

УДК 621.9-219.1-752

Е.А. Владецькая, ассистент*Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская, 33, г. Севастополь**tampt@sevntu.com.ua***РАЗРАБОТКА ФОРМИРУЮЩЕГО ФИЛЬТРА, МОДЕЛИРУЮЩЕГО ДИНАМИКУ МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ ПЛАВУЧЕЙ РЕМОНТНОЙ МАСТЕРСКОЙ**

Выполнен анализ математических моделей, используемых для описания морского волнения и его воздействия на плавучее основание судна, разработан формирующий фильтр, моделирующий динамику морского волнения плавучей ремонтной мастерской, позволяющий учитывать влияние внешней среды на технологическую систему станочного механообрабатывающего оборудования.

Ключевые слова: *плавучая ремонтная мастерская, морское волнение, колебания, формирующий фильтр.*

Введение. В судостроительной и судоремонтной отраслях широкое применение находят такие передвижные механические комплексы, как плавучие ремонтные мастерские (ПРМ), на палубах которых размещены различные участки, в том числе и механообрабатывающие, включающие практически все виды станочного оборудования [1, 2]. Особенностью эксплуатации указанного оборудования является наличие вибраций, вызванных действием различных источников, приводящее к снижению точности и чистоты обработки, а также к другим нарушениям технологических процессов. Наличие колебаний в отклонениях расположения шероховатости поверхности объясняется возмущающими воздействиями в технологических процессах, нестабильностью технологической системы за счёт изменяющихся внешних факторов, часть из которых не контролируется в процессе обработки в условиях работы оборудования в ПРМ [1].

Целью данной статьи является построение формирующего фильтра, характеризующего статистические свойства морского волнения.

Основное содержание работы. Проведённый анализ и декомпозиция системы станка позволили выявить подсистемы и связи между ними, вызывающие колебания объекта под действием сил динамических воздействий [2].

Для определения динамических характеристик несущей системы станка, а именно, амплитудно-частотных и амплитудно-фазовых частотных характеристик, необходимо дополнительно исследовать влияние на динамику станка морского волнения, в качестве внешних сил действующего на плавучее основание ПРМ.

В процессе функционирования ПРМ на плавучее основание воздействуют возмущающие силы ветра, течения и морского волнения.

Воздействие ветра может быть оценено путем измерения скорости и направления ветра румбоанемометрами, установленными на плавучем основании, и расчета аэродинамических сил по известным соотношениям [3, 4]:

$$F_{XB} = C_{XB}(\beta)\rho_B S_{XB} v_B^2 / 2; \quad F_{YB} = C_{YB}(\beta)\rho_B S_{YB} v_B^2 / 2; \quad M_{ZB} = C_{MB}(\beta)\rho_B S_{YB} L_B v_B^2 / 2, \quad (1)$$

где C_{XB} , C_{YB} , C_{MB} – аэродинамические коэффициенты плавучего основания – функции от угла ветра β ; ρ_B – удельная плотность воздуха; v_B – скорость ветра относительно плавучего основания; S_{XB} , S_{YB} , L_B – эффективные площади сопротивления и характерная длина судна.

Параметры S_{XB} , S_{YB} , L_B , $C_{XB}(\beta)$, $C_{YB}(\beta)$, $C_{MB}(\beta)$ могут быть с достаточной точностью определены при испытаниях масштабных моделей и уточнены при экспериментах.

Скорость ветра определяется суммой следующих составляющих

$$v_B = v_{BO} + v_{TO} + v_{TB}, \quad (2)$$

где v_{BO} – средняя скорость ветра; v_{TO} – турбулентная составляющая; v_{TB} – волновая составляющая.

Как турбулентная, так и волновая составляющие являются стационарными центрированными функциями времени [4]. Волновая составляющая скорости ветра определяется морским волнением [5]. Ее корреляционная функция практически совпадает с соответствующей характеристикой волновых ординат, отличаясь дисперсией.

Воздействие морского волнения на плавучее основание сказывается в форме горизонтально-продольных колебаний, горизонтально-поперечных колебаний, вертикальных перемещений, бортовой и

килевой качки, а также рыскания. Соотношения между видами качки зависят как от параметров плавучего основания, так и от его расположения относительно генерального направления бега волн.

Соотношения между различными видами качки и их амплитуды для плавучего основания, удерживающегося в заданной точке или перемещающегося предельно малыми ходами, зависят от курсового угла и эффективного угла волнового склона

$$\varepsilon_X = \varepsilon_0 \sin x, \quad (3)$$

где x – курсовой угол волны относительно направления распространения волны; ε_0 – угол волнового склона в заданной точке.

Согласно существующим представлениям [5–7] морское волнение являет собой суперпозицию большого числа плоских (двумерных) волновых систем, распространяющихся под различными углами к генеральному направлению бега волн. Последнее, в случае ветров постоянного направления, через 4...6 часов совпадает с направлением ветра. В достаточно удаленных от берегов районах, в условиях действия ветра постоянной интенсивности наблюдается развитое морское волнение. Поведение ординаты волнового профиля в любой заданной точке развитого морского волнения характеризуется случайной стационарной центрированной функцией $r_B(t)$ с нормальным законом распределения.

Математическое описание ветрового волнения производится на основе обработки и аппроксимации экспериментальных данных. К настоящему времени известно более десяти форм представления спектра волнения, например, спектр, предложенный Международной конфедерацией опытовых бассейнов (МКОБ)

$$S(w) = Aw^{-5} \exp(-Bw^4), \quad (4)$$

где $A = 8,1 \cdot 10^{-3} g^2$, $B = 3,11 \cdot h_{1/3}^2$, g – ускорение силы тяжести в заданной точке; $h_{1/3}^2$ – высота волны обеспеченности; w – угловая частота волнения.

Для задач синтеза системы автоматического управления и входящих в их состав измерительных подсистем необходимо построение формирующих фильтров, позволяющих получать на выходе процессы с заданными характеристиками, что является целью настоящей работы. Такие фильтры известными методами могут быть достаточно просто построены для процессов, характеризуемых спектральными плотностями с дробно-рациональным описанием [8, 9]. Аппроксимация спектров двухмерного морского волнения, удовлетворяющего указанным требованиям, имеет вид [7]

$$S_r = \frac{2D_r \alpha(\alpha^2 + \beta^2)}{w^4 + 2(\alpha^2 - \beta^2)w^2 + (\alpha^2 + \beta^2)}, \quad (5)$$

где D_r – дисперсия волновой ординаты, m^2 ; $D_r = 0,143(0,5 \cdot h_{3\%})^2$; $\alpha = 0,21\beta$; $h_{3\%}$ – высота волны 3 % обеспеченности, м.

Высота волны 3 % обеспеченности определяется степенью морского волнения в соответствии со шкалой ГУ ГМС (Регистра) [10], часть которой для наиболее важного диапазона условий, которые могут встретиться при производстве работ ПРМ, приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Шкала степени морского волнения

Степень волнения	Высота волны, $h_{3\%}$, м	Характеристика волнения
1	0...0,25	Слабое
2	0,25...0,75	Слабое
3	0,75...1,25	Значительное
4	1,25...2,0	Значительное
5	2,0...3,5	Сильное
6	3,5...6,0	Сильное

Параметр β связан с частотой максимума спектра развитого волнения зависимостью

$$\beta = 0,82 \overline{w_m}, \quad (6)$$

где частота максимума спектра $\overline{w_m}$ определяется соотношением

$$\overline{w_m} = 1,74 h_{3\%}^{-0,4}, \quad (7)$$

что совместно с (4), (5) позволяет полностью определить спектральную плотность волновой заданной интенсивности для двухмерного волнения.

Наиболее точным по существующим представлениям является описание морского волнения суперпозицией волновых систем [5, 7]. Энергетические спектры двухмерного и трехмерного волнений связаны соотношением:

$$\int_0^{\infty} S_r(w)dw = \int_0^{\infty} \int_{-\pi}^{\pi} S_r(w, \alpha) d\alpha dw, \quad (8)$$

где α – угол распространения плоской системы волн относительно генерального направления.

Для описания энергетического спектра трехмерного волнения обычно используется формула Артура [7]:

$$S_r(w, \alpha) = \frac{2}{\pi} S_r(w) \cos^2(\alpha), \quad (9)$$

где $-\pi/2 < \alpha < \pi/2$; $S_r(w)$ – спектр двумерного волнения типа (5) или (4).

Подстановка (8) в (7) с учетом (4) позволяет записать выражение спектральной плотности трехмерного морского волнения, действующего на плавучее основание, расположенное под углом χ к генеральному направлению бега волн в форме:

$$S_{r\chi}(w, \chi) = \frac{2}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} S_r(w) \cos^2(\alpha) \sin^2(\chi - \alpha) d\alpha, \quad (10)$$

где $(\chi - \alpha)$ – угол между осью плавучего основания и направлением распространения соответствующей плоской системы волн.

Интегрирование в правой части (10) приводит к результату

$$S_{r\chi}(w, \chi) = \left(\frac{3}{4} \sin^2 \chi + \frac{1}{4} \cos^2 \chi \right) S_r(w), \quad (11)$$

где, как и ранее $S_r(w)$ – спектральная плотность двухмерного морского волнения с описанием вида (4) или (5).

С учетом (11) спектральная плотность трехмерного морского волнения приобретает форму:

$$S_{r\chi}(w, \chi) = \frac{1 + 2 \sin^2 \chi}{4} \frac{D_r \alpha (\alpha^2 + \beta^2)}{w^4 + 2(\alpha^2 - \beta^2)w^2 + (\alpha^2 + \beta^2)}. \quad (12)$$

Спектральной плотности типа (12) соответствует формирующий фильтр, изображение по Лапласу которого записывается как возбуждаемый сигналом типа белого шума.

$$\Phi_{\epsilon\chi}(S) = \frac{\sqrt{(1/2 + \sin^2 \chi) D_r \alpha (\alpha^2 + \beta^2)}}{S^2 + 2\alpha S + \alpha^2 + \beta^2}, \quad (13)$$

Углы волнового склона для волн относительно малой амплитуды, к которым относится развитое морское волнение, могут быть определены выражением

$$\epsilon = \frac{w^2}{g} r, \quad (14)$$

где r – радиус волны, $r = h/2$.

С учетом (14) формирующий фильтр угла волнового склона приобретает форму:

$$\Phi_{\epsilon\chi}(S) = \frac{-S^2 \sqrt{(1/2 + \sin^2 \chi) D_r \alpha (\alpha^2 + \beta^2)}}{g(S^2 + 2\alpha S + \alpha^2 + \beta^2)}. \quad (15)$$

При построении формирующих фильтров (13) и (15) для трехмерного морского волнения использован подход, предложенный А.В. Герасимовым [7] для определения дисперсии бортовой качки плавучего основания, расположенного лагом к волне, при воздействии двухмерного и трехмерного волнения.

В терминах пространства состояния [11, 12] формирующий фильтр угла волнового склона трехмерного морского волнения, действующего на плавучее основание, может быть получен на основании (15)

$$\dot{X}_\phi = A_\phi X_\phi + B_\phi V; \quad (16)$$

$$\epsilon_x = C_\phi X_\phi + D_\phi V, \quad (17)$$

$$\text{где } A_\phi = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -(\alpha^2 + \beta^2) & -2\alpha \end{pmatrix}, \quad X_\phi = \begin{pmatrix} x_{\phi 1} \\ x_{\phi 2} \end{pmatrix}; \quad B_\phi = \begin{pmatrix} 2\alpha \\ \beta^2 - 3\alpha^2 \end{pmatrix} \frac{\sqrt{(1 + 2 \sin^2 \chi) D_r \alpha (\alpha^2 + \beta^2)}}{g\sqrt{2}}; \quad C_\phi = (1 \quad 0);$$

$$D_{\phi} = \frac{-\sqrt{(1+2\sin^2\chi)D_r(\alpha^2+\beta^2)}}{g\sqrt{2}},$$

где V – белый шум; ε_{χ} – эквивалентный угол волнового склона для трехмерного морского волнения; $\alpha=0,21\beta$, $\beta=1,427h_{3\%}$, χ – угол между диаметральной плоскостью плавучего основания и генеральным направлением распространения бега волн; g – ускорение силы тяжести; D_r – дисперсия волновой ординаты; $h_{3\%}$ – высота волны 3 % обеспеченности.

В соответствии с [11] соотношение (16) представляет “сообщение”, а выражение (17) – “наблюдение” над динамическим объектом - взволнованной жидкостью.

Согласно гидродинамической теории качки судна на волнении, силы, воздействующие на плавучее основание, определяются зависимостями [6, 7]:

$$\begin{aligned} F_{\tilde{x}} = -\alpha_{\xi} V \rho g k r(t); F_{\tilde{y}} = -\alpha_{\zeta} V \rho g k r(t); F_{\tilde{z}} = -\alpha_{\varsigma} S g r(t); M_{\tilde{x}} = \alpha_{\theta} V h \rho g k r(t); \\ M_{\tilde{y}} = \alpha_{\psi} V H \rho g k r(t); M_{\tilde{z}} = \alpha_{\phi} V L \rho g k r(t), \end{aligned} \quad (18)$$

где α_{ξ} , α_{ζ} , α_{ς} , α_{θ} , α_{ψ} , α_{ϕ} – редуцированные коэффициенты поперечно-горизонтальной, продольно-горизонтальной, вертикальной, бортовой, килевой качки и рыскания соответственно; V – водоизмещение судна; ρ, g – удельная плотность воды и ускорение силы тяжести; k – волновое число, $k \equiv w^2/g$; S – площадь ватерлинии; h, H – малый и большой метацентрический радиусы судна; w – круговая частота волнения; $r(t)$ – ордината волнового профиля; t – время.

Согласно тем же источникам продольно-горизонтальные силы $F_{\tilde{x}}$ и соответствующие им смещения, вызываемые морским волнением, для достаточно удлиненных судов малы и обычно не учитываются. При определении главной части возмущающих сил корпуса таких судов могут быть представлены профилем крыла малого удлинения. Численный анализ показывает, что даже при волнении высотой 6 м (6 баллов), продольные смещения судов не превышают единиц сантиметров. Достаточно удлиненными считаются суда с отношением длины к ширине корпуса больше четырех. ПРМ относятся именно к таким типам вследствие большой длины плавучего основания.

Редуцированные коэффициенты могут быть определены либо путем испытания масштабных моделей в опытовых бассейнах, либо путем интегрирования расчетных полей давления во взволнованной жидкости.

Вывод. Полученное математическое описание позволяет учитывать статистические характеристики морского волнения при работе оборудования плавучих ремонтных мастерских.

Перспективы дальнейших исследований в данной области. Построенный формирующий фильтр необходим для синтеза системы автоматического управления технологическими процессами (САУТП) обработки изделий на металлорежущем оборудовании в условиях ПРМ.

Библиографический список использованной литературы

1. Владецкая Е.А. Повышение виброустойчивости шлифовальных станков плавучих ремонтных мастерских / Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХП», 2012. – Вып.7. – С. 103-111.
2. Братан С.М. Анализ влияния колебаний, передаваемых через фундамент станка, на качество процесса шлифования / С.М. Братан, Е.А. Владецкая // Вестник НТУ «ХПИ». Технологии в машиностроении: сб. науч. тр. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – № 35. – С. 13-22.
3. Волосенко Е.Б. К вопросу воздействия ветровой нагрузки на судно / Е.Б. Волосенко // Мореходность и управляемость судов. – Л.: Судостроение, 1988. – Вып.105. – С. 53-60.
4. Гофман А.Д. Теория и расчет поворотливости судов внутреннего плавания / А.Д. Гофман. – Л.: Судостроение, 1991. – 236 с.
5. Луговский В.В. Динамика моря / В.В. Луговский. – Л.: Судостроение, 1996. – 200 с.
6. Благовещенский С.Н. Справочник по статике и динамике корабля. Динамика (качка) корабля / С.Н. Благовещенский, А.Н. Холодили. – Л.: Судостроение, 1995. – 176 с.
7. Бородай И.К. Качка судов на морском волнении / И.К. Бородай, Ю.А. Нецветаев. – Л.: Судостроение, 1989. – 432 с.
8. Расщепляев Ю.С. Синтез моделей случайных процессов для исследования автоматических систем управления / Ю.С. Расщепляев, В.Н. Фандиенко. – М.: Энергия, 1991. – 145 с.
9. Сир Е.Б. Формирующие фильтры для случайных процессов / Е.Б. Сир // Современная теория автоматического управления / Под ред. К.Т. Леондеса. – М.: Мир, 1970. – С. 159-194.
10. Ветер и волны в океанах и морях. Справочные данные. – Л.: Транспорт, 1984. – 264 с.

11. Брамлер К. Фильтр Калмана-Бьюси. Детерминированные наблюдения и стохастическая фильтрация / К. Брамлер, Г. Зифлинг. – М.: Наука, 1982. – 200 с.

12. Сейдж Э.П. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении / Э.П. Сейдж. – М.: Связь, 1996. – 196 с.

Поступила в редакцию 08.01.2014 г.

Владецька К.О. Розробка формуючого фільтра, який моделює динаміку морського хвилювання плавучої ремонтної майстерні

Виконаний аналіз математичних моделей, що використовуються для опису морського хвилювання і його впливу на плавуче підставу судна, розроблений формуючий фільтр, що моделює динаміку морського хвилювання плавучої ремонтної майстерні, що дозволяє враховувати вплив зовнішнього середовища на технологічну систему верстатного механообробного обладнання.

Ключові слова: плавуча ремонтна майстерня, морське хвилювання, коливання, формуючий фільтр.

Vladetska E.A. Development of shaping filter, simulating dynamics of sea waves on floating repair shop

The analysis of the mathematical models used to describe the sea waves and its impact on the floating base of the vessel, developed shaping filter, simulating the dynamics of sea waves floating repair shop.

Keywords: floating repair shop, sea waves, oscillations, the shaping filter.