.: НАУ, 2003. – 208 с.
2. Екимов В.В. Вероятностные методы в строительной механике корабля. – Л.: Судостроение, 1966. – 328 с.
3. Страшко В.А. Метод и система оптимального по точности измерения деформации плавучего командного измерительного комплекса. – К.: КИИГА, 1991.