УДК 629.545.4:519.6
П 22

ЗАДАЧА БАЛЛАСТИРОВКИ ТРАНСПОРТНОЙ БАРЖИ ПРИ ПРИЕМЕ НА НЕЕ ТЯЖЕЛОГО ГРУЗА

А. Б. Пашаев, канд. физ.-мат. наук;
Э. Н. Сабзиев, канд. физ.-мат. наук

Компания «Kiber Ltd», г. Баку, Азербайджан

Аннотация. Рассмотрена задача балластировки транспортной баржи при приеме на нее тяжеловесных грузов. Построена математическая модель процесса приема груза. Приведены критерии оптимальности и сформулирована задача оптимального управления процессом.

Ключевые слова: прием груза, баржа, балластировка, математическая модель, управление.

Анотація. Розглянуто задачу баластування транспортної баржі при прийомі на неї великовагових вантажів. Побудовано математичну модель процесу прийому вантажу. Наведено критерії оптимальності і сформульовано задачу оптимального управління процесом.

Ключові слова: прийом вантажу, баржа, баластування, математична модель, управління.

Abstract. The ballasting problem of the transport barge during the heavy-weight cargo reception has been considered. The mathematical model of the reception process is designed. The optimality criteria are given and the optimal control problem of the process is formulated.

Keywords: cargo reception, barge, ballasting, mathematical model, control.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Рассматривается задача балластировки [3, 4] баржи в процессе приема на борт тяжелых грузов путем надвижки. Такая задача возникает, например, при транспортировке глубоководных морских оснований с места производства на место установки [1]. При приеме необходимо управлять балластом так, чтобы вес и моменты усилий принимаемого на борт объекта (груза) компенсировались весом и моментами балластной воды. Расположение балластных цистерн обусловлено конструкцией баржи. Точка приложения силы от балластной воды меняется в зависимости от количества воды в цистернах. Эта зависимость дается в виде таблицы и считается известной. Задача состоит в построении и обосновании математической модели описанного процесса.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Основным применением перевозки тяжелых грузов на транспортных баржах является перевозка различных конструкций и строений в готовом виде из места сборки на место установки на морском месторождении [1]. Например, перевозка опорных блоков с Бакинского завода глубоководных оснований на место установки (месторождение Азери-Чыраг-Гюнешли на Каспийском море) производилась при помощи транспортной баржи СТБ-1.

Начиная с 70-х годов XX века усовершенствовались технологии процесса погрузки и разгрузки тяжелых грузов на баржу. Одним из элементов этого процесса является балластировка баржи, представляющая собой процесс придания палубе баржи нужного угла по продольной (дифферент) и поперечной (крен) оси [5]. Известны различные алгоритмы управления состоянием как однокорпусной баржи, так и типа катамаран [6]. В предлагаемой работе приведена одна обобщающая модель, и в зависимости от выбора представленных критериев можно получить тот или иной способ балластировки баржи.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ – построение математической модели управления балластными цистернами для приема груза на баржу; оптимизация процесса при помощи математической модели; предложение алгоритма решения математической задачи.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Некоторые обозначения

Введем правую систему координат Oxy, размещая ее начало в середине на краю кормовой части (кормовой перпендикуляр); направим ось Ox вдоль центральной оси баржи, а ось Oy перпендикулярно к ней (рис. 1).

Координату переднего края объекта вдоль оси Ox обозначим через $s \geq 0$ (рис. 2). Предположим, что до начала процесса приема объекта баржа находится в равновесии, при этом $s = 0$. Предполагается, что для каждого $s > 0$ известна принятая на баржу масса $m(s)$ и координаты центра тяжести объекта $(x(s), y(s))$, вычисленные относительно системы координат Oxy. Следовательно, объект создает моменты усилия $m(s)x(s)$ и $m(s)y(s)$ относительно Oy и Ox.

Пронумеруем все цистерны $i = 1, 2, ..., n$, где n – общее количество цистерн. Обозначим через m_i^1 и m_i^2

соответственно минимальное и максимальное допустимое количество воды в i-ой цистерне. Также обозначим через m_i количество воды в i-ой цистерне.

Как было указано выше, координаты точки приложения балластной воды в зависимости от количества m_i задаются в виде функциональной зависимости $x_i = x_i(m_i)$, $y_i = y_i(m_i)$. Заметим, что функции $x_i(m_i)$, $y_i = y_i(m_i)$, $i = 1, 2, ..., n$ являются нелинейными функциями своих аргументов.

Наша цель – в зависимости от s управлять количеством воды в цистернах таким образом, чтобы компенсировать вес и моменты усилий, так чтобы баржа сохранила свою осадку, дифферент и крен. Для указания явной зависимости количества балластной воды в i-ой цистерне от параметра $s \geq 0$ вместо m_i будем писать $m_i(s)$.

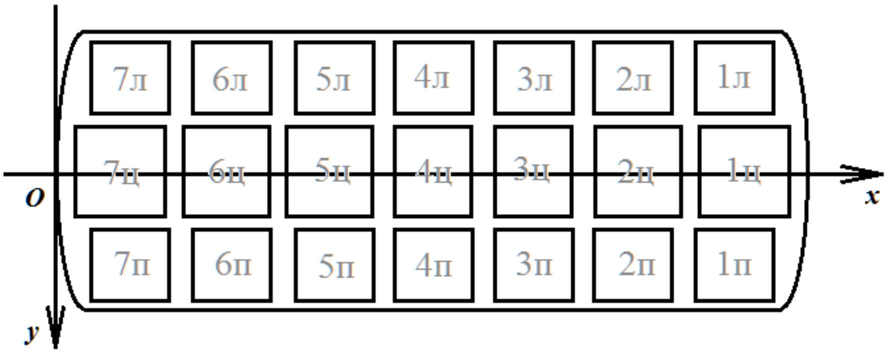

Рис. 1. Расположение балластных цистерн

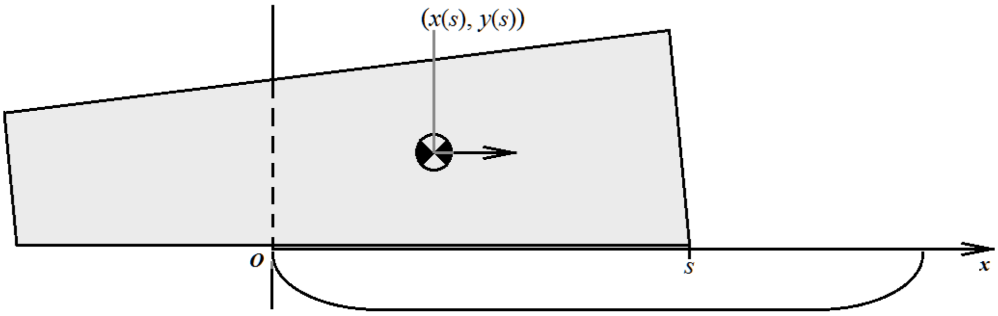

Рис. 2. Схема процесса

Очевидно, должно выполняться неравенство

$$m_i^1 \leq m_i(s) \leq m_i^2. \tag{1}$$

Дифференциальная модель

Пусть до начала приема в i-ой цистерне имеется вода в количестве m_i^0, т. е.

$$m_i(0) = m_i^0. \tag{2}$$

Для того чтобы баржа сохранила свою осадку в процессе приема, суммарное количество изменения массы объекта и количество изменения балластных вод во всех цистернах должны быть неизменными:

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{d}{ds} m_i(s) = -\frac{d}{ds} m(s). \tag{3}$$

Чтобы одновременно сохранился дифферент и крен баржи, сумма изменения моментов объекта (по x и y) и изменения моментов балластных вод во всех цистернах тоже должна быть неизменной:

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{d}{ds}\left(m_i(s) x_i(m_i(s))\right) = -\frac{d}{ds}\left(m(s) x(s)\right); \tag{4}$$

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{d}{ds}\left(m_i(s) y_i(m_i(s))\right) = -\frac{d}{ds}\left(m(s) y(s)\right). \tag{5}$$

Таким образом, задача балластировки объекта сведена к нахождению решения системы нелинейных уравнений (3)–(5) при начальных условиях (2) и ограничениях (1).

В реальных баржах количество цистерн n обычно бывает больше 3. И в принципе систему (3)–(5) можно считать недоопределенной и любое решение этой системы при ограничениях (1) может быть пригодным в качестве управления погрузкой. Поэтому естественно возникает вопрос о выборе одного оптимального решения для управления процессом.

Очевидно, в зависимости от предъявляемых дополнительных условий могут быть определены различные оптимальные решения. Предлагаем в качестве оптимального выбирать такое решение, при котором сумма квадратов расходов на управление будет минимальной. Поскольку расходы на перекачку воды из различных цистерн с определенной долей точности эквивалентны (пропорциональны) объему перекачиваемой воды, то предлагаемое условие может быть записано в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^{n}\int_{0}^{s}\left(\frac{d}{ds}m_i(s)\right)^2 ds \to \min . \qquad (6)$$

Дискретная модель

В инженерной практике прием груза на баржу осуществляют поэтапно, разделяя весь процесс на конечное число эпизодов. Пронумеруем эпизоды через $k = 1, 2, ..., N$, где N – общее количество эпизодов. Пусть k-й эпизод – это прием груза на позицию s_k. Для симметричности записей для $k = 0$ примем $s_0 = 0$. Обозначим $m_i^k \equiv m_i(s_k)$.

Предположим, что был осуществлен k-й эпизод и баржа находится в равновесии. Устойчивое управление на следующем $(k + 1)$-ом эпизоде означает, что необходимо найти такие m_i^{k+1}, чтобы удовлетворялись равенства:

$$\sum_{i=1}^{n} m_i^{k+1} = m(s_k) - m(s_{k+1}) + \sum_{i=1}^{n} m_i^k ; \qquad (7)$$

$$\sum_{i=1}^{n} m_i^{k+1} x_i(m_i^{k+1}) = m(s_k)x(s_k) - m(s_{k+1})x(s_{k+1}) + \sum_{i=1}^{n} m_i^k x_i(m_i^k) ; \qquad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{n} m_i^{k+1} y_i(m_i^{k+1}) = m(s_k)y(s_k) - m(s_{k+1})y(s_{k+1}) + \sum_{i=1}^{n} m_i^k y_i(m_i^k) . \qquad (9)$$

Уравнения (7)–(9) представляют собой недоопределенную систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных m_i^{k+1}, $k = 0, 1, ..., N - 1$. Для минимизации расходов на перекачку воды на каждом эпизоде следует выбирать такое решение (7)–(9), которое минимизирует следующий функционал:

$$\sum_{i=1}^{n}\left(m_i^{k+1} - m_i^k\right)^2 \to \min . \qquad (10)$$

Однако нетрудно заметить, что этот функционал не будет обеспечивать оптимальное управление по совокупности всех эпизодов. Последнее потребовало бы минимизации функционала:

$$\sum_{k=0}^{N-1}\sum_{i=1}^{n}\left(m_i^{k+1} - m_i^k\right)^2 \to \min . \qquad (11)$$

Задача (7)–(9), (11) является дискретным аналогом задачи (3)–(6).

Задача (7)–(9), (11) является нелинейной задачей математического программирования и может быть решена соответствующими методами, например методом возможных направлений [2].

ВЫВОДЫ

Процесс приема тяжелых грузов на транспортную баржу можно смоделировать как задачу оптимизации. При помощи полученной модели можно минимизировать объем перекачанной балластной воды и расходы. Модель также может быть применена для балластировки крановых судов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

[1] **Бугаенко, Б. А.** Плавучие сооружения океанотехники [Текст] / Б. А. Бугаенко, А. Ф. Галь. – Николаев : НУК, 2011. – 228 с.

[2] Введение в нелинейное программирование [Текст] / К.-Х. Эльстер, Р. Рейнгардт, М. Шойбле, Г. Донат ; пер. с нем. под ред. И. И. Еремина. – М. : Наука, 1985. – 264 с.

[3] Правила классификации и постройки морских судов [Текст] : в 3 т. Т. 1. – СПб. : РМРС, 2012. – 489 с.

[4] Справочник по теории корабля [Текст] : в 3 т. Т. 2. Статика судов. Качка судов / под ред. Я. И. Войткунского. – Л. : Судостроение, 1985. – 440 с.

[5] **Onno, A. J. Peters.** Hydrodynamic Behavior During Offshore Loading and Discharge [Text] / Onno A. J. Peters, René H. M. Huijsmans, Michel Seij // Offshore Technology Conference. – Houston, 2012. – P. 1917–1928.

[6] **Ralph, Louis Postma**. Spar Technology – Marine operations during transport and discharge of SPAR hulls [Text] / Louis Postma Ralph // Offshore Technology Conference. – Houston, 2009. – P. 2498–2506.

Надійшла до редколегії 03.06.13
Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
канд. техн. наук, проф. НУК А. Ф. Галь