

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДОКОВИХ ОПЕРАЦІЙ ПЛАВУЧОГО ДОКУ ДЛЯ МАЛОТОННАЖНИХ СУДЕН

УДК 681.5

КОНДРАТЕНКО Юрій Пантелійович

професор, доктор технічних наук, Заслужений винахідник України, професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського державного університету ім. П. Могили, професор кафедри комп'ютеризованих систем управління Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв, Фулбрайтівський професор у Клівлендському державному університеті, штат Огайо, США (2015-2016 рр.).

Наукові інтереси: інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень, інформаційні технології, системи автоматичного керування, комп'ютерні системи та компоненти, нечітка логіка.

E-mail: y_kondrat2002@yahoo.com; y_kondratenko@rambler.ru.

КОЗЛОВ Олексій Валерійович

кандидат технічних наук, старший викладач кафедри комп'ютеризованих систем управління Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

Наукові інтереси: автоматизація процесів керування, інформаційні технології, інтелектуальні регулятори.

E-mail: kozlov_ov@ukr.net; oleksiy.kozlov@nuos.edu.ua.

ТОПАЛОВ Андрій Миколайович

аспірант кафедри комп'ютеризованих систем управління Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

Наукові інтереси: автоматизація процесів керування, комп'ютеризовані системи управління.

E-mail: topalov_ua@ukr.net; andrii.topalov@nuos.edu.ua.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасний етап розвитку науки і техніки в суднобудівній галузі дозволяє будувати судна різного розміру та призначення. Для ремонтного обслуговування суден застосовують різні суднопідйомні споруди: сухі доки, плавучі доки, сліпи, елінги тощо. Плавучі доки, незважаючи на складність устрою і достатньо високу експлуатаційну вартість, широко поширені і в даний час є основним засобом підйому та ремонту суден. Первісна вартість і терміни їх будівництва, а також тривалість докових операцій значно менші в порівнянні з тими ж сухими доками. Плавучі доки більш мобільні, можуть використовуватися у відриві від судноремонтної бази,

дозволяють простіше проводити модернізацію [1,2].

За призначенням плавучі доки поділяють на: ремонтні – для великого аварійного та дрібного ремонту судна (профілактичного докування), передавальні, транспортні та спеціального призначення (доки-елінги, доки-матки, доки-бази). В незалежності від призначення того чи іншого плавучого доку операції спуску чи підняття судна представляють собою складні відповідальні процеси. Як правило, при виконанні докових операцій, власна вага судна передається через кільблоки палубі понтона, в результаті можуть відбутися нахили та порушення міцності

плавучого доку. Тому прогин, перегин і кути нахилу (крен і диферент) плавучого доку повинні знаходитися в межах допустимого діапазону, щоб забезпечити безпеку експлуатації суднопідйомної споруди.

Проведення докових операцій є складним технічним завданням, оскільки вони потребують контролю в режимі реального часу всіх робочих параметрів з високою точністю та своєчасним керуванням виконавчими механізмами плавучого доку. Будь-які „людські“ помилки можуть призвести до збільшення часу підняття або спуску судна і, відповідно, до зменшення економічної ефективності використання доку, а також, можливо, і до аварійних ситуацій як для доку, так і для самого судна. Причому у практиці експлуатації плавучих доків зустрічаються серйозні аварії та аварійні ситуації: затоплення доку, перелом веж, поява гофр на вежах і вм'ятин на стапель-палубі плавучого доку, аварійні крени суден при зануренні доку для їх виведення та ін. [2].

Складність сучасних плавучих суднопідйомних споруд, як технологічних об'єктів, обумовлює необхідність розробки спеціалізованих систем керування їх доковими операціями, ефективність яких значно зростає при функціонуванні в автоматичних режимах. Для дослідження ефективності даних систем автоматичного керування (САК) на стадії їх проектування доцільно використовувати методи математичного та комп'ютерного моделювання [3-5]. Аналітичне математичне та комп'ютерне моделювання в порівнянні з експериментальними та іншими підходами є ефективним та низько-вартісним інструментом.

В науково-технічній літературі є певна кількість публікацій стосовно автоматизації та математичного моделювання морських об'єктів. Математичний

опис різнотипних морських плавучих об'єктів та суден наведено та докладно розглянуто в роботах [6-14]. Зокрема, в [9] наведено математичне моделювання руху морських об'єктів, розглядаються задачі статистики та динаміки. В роботі [10], в свою чергу, описано застосування імітаційного моделювання безпосередньо при дослідженні систем керування доковими операціями плавучих доків. Кількість публікацій стосовно автоматизації плавучих доків різного призначення в науковій літературі обмежена [10,13,14], а задачі розробки адекватних математичних моделей для синтезу та дослідження САК доковими операціями плавучих доків на даний час залишаються предметом досліджень ряду наукових колективів як в Україні, так і за кордоном.

Метою даної статі є розробка математичної моделі плавучого доку як складного об'єкта керування та дослідження процесів проведення його різнотипних докових операцій.

1. ФУНКЦІОНАЛЬНА СТРУКТУРА ТА ОСНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛАВУЧОГО ДОКУ ЯК СКЛАДНОГО ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

Для ефективного функціонування та проведення докових операцій плавучий док має наступні системи: баластну, вакуумну, зачисну, вентиляційну та інші системи, що забезпечують роботу виконавчих механізмів і доку в цілому [15].

З перерахованих вище систем, що входять до складу плавучого доку, найбільш важливою для виконання докових операцій є саме баластна система, оскільки вона призначена для забезпечення занурення та спливання плавучого доку на певне задане значення його осадки, що є ключовим керованим параметром під час проведення докових операцій плавучого доку. Баластна система, в свою чергу, вклю-

чає в себе баластні насоси, трубопроводи наповнення та спорожнення, а також запірну арматуру (дискретні та лінійні клапани або регулятори витрати).

Схематичне зображення плавучого доку для малотоннажних суден [16] в трьох проєкціях наведено на рис. 1, де прийнято наступні позначення: ЛВ – ліва вежа плавучого

доку; ПВ – права вежа плавучого доку; a – ширина плавучого доку; b – довжина плавучого доку; c – ширина вежі плавучого доку (лівої або правої); d – висота понтона плавучого доку; h – висота вежі плавучого доку (лівої або правої); 1-10 – нумерація баластних танків плавучого доку.

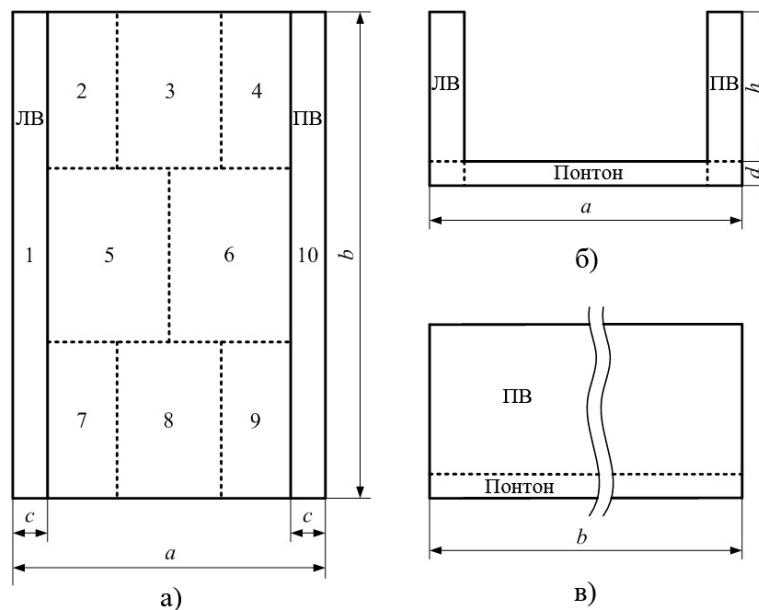


Рис. 1. Схематичне зображення плавучого доку для малотоннажних суден: а) вид зверху; б) вид спереду; в) вид збоку.

Даний плавучий док має 10 баластних танків і використовується для докування суден малої довжини (яхти, буксири і т.д.). Крім того плавучий док має наступні геометричні параметри: ширина $a = 49$ м; довжина $b = 60$ м; Ширина кожної вежі $c = 5$ м; висота понтону $d = 3$ м; висота кожної вежі $h = 22$ м. Причому максимальна вага доку з усім обладнанням складає 3000 тон, а максимальна вантажопідйомність становить 5000 тон [16].

Баластна система даного плавучого доку включає 12 баластних насосів з продуктивністю $1800 \text{ м}^3/\text{г}$ кожен, призначених для наповнення та спорожнення баластних танків, а також 20 автоматичних регулято-

рів витрати баластної води (АРВ) [16]. Для забезпечення занурення плавучого доку баластна система застосовує 6 насосів, трубопровід наповнення і 10 АРВ води для наповнення кожного з 10 баластних танків водою. Для спливання даного плавучого доку, в свою чергу, баластна система застосовує також 6 баластних насосів, трубопровід спорожнення і 10 АРВ води для спорожнення кожного з 10 баластних танків. Таким чином, кожен з 10 баластних танків оснащений двома АРВ для їх наповнення та спорожнення, відповідно.

Функціональна структура даного плавучого доку як об'єкта керування осадкою представлена на рис. 2, де прийняті такі

позначення: АРВ11, АРВ21, АРВ31, ..., АРВ101 – автоматичні регулятори витрати води лінії наповнення баластної системи доку; АРВ12, АРВ22, АРВ32, ..., АРВ102 – автоматичні регулятори витрати води лінії спустошення баластної системи доку; БТ1, БТ2, ..., БТ10 – баластні танки плавучого доку; ПД – плавучий док; КД – корпус плавучого доку; u_{C1} – сигнал керування АРВ11, АРВ21, АРВ31, ..., АРВ101; u_{C2} – сигнал керування АРВ12, АРВ22, АРВ32, ..., АРВ102; $P_{БН1}$, $P_{БН2}$ – вихідні значення тиску баластних насосів в трубопроводах наповнення і спорожнення, відповідно; $Q_{АРВ11}$, $Q_{АРВ12}$, ..., $Q_{АРВ102}$ – значення витрати баластної води відповідних автоматичних регуляторів витрати; $m_{ВБТ1}$, $m_{ВБТ2}$, ..., $m_{ВБТ10}$ – маса баластної води в відповідних баластних танках; $F_{НПД}$ – сила навантаження плавучого доку від докуемого судна; $H_{ПД}$ – значення осадки плавучого доку.

Керування поточним значенням осадки плавучого доку $H_{ПД}$ здійснюється за допомогою наповнення або спустошення баластних танків БТ доку. Насоси ліній наповнення та спустошення баластної системи даного доку працюють з постійною подачею та з певними значеннями вихідного тиску $P_{БН1}$, $P_{БН2}$. Плавне керування швидкістю наповнення БТ здійснюється за допомогою АРВ11, АРВ21, АРВ31, ..., АРВ101, які знаходяться в лінії наповнення баластної системи. Плавне керування спустошенням БТ, в свою чергу, здійснюється за допомогою АРВ12, АРВ22, АРВ32, ..., АРВ102, які знаходяться в трубопроводі спустошення баластної системи.

АРВ являє собою гідравлічний клапан з сервоприводом, що реалізує плавне автоматичне керування витратою баластної води $Q_{АРВ}$ в залежності від сигналів керування u_{C1} або u_{C2} (0...10 В). Таким чином, для занурення плавучого доку на входи АРВ11, АРВ21, АРВ31, ..., АРВ101 подається

додатний сигнал u_{C1} (від 0 до 10 В), а на входи АРВ12, АРВ22, АРВ32, ..., АРВ102 – нульовий сигнал u_{C2} (0 В). В свою чергу, для спливання плавучого доку на входи АРВ12, АРВ22, АРВ32, ..., АРВ102 подається додатний сигнал u_{C2} (0... 10 В), а на входи АРВ11, АРВ21, АРВ31, ..., АРВ101 – нульовий сигнал u_{C1} (0 В).

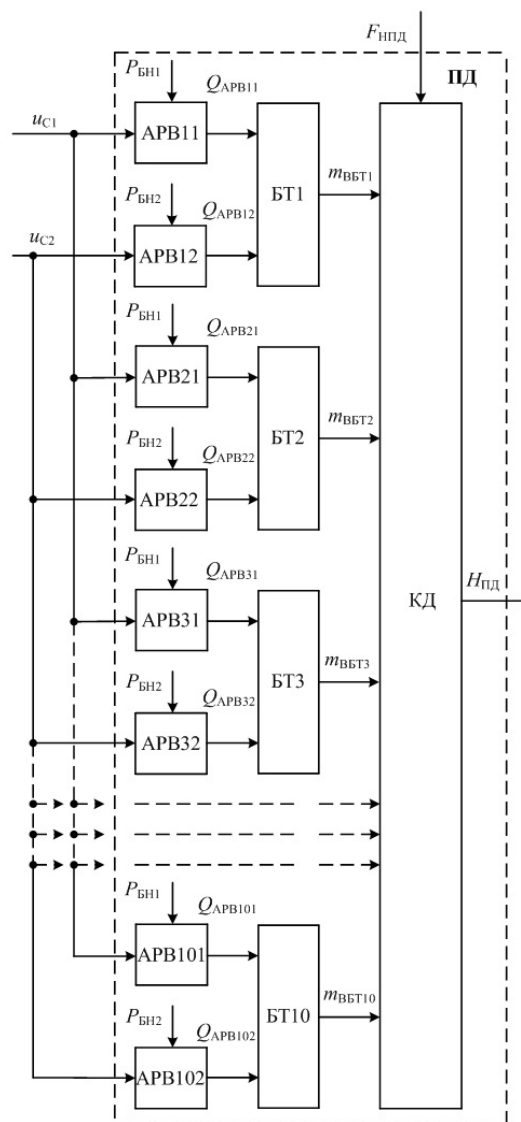


Рис. 2. Функціональна структура плавучого доку для малотоннажних суден як об'єкта керування осадкою

2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПЛАВУЧОГО ДОКУ ЯК СКЛАДНОГО ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

При формуванні математичної моделі плавучого доку як складного об'єкта керу-

вання доцільно здійснити розробку математичних моделей (а) АРВ як об'єктів керування витратою баластної води, (б) баластних танків БТ як об'єктів керування масою баластної води та (в) корпусу плавучого доку як об'єкта керування осадкою.

Математична модель АРВ. АРВ представляє собою гідравлічний клапан з сервоприводом, для математичного опису якого доцільно використовувати наступну передаточну функцію:

$$W_{АРВ}(p) = \frac{Q_{АРВ}(p)}{u_C(p)} = \frac{k_{АРВ}}{T_{АРВ}^2 p^2 + 2\zeta_{АРВ} T_{АРВ} p + 1}, \quad (1)$$

де $k_{АРВ}$, $T_{АРВ}$, $\zeta_{АРВ}$ – коефіцієнт підсилення, стала часу та коефіцієнт загасання АРВ, відповідно, які залежать від параметрів гідравлічного клапана та основних складових сервопривода (електродвигун, редуктор, підсилювач потужності, регулятор витрати і т.д.); p – оператор Лапласа.

Коефіцієнт підсилення $k_{АРВ}$ можна вважати константою через наявність зворотного зв'язку та оптимальні налаштування регулятора витрати, що входить до складу АРВ. Коефіцієнт загасання $\zeta_{АРВ}$ в основному залежить від параметрів регулятора витрати і при його оптимальних налаштуваннях може дорівнювати одиниці ($\zeta_{АРВ} = 1$). Стала часу залежить від параметрів гідравлічного клапана та сервопривода і може змінюватися при зміні значень вихідного тиску $P_{БН1}$, $P_{БН2}$ баластних насосів трубопроводів наповнення і спорожнення, відповідно.

Математична модель баластного танку. Для математичного моделювання докових операцій плавучого доку розглядається математична модель баластного танку як об'єкту керування рівнем та масою баластної води. Значення рівня води L_i в i -

му баластному танку розраховується за наступним рівнянням:

$$L_i = \frac{V_{ББТi}}{S_{БТi}} = \frac{1}{S_{БТi}} \int (Q_{АРБi1} - Q_{АРБi2}) dt = \frac{(Q_{АРБi1} - Q_{АРБi2})}{S_{БТi} p}, \quad (2)$$

де $V_{ББТi}$ – об'єм баластної води в i -му баластному танку; $S_{БТi}$ – площа основи i -го баластного танку. Таким чином, передаточну функцію баластного танку як об'єкту керування рівнем можна представити в наступному вигляді

$$W_{БТi}(p) = \frac{L_i(p)}{Q_{АРБi1}(p) - Q_{АРБi2}(p)} = \frac{1}{T_{БТi} p}, \quad (3)$$

де $T_{БТi}$ – стала часу передаточної функції i -го баластного танку, в числовому еквіваленті $T_{БТi} = S_{БТi}$.

Значення маси води $m_{ББТi}$ в i -му баластному танку розраховується за наступною формулою

$$m_{ББТi} = \rho_B V_{ББТi} = \rho_B \int (Q_{АРБi1} - Q_{АРБi2}) dt = \frac{\rho_B (Q_{АРБi1} - Q_{АРБi2})}{p}, \quad (4)$$

де ρ_B – густина баластної води. Таким чином, передаточну функцію баластного танку як об'єкту керування масою баластної води можна представити в наступному вигляді

$$W_{БТi}(p) = \frac{m_{ББТi}(p)}{Q_{АРБi1}(p) - Q_{АРБi2}(p)} = \frac{k_{БТ}}{p}, \quad (5)$$

де $k_{БТ}$ – коефіцієнт підсилення передаточної функції баластного танку який однаковий для всіх баластних танків плавучого доку, в числовому еквіваленті $k_{БТ} = \rho_B$.

У даній роботі доцільно використовувати передаточну функцію (5) в якості математичних моделей усіх баластних танків плавучого доку.

Математична модель корпусу плавучого доку. Схематичне зображення сил, діючих на корпус плавучого доку, що знаходиться у воді, наведено на рис. 3, де прийнято наступні позначення: ПШВ – поверхневий шар води; $F_{\text{ТПД}}$ – сила тяжіння, що

діє на корпус плавучого доку; $F_{\text{ВПД}}$ – сила виштовхування плавучого доку; $F_{\text{НПД}}$ – сила навантаження плавучого доку від судна, для якого здійснюється процес докування.

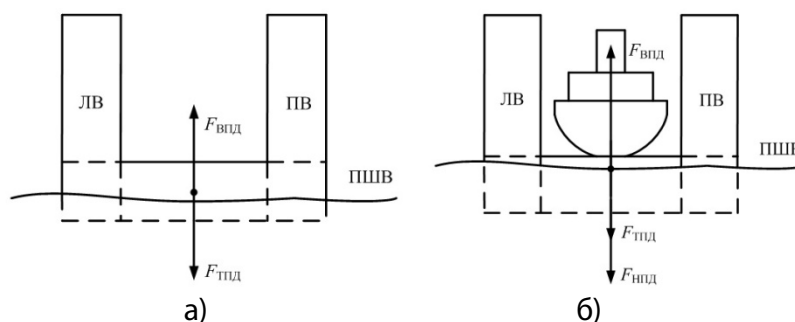


Рис. 3. Схематичне зображення корпусу плавучого доку у воді: а) без судна; б) з судном.

У статичному режимі сила тяжіння $F_{\text{ТПД}}$, що діє на корпус плавучого доку, який знаходиться у воді без судна (рис. 3, а), врівноважується силою виштовхування плавучого доку $F_{\text{ВПД}}$ [7,9]

$$F_{\text{ТПД}} = F_{\text{ВПД}} \quad (6)$$

В свою чергу, сила тяжіння $F_{\text{ТПД}}$ корпусу плавучого доку визначається загальною масою плавучого доку $m_{\text{ПДС}}$ та прискоренням вільного падіння g

$$F_{\text{ТПД}} = m_{\text{ПДС}} g \quad (7)$$

Загальна маса плавучого доку $m_{\text{ПДС}}$ складається із маси $m_{\text{ПД}}$ корпусу плавучого доку з усіма внутрішніми системами і обладнанням без баласту і маси $m_{\text{ВБТС}}$ баластної води у всіх баластних танках плавучого доку

$$m_{\text{ПДС}} = m_{\text{ПД}} + m_{\text{ВБТС}} \quad (8)$$

де маса $m_{\text{ВБТС}}$ води всіх баластних танків визначається наступним чином

$$\begin{aligned} m_{\text{ВБТС}} &= \sum_{i=1}^{10} m_{\text{ВБТ}i} = \quad (9) \\ &= m_{\text{ВБТ}1} + m_{\text{ВБТ}2} + m_{\text{ВБТ}3} + \dots + m_{\text{ВБТ}10} \end{aligned}$$

Отже, відповідно до рівнянь (7)-(9) сила тяжіння плавучого доку $F_{\text{ТПД}}$ може бути розрахована у наступному вигляді

$$\begin{aligned} F_{\text{ТПД}} &= \\ &= (m_{\text{ПД}} + m_{\text{ВБТ}1} + m_{\text{ВБТ}2} + m_{\text{ВБТ}3} + \dots + m_{\text{ВБТ}10}) g \quad (10) \end{aligned}$$

Сила виштовхування $F_{\text{ВПД}}$ корпусу плавучого доку складається з сили виштовхування $F_{\text{ВП}}$ понтону плавучого доку і сили виштовхування $F_{\text{ВВ}}$ обох веж плавучого доку, що занурені у воду

$$F_{\text{ВПД}} = F_{\text{ВП}} + F_{\text{ВВ}} = \rho_{\text{В}} g V_{\text{ППД}} + \rho_{\text{В}} g 2V_{\text{ВПД}} \quad (11)$$

де $V_{\text{ППД}}$ і $V_{\text{ВПД}}$ – об'єми занурених у воду понтону та однієї з веж плавучого доку, відповідно.

У свою чергу, сили виштовхування понтону $F_{\text{ВП}}$ і веж $F_{\text{ВВ}}$ мають наступні нелінійні залежності при зміні осадки $H_{\text{ПД}}$ плавучого доку

$$F_{ВП} = \begin{cases} \rho_B g S_{оп} H_{пд}, & \text{при } H_{пд} \leq H_{ппд}; \\ \rho_B g S_{оп} H_{ппд}, & \text{при } H_{пд} > H_{ппд}; \end{cases} \quad (12)$$

$$F_{ВВ} = \begin{cases} 0, & \text{при } H_{пд} \leq H_{ппд}; \\ \rho_B g 2S_{ов} (H_{пд} - H_{ппд}), & \text{при } H_{пд} > H_{ппд}, \end{cases} \quad (13)$$

де $S_{оп}$ – площа основи понтону плавучого доку, $S_{оп} = a \cdot b$ (рис. 1); $S_{ов}$ – площа основи однієї вежі плавучого доку, $S_{ов} = c \cdot b$ (рис. 1); $H_{ппд}$ – висота понтону плавучого

доку, $H_{ппд} = d$ (рис. 1). Площі $S_{оп}$, $S_{ов}$ і висота $H_{ппд}$ є сталими параметрами корпусу плавучого доку.

Залежність сили виштовхування $F_{ВПд}$ корпусу плавучого доку від його осадки $H_{пд}$ може бути сформульована на основі наведених вище рівнянь (11)-(13) наступним чином

$$F_{ВПд} = \begin{cases} \rho_B g S_{оп} H_{пд}, & \text{при } H_{пд} \leq H_{ппд}; \\ \rho_B g S_{оп} H_{ппд} + \rho_B g 2S_{ов} (H_{пд} - H_{ппд}), & \text{при } H_{пд} > H_{ппд}. \end{cases} \quad (14)$$

Крім того, залежність сили виштовхування $F_{ВПд}$ корпусу плавучого доку від його осадки $H_{пд}$ може приймати наступний вигляд:

$$F_{ВПд} = k_{ВПд} H_{пд}, \quad (15)$$

де $k_{ВПд}$ – нелінійний коефіцієнт, який показує кореляцію між силою виштовхування $F_{ВПд}$ і осадкою $H_{пд}$ плавучого доку.

У свою чергу, коефіцієнт $k_{ВПд}$ можна виразити з рівняння (14) у такий спосіб:

$$k_{ВПд} = \frac{F_{ВПд}}{H_{пд}} = \begin{cases} \frac{\rho_B g S_{оп} H_{пд}}{H_{пд}}, & \text{при } H_{пд} \leq H_{ппд}; \\ \frac{\rho_B g S_{оп} H_{ппд} + \rho_B g 2S_{ов} (H_{пд} - H_{ппд})}{H_{пд}}, & \text{при } H_{пд} > H_{ппд}. \end{cases} \quad (16)$$

Отже

$$k_{ВПд} = \begin{cases} \rho_B g S_{оп}, & \text{при } H_{пд} \leq H_{ппд}; \\ \rho_B g 2S_{ов} + \frac{\rho_B g H_{ппд} (S_{оп} - 2S_{ов})}{H_{пд}}, & \text{при } H_{пд} > H_{ппд}. \end{cases} \quad (17)$$

При наявності судна на палубі плавучого доку (рис. 3, б) рівняння сил, що діють на корпус плавучого доку в статичному режимі, буде мати вигляд:

$$F_{ТПд} + F_{НПд} = F_{ВПд}, \quad (18)$$

де $F_{НПд}$ – сила навантаження плавучого доку від судна, для якого здійснюється процес докування.

В свою чергу, сила навантаження $F_{НПд}$ визначається наступним чином

$$F_{НПд} = m_C g - F_{ВС}, \quad (19)$$

де m_C – маса судна, що перебуває в плавучому доці; $F_{ВС}$ – сила виштовхування, що діє на занурене у воду судно. Силу виштовхування $F_{ВС}$ можна розрахувати за наступним рівнянням

$$F_{ВС} = \rho_B g V_C (H_C) = \rho_B g k_C H_C, \quad (20)$$

де V_C – об'єм витісненої води від зануреного у воду корпусу судна; H_C – осадка судна; k_C – нелінійний коефіцієнт, який виражає залежність між осадкою судна H_C і об'ємом зануреного у воду корпусу судна V_C , що залежить від геометрії судна.

Значення осадки H_c судна, що встановлене на плавучому доці, може бути розраховане на основі значення осадки плавучого доку $H_{пд}$, при $H_{пд} > H_{пдд}$ наступним чином

$$H_c = H_{пд} - H_{пдд}, \quad (21)$$

Отже, сила виштовхування $F_{вс}$ судна залежить від осадки плавучого доку $H_{пд}$ при $H_{пд} > H_{пдд}$ і може мати такий вигляд

$$F_{вс} = \rho_v g k_c (H_{пд} - H_{пдд}) = k'_c (H_{пд} - H_{пдд}), \quad (22)$$

де k'_c – універсальний нелінійний коефіцієнт, що виражає залежність між осадкою плавучого доку $H_{пд}$ і силою виштовхування судна $F_{вс}$.

У свою чергу,

$$F_{пдд} = (m_{пд} + m_{вбт1} + m_{вбт2} + m_{вбт3} + \dots + m_{вбт10} + m_c) a_{пд} = m_{\Sigma} \frac{d^2 H_{пд}}{dt^2}, \quad (25)$$

де $a_{пд}$ – прискорення плавучого доку при зануренні або спливанні; m_{Σ} – загальна маса плавучого доку і судна, яка складається з маси корпусу $m_{пд}$ плавучого доку, маси баластної води $m_{вбт\Sigma}$ всіх баластних танків і маси судна m_c .

Гідродинамічна сила опору $F_{гпд}$ корпусу плавучого доку визначається наступним чином [17]

$$F_{гпд} = k_r \rho_v S_{\Gamma} \frac{v_{пд}^2}{2} = 0.5 k_r \rho_v S_{\Gamma} \left(\frac{dH_{пд}}{dt} \right)^2, \quad (26)$$

де k_r – нелінійний коефіцієнт гідродинамічного опору корпусу плавучого доку, який залежить від форми корпусу плавучого доку і може бути визначений експериментально [17]; S_{Γ} – площа поверхні корпусу плавучого доку, на яку діє гідродинамічна сила опору $F_{гпд}$ під час занурення та спливання плавучого доку; $v_{пд}$ – шви-

$$k'_c = \begin{cases} 0, & \text{при } H_{пд} \leq H_{пдд}; \\ \rho_v g k_c, & \text{при } H_{пд} > H_{пдд}. \end{cases} \quad (23)$$

У динамічному режимі рівняння (18) приймає наступний вигляд

$$F_{гпд} + F_{пдд} = F_{пд} + F_{гпд} + F_{втпд} + F_{впд}, \quad (24)$$

де $F_{пд}$ – сила інерції, що впливає на корпус плавучого доку під час руху з прискоренням; $F_{гпд}$ – сила гідродинамічного опору води, що впливає на нижню і верхню площі понтону плавучого доку під час занурення і спливання; $F_{втпд}$ – сила в'язкого тертя води, що впливає на понтон і бічні стінки веж плавучого доку під час занурення і спливання.

У свою чергу, сила інерції $F_{пд}$ розраховується за наступним рівнянням

діксть плавучого доку при зануренні та спливанні. Крім того, гідродинамічна сила опору $F_{гпд}$ залежить від осадки $H_{пд}$ плавучого доку. Коли плавучий док занурюється, та його швидкість $\frac{dH_{пд}}{dt}$ додатна – площа поверхні $S_{\Gamma} = S_{оп}$. Коли плавучий док спливає, швидкість $\frac{dH_{пд}}{dt}$ від'ємна, а осадка $H_{пд}$ більша ніж висота понтону $H_{пдд}$ – площа поверхні $S_{\Gamma} = S_{оп} - 2S_{ов}$. Проте в тому випадку, коли плавучий док спливає, швидкість $\frac{dH_{пд}}{dt}$ від'ємна, а його осадка $H_{пд}$ менша висоти понтону $H_{пдд}$ – площа поверхні $S_{\Gamma} = 0$. Таким чином, залежність площі поверхні S_{Γ} від швидкості плавучого доку при зануренні чи спливанні, а також від його осадки може бути представлена наступним чином

$$S_{\Gamma} = \begin{cases} S_{\text{оп}}, & \text{при } \frac{dH_{\text{пд}}}{dt} > 0; \\ S_{\text{оп}} - 2S_{\text{ов}}, & \text{при } \frac{dH_{\text{пд}}}{dt} < 0 \text{ та } H_{\text{пд}} > H_{\text{пдд}}; \\ 0, & \text{при } \frac{dH_{\text{пд}}}{dt} < 0 \text{ та } H_{\text{пд}} \leq H_{\text{пдд}}. \end{cases} \quad (27)$$

$$F_{\text{гпд}} = k_{\text{гпд}} \left(\frac{dH_{\text{пд}}}{dt} \right)^2, \quad (28)$$

Крім того, залежність гідродинамічної сили опору корпусу плавучого доку $F_{\text{гпд}}$ від швидкості занурення або спливання $\frac{dH_{\text{пд}}}{dt}$ можна представити наступним чином [17]

де $k_{\text{гпд}}$ – нелінійний коефіцієнт, який показує співвідношення між гідродинамічною силою опору $F_{\text{гпд}}$ і швидкістю занурення або спливання плавучого доку $\frac{dH_{\text{пд}}}{dt}$.

У свою чергу, коефіцієнт $k_{\text{гпд}}$ може бути виражений з рівнянь (26) і (27) у такий спосіб:

$$k_{\text{гпд}} = \begin{cases} 0.5k_{\Gamma} \rho_{\text{в}} S_{\text{оп}}, & \text{при } \frac{dH_{\text{пд}}}{dt} > 0; \\ 0.5k_{\Gamma} \rho_{\text{в}} (S_{\text{оп}} - 2S_{\text{ов}}), & \text{при } \frac{dH_{\text{пд}}}{dt} < 0 \text{ та } H_{\text{пд}} > H_{\text{пдд}}; \\ 0, & \text{при } \frac{dH_{\text{пд}}}{dt} < 0 \text{ та } H_{\text{пд}} \leq H_{\text{пдд}}. \end{cases} \quad (29)$$

Сила в'язкого тертя води $F_{\text{втпд}}$, що діє на бічні стінки понтону і веж плавучого доку під час його занурення чи спливання, визначається наступним чином [18,19]

$$F_{\text{втпд}} = \frac{k_{\text{вт}} \mu_{\text{в}} S_{\text{вт}} \nu_{\text{пд}}}{l_{\text{вт}}} = \frac{k_{\text{вт}} \mu_{\text{в}} S_{\text{вт}}}{l_{\text{вт}}} \cdot \frac{dH_{\text{пд}}}{dt}, \quad (30)$$

де $k_{\text{вт}}$ – нелінійний коефіцієнт в'язкого тертя води об корпус плавучого доку, який залежить від форми поверхні і шорсткості бічних стінок понтону і веж плавучого доку (визначається експериментально) [18]; $\mu_{\text{в}}$ –

динамічний коефіцієнт в'язкості води; $S_{\text{вт}}$ – площа поверхні бічних стінок понтону і веж плавучого доку, на яку діє сила тертя $F_{\text{втпд}}$ під час занурення чи спливання; $l_{\text{вт}}$ – ширина граничного шару води, який прилягає до бічних стінок корпусу плавучого доку.

Площа поверхні бічних стінок понтону і веж плавучого доку $S_{\text{вт}}$, на яку впливає сила в'язкого тертя $F_{\text{втпд}}$, залежить від осадки плавучого доку $H_{\text{пд}}$, зокрема:

$$S_{\text{вт}} = \begin{cases} l_{\text{оп}} H_{\text{пд}}, & \text{при } H_{\text{пд}} \leq H_{\text{пдд}}; \\ l_{\text{оп}} H_{\text{пдд}} + 2l_{\text{ов}} (H_{\text{пд}} - H_{\text{пдд}}), & \text{при } H_{\text{пд}} > H_{\text{пдд}}, \end{cases} \quad (31)$$

де $l_{\text{оп}}$ – довжина периметру основи понтона плавучого доку, $l_{\text{оп}} = 2(a + b)$; $l_{\text{ов}}$ – довжина периметру основи однієї вежі плавучого доку, $l_{\text{ов}} = 2(c + b)$ (рис. 1).

Крім того, залежність сила в'язкого тертя $F_{\text{втпд}}$ об корпус плавучого доку від шви-

дкості його занурення $\frac{dH_{\text{пд}}}{dt}$ чи спливання має наступний вигляд [18]

$$F_{\text{втпд}} = k_{\text{втпд}} \frac{dH_{\text{пд}}}{dt}, \quad (32)$$

де $k_{\text{ВТПД}}$ – нелінійний коефіцієнт, який показує кореляцію між силою в'язкого тертя $F_{\text{ВТПД}}$ і швидкістю занурення чи спливання $\frac{dH_{\text{ПД}}}{dt}$ плавучого доку.

У свою чергу, коефіцієнт $k_{\text{ВТПД}}$ можна виразити з рівнянь (30) і (31) у такий спосіб:

$$k_{\text{ВТПД}} = \begin{cases} \frac{k_{\text{ВТ}} \mu_{\text{В}} l_{\text{ОП}} H_{\text{ПД}}}{l_{\text{ВТ}}}, & \text{при } H_{\text{ПД}} \leq H_{\text{ПДП}}; \\ \frac{k_{\text{ВТ}} \mu_{\text{В}} (l_{\text{ОП}} H_{\text{ПДП}} + 2l_{\text{ОВ}} (H_{\text{ПД}} - H_{\text{ПДП}}))}{l_{\text{ВТ}}}, & \text{при } H_{\text{ПД}} > H_{\text{ПДП}}. \end{cases} \quad (33)$$

Після підстановки рівнянь (7), (15), (19), (22), (25), (28) і (32) в рівняння (24) отримаємо новий вираз наступного вигляду

$$m_{\text{ПДС}} g + (m_{\text{С}} g - k_{\text{С}} (H_{\text{ПД}} - H_{\text{ПДП}})) = m_{\Sigma} \frac{d^2 H_{\text{ПД}}}{dt^2} + k_{\text{ГПД}} \left(\frac{dH_{\text{ПД}}}{dt} \right)^2 + k_{\text{ВТПД}} \frac{dH_{\text{ПД}}}{dt} + k_{\text{ВПД}} H_{\text{ПД}}. \quad (34)$$

Таким чином, рівняння (8), (9), (17), (23), (25), (29), (33), (34) утворюють динамічну математичну модель корпусу плавучого доку як об'єкта керування осадкою.

При відсутності судна в плавучому доці сила навантаження $F_{\text{НПД}} = 0$ і рівняння (34) приймає вигляд

$$m_{\text{ПДС}} g = m_{\Sigma} \frac{d^2 H_{\text{ПД}}}{dt^2} + k_{\text{ГПД}} \left(\frac{dH_{\text{ПД}}}{dt} \right)^2 + k_{\text{ВТПД}} \frac{dH_{\text{ПД}}}{dt} + k_{\text{ВПД}} H_{\text{ПД}}. \quad (35)$$

У свою чергу, рівняння (35) можна представити у такий спосіб:

$$m_{\text{ПДС}} g = m_{\Sigma} \frac{d^2 H_{\text{ПД}}}{dt^2} + k_{\text{ГПД}} \frac{dH_{\text{ПД}}}{dt} \cdot \frac{dH_{\text{ПД}}}{dt} + k_{\text{ВТПД}} \frac{dH_{\text{ПД}}}{dt} + k_{\text{ВПД}} H_{\text{ПД}}, \quad (36)$$

а після перетворення рівняння (36) за Лапласом воно приймає наступний вигляд

$$m_{\text{ПДС}} g(p) = m_{\Sigma} p^2 H_{\text{ПД}}(p) + \left(k_{\text{ГПД}} \frac{dH_{\text{ПД}}}{dt} + k_{\text{ВТПД}} \right) p H_{\text{ПД}}(p) + k_{\text{ВПД}} H_{\text{ПД}}(p). \quad (37)$$

Отже, передаточна функція корпусу плавучого доку має такий вигляд

$$W_{\text{ПД}}(p) = \frac{H_{\text{ПД}}(p)}{m_{\text{ПДС}} g(p)} = \frac{1}{m_{\Sigma} p^2 + \left(k_{\text{ГПД}} \frac{dH_{\text{ПД}}}{dt} + k_{\text{ВТПД}} \right) p + k_{\text{ВПД}}}. \quad (38)$$

У свою чергу, передаточна функція (38) може бути перетворена в такий спосіб:

$$W_{\text{ПД}}(p) = \frac{1/k_{\text{ВПД}}}{\frac{m_{\Sigma}}{k_{\text{ВПД}}} p^2 + \left(\frac{k_{\text{ГПД}} dH_{\text{ПД}}/dt + k_{\text{ВТПД}}}{k_{\text{ВПД}}} \right) p + 1} = \frac{k_{\text{ПД}}}{T_{\text{ПД}} p^2 + 2\zeta_{\text{ПД}} T_{\text{ПД}} p + 1}, \quad (39)$$

де $k_{\text{пд}}$, $T_{\text{пд}}$, $\zeta_{\text{пд}}$ – нелінійні і нестационарні параметри передаточної функції корпусу плавучого доку.

Коефіцієнт підсилення $k_{\text{пд}}$ передаточної функції (39) визначається наступним чином

$$k_{\text{пд}} = \frac{1}{k_{\text{впд}}} \quad (40)$$

Часовий параметр $T_{\text{пд}}$ розраховується за формулою (41)

$$T_{\text{пд}} = \sqrt{\frac{m_{\Sigma}}{k_{\text{впд}}}} \quad (41)$$

Що стосується коефіцієнта загасання $\zeta_{\text{пд}}$ його можна знайти з наступного рівняння

$$\zeta_{\text{пд}} = \frac{k_{\text{гпд}} dH_{\text{пд}}/dt + k_{\text{впд}}}{2\sqrt{k_{\text{впд}}m_{\Sigma}}} \quad (42)$$

На рис. 4 представлена функціональна структура математичної моделі плавучого доку як об'єкта керування осадкою, синтезована на основі вищенаведених математичних моделей АРВ, баластних танків та корпусу плавучого доку.

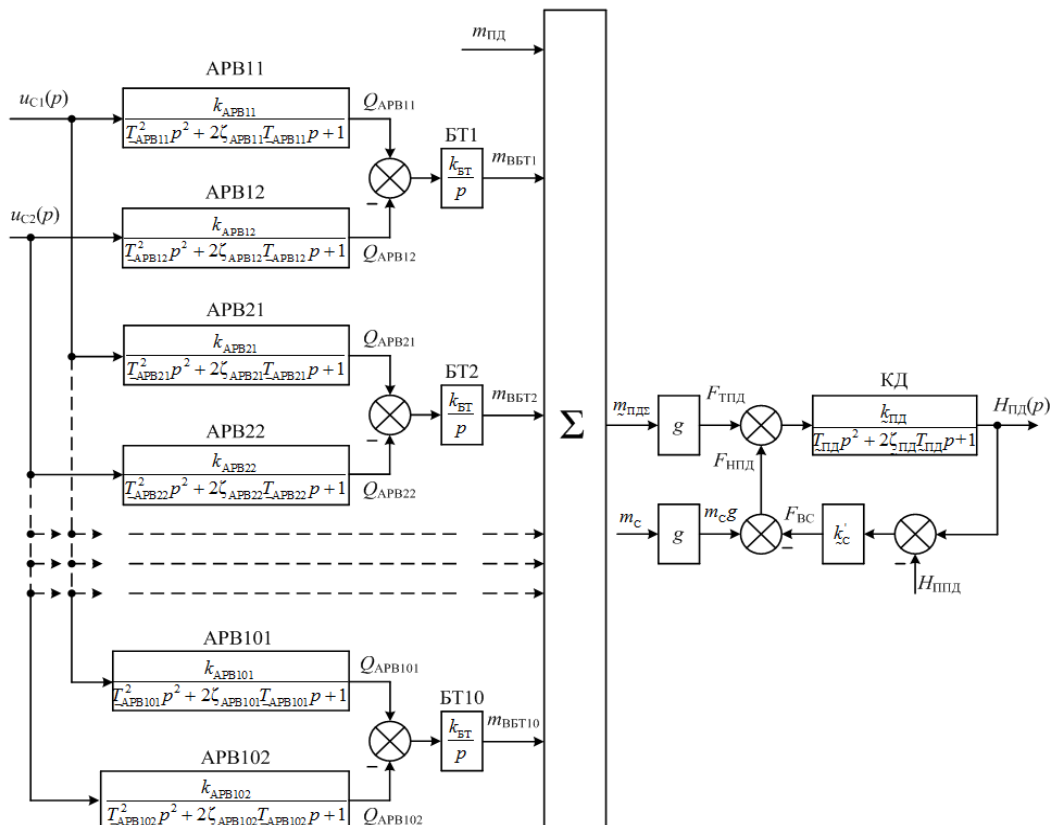


Рис. 4. Функціональна структура математичної моделі плавучого доку як об'єкта керування осадкою

3. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДОКОВИХ ОПЕРАЦІЙ ПЛАВУЧОГО ДОКУ

За допомогою розробленої математичної моделі плавучого доку як об'єкта керу-

вання осадкою (рис. 4) проведено комп'ютерне моделювання основних докових операцій плавучого доку: занурення без судна, спливання без судна, занурення

з судном, спливання з судном. Моделювання перехідних процесів проводилося для плавучого доку [16], призначеного для малотоннажних суден (максимальна вага і осадка судна, встановленого в плавучому доку складають 3000 тон і 5 м, відповідно) з максимальною вантажопідйомністю 5000 тон і вагою доку 3000 тон. Крім того моделювання проводилося при сталій продуктивності кожного баластного насосу $Q = 1800 \text{ м}^3/\text{год}$ та при сталій температурі і густини баластної води $T = 20^\circ\text{C}$, $\rho_B = 1020 \text{ кг/м}^3$, відповідно. Результати комп'ютерного моделювання у вигляді графіків перехідних процесів занурення

плавучого доку до значення осадки 8,5 м наведені на рис. 5, де прийнято наступні позначення: t_{31} – час занурення понтону плавучого доку з судном ($H_{\text{пд}} = 3 \text{ м}$); t_{32} – час занурення понтону плавучого доку без судна ($H_{\text{пд}} = 3 \text{ м}$); t_{33} – час занурення плавучого доку до осадки 8 м (у випадку з судном відбувається від'єднання судна від докових опор плавучого доку); t_{311} , t_{312} – моменти часу, в які починається поступове закриття АВР лінії наповнення БТ при зануренні плавучого доку з судном та без судна, відповідно.

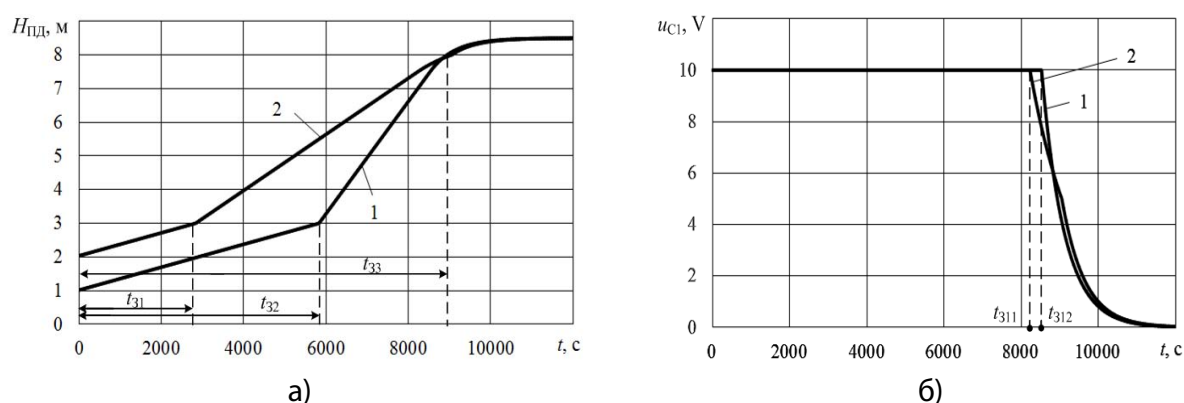


Рис. 5. Перехідні процеси: а) занурення плавучого доку: 1 – без судна, 2 – з судном; б) зміни керуючого сигналу u_{c1} : 1 – без судна, 2 – з судном.

З графіків перехідних процесів (рис. 5, а) видно, що початкова осадка плавучого доку без баласту в усіх БТ без судна складає 1,04 м, а з судном – 2,04 м. Процес занурення плавучого доку проходить повільно до тих пір поки понтон не зануриться у воду ($H_{\text{пд}} = 3 \text{ м}$), час занурення понтону для плавучого доку з судном $t_{31} = 2900 \text{ с.}$, без судна $t_{32} = 5900 \text{ с.}$ Після занурення понтону, процес пришвидшується і вже при $t_{33} = 5900 \text{ с}$ плавучий док в незалежності з судном чи без досягає осадки у 8 м, де у випадку плавучого доку з судном відбувається від'єднання судна від докових опор. Процес занурення плавучого доку продо-

вжується до кінцевого значення осадки $H_{\text{пд}} = 8,5 \text{ м}$. Процес занурення плавучого доку супроводжується поступовою зміною керуючого сигналу u_{c1} (рис. 5, б), що в процесі призводить до зміни витрати баластної води через АВР лінії наповнення БТ. В початковому положенні, при зануренні плавучого доку, всі АВР лінії наповнення повністю відкриті ($u_{c1} = 10 \text{ В}$), початок закриття АВР для плавучого доку з судном відбувається в момент часу $t_{311} = 8300 \text{ с}$, а для випадку без судна – в момент часу $t_{312} = 8500 \text{ с}$. Повне закриття АВР лінії наповнення ($u_{c1} = 0 \text{ В}$) для плавучого доку з судном чи без відбувається на 12000 с.

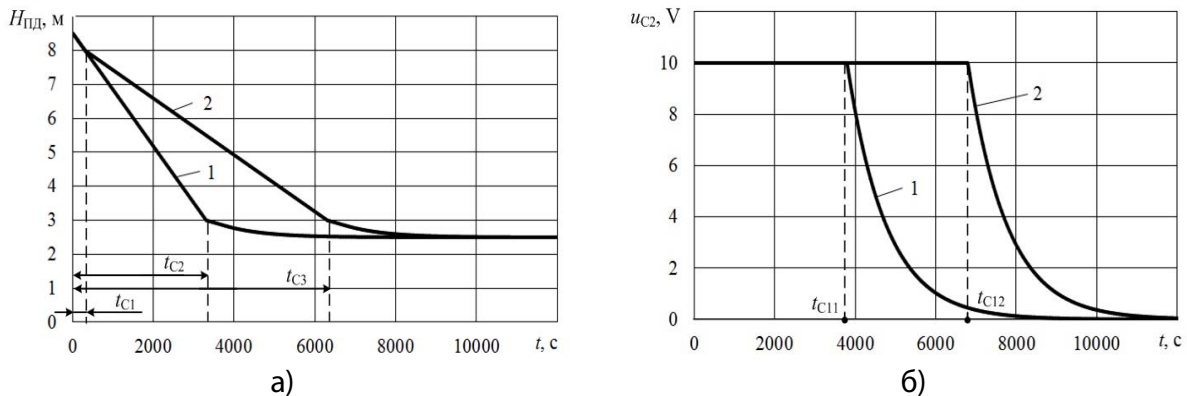


Рис. 6. Перехідні процеси: а) спливання плавучого доку: 1 – без судна, 2 – з судном;
б) зміни керуючого сигналу u_{C2} : 1 – без судна, 2 – з судном.

Результати комп'ютерного моделювання у вигляді графіків перехідних процесів спливання плавучого доку з 8,5 м до 2,5 м наведені на рис. 6, де прийнято наступні позначення: t_{C1} – час спливання плавучого доку до осадки 8 м (у випадку з судном відбувається постановка судна на докові опори плавучого доку); t_{C2} – час спливання плавучого доку без судна до рівня понтону ($H_{пд} = 3$ м); t_{C3} – час спливання плавучого доку з судном до рівня понтону ($H_{пд} = 3$ м); t_{C11} , t_{C12} – моменти часу, в які починається поступове закриття АВР лінії спустошення БТ при спливанні плавучого доку без судна та з судном, відповідно.

З графіків перехідного процесу (рис. 6, а) видно, що початкова осадка плавучого доку складає 8,5 м. Спливання плавучого доку до осадки 8 м проходить за час $t_{C1} = 500$ с, після чого відбувається постановка судна на опори доку (для випадку спливання з судном). Процеси спливання плавучого доку з 8 м до 3 м з судном і без суттєво відрізняються: час спливання до рівня понтону без судна $t_{C2} = 3500$ с, з судном $t_{C3} = 6500$ с. Після спливання плавучого доку до рівня палуби понтону, процеси спливання в обох випадках значно сповільнюються. Процес спливання плавучого доку супроводжується поступовою зміною керуючого сигналу u_{C2} (рис. 6, б), що

призводить до зміни витрати баластної води через АВР лінії спустошення БТ доку. В початковому положенні, при спливанні плавучого доку, всі АВР лінії спустошення відкриті ($u_{C2} = 10$ В), початок закриття даних АВР для плавучого доку без судна відбувається на 3800 с, а для випадку з судном – на 6800 с. Повне закриття АВР лінії спустошення ($u_{C2} = 0$ В) для плавучого доку з судном чи без відбувається на 12000 с.

Таким чином, результати комп'ютерного моделювання перехідних процесів занурення та спливання плавучого доку з судном та без (рис. 5, рис. 6) показують, що розроблена авторами математична модель в достатньо повній мірі відображає основні властивості реального плавучого доку, як складного об'єкта керування з суттєво нелінійними характеристиками.

ВИСНОВКИ

В даній роботі представлена розробка математичної моделі плавучого доку, як складного об'єкта керування та проведено дослідження його різноманітних докових операцій.

Запропонована математична модель дає змогу досліджувати поведінку даного об'єкта керування в усталеному та перехід-



дному режимом, зокрема розраховувати поточне значення його осадки при моделюванні наступних докових операцій: занурення без судна, спливання без судна, занурення з судном, спливання з судном. Аналіз отриманих результатів комп'ютерного моделювання у вигляді графіків перехідних процесів занурення та спливання плавучого доку показує, що розроблена авторами математична модель в достатньо повній мірі відображає

основні властивості реального плавучого доку, як складного об'єкта керування з суттєво нелінійними характеристиками.

Отримана математична модель може бути застосована в подальших наукових дослідженнях при синтезі функціональних структур, керуючих пристроїв та програмно-апаратних засобів реалізації САК доковими операціями різнотипних плавучих доків.

ЛІТЕРАТУРА

1. Rashkovskii O.S., Prudyvus, V.P., Schedrolosev O.V., Uzlov O. M. Osnovy proektuvannya plavuchykh dokiv. – Mykolayiv: RAL-polihrafiya, 2011. – 232 s.
2. Pavlov P.Y., Ragulin A.N. Effektivnost ekspluatatsii dokov. – M: Transport, 1987. – 176 s.
3. Golubeva N.V. Matematicheskoe modelirovanie sistem and protsessov. SPb – Lan, 2013. – 192 s.
4. Buslenko J. J. Modelirovanie slozhnykh sistem. – M.: Nauka, 1978. – 400 s.
5. Sharudaa V.G. Praktikum of teoriiy avtomatichnoho upravlinnya. – Dnipropetrovsk: NSU, 2002. – 414 s.
6. Vahuschenko L.L. Sudno kak obekt avtomaticheskoho upravleniya. – Odessa: OHMA, 2000. – 140 s.
7. Freydzon J. R. Matematicheskoe modelirovanie avtomaticheskoho upravleniya system na sudah. L: Sudostroenye, 1969 – 488 s.
8. Vahuschenko L.L., Tsybmal N.N. Sistemy avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem sudna. – Odessa: Latstar, 2002. – 310 s.
9. Bolshev A.S., Mikhaleiko E.B., Frolov S.A. Matematicheskoe modelirovanie povedeniya morskikh plavuchih sooruzheniy [Electronnyj resurs], URL: http://esg.spb.ru/files/content/files/All/AS_2006.pdf
10. Zhukov Y.D., Ivanchenko A.T. Ispolzovanie imitatsionnogo modelirovaniya v avtomatizirovannykh upravlyayuschih sistemah plavuchih dokov // Naukovi pratsi. Naukovo-metodychnyy zhurnal ChDU im. P. Mohyly. – 2007. – tom 61, № 48. – S. 20-25.
11. Chapchay E.P. Imitatsionnoe modelirovanie povorotlivosti sudna s uchetoм eksperimentalnykh dannykh // Vodniy transport. – 2014. – № 2. – S. 79-83.
12. Osovsky D.I., Efimov O.E. Matematicheskoe modelirovanie dinamiki sudna so struynoy mehanizatsiye rulovogo kompleksa // Rybne gospodarstvo Ukrainy. – 2013. – № 5. – S. 35-39.
13. Kondratenko Y.P., Kozlov A.V., Korobko A.V., Topalov A.M., Atamanyuk I.P. Kompyuteryzovana systema kontrolyu i upravlinnya parametramy plavuchoho doku // Problemy stvorennya, vyprovuvannya, zastosuvannya i ekspluatatsiyi skladnykh informatsiynykh sistem. – 2015. – №12 – S. 118-129.
14. Topalov A., Kozlov O., Kondratenko Y. Control Processes of Floating Docks Based on SCADA Systems with Wireless Data Transmission // Perspective Technologies and Methods in MEMS Design: Proceedings of the International Conference MEMSTECH 2016. – 2016. – P. 57-61.
15. Lovyagin M.A., Korsakov V.M., Kaganer J.B., i dr. Metallicheskie plavuchie doki. – L.: Sudostroenie, 1964. – 336 s.
16. Floating dock specification [Electronnyj resurs], URL: <https://www.yumpu.com/en/document/view/27611472/floating-dock-specification/5>.
17. Voytkunsky, Y.I. Soprotivlenie dvizheniyu sudov. – Leningrad: Sudostroenie, 1988. – 286 s.
18. Blintsov V.S., Magoula V.E. Proektirovanie samohodnykh privyaznykh podvodnykh sistem. – K.: Naukova Dumka, 1997. – 140 s.
19. Lukomsky Y.A., Peshekhonov V.G., Skorohodov D.A. Navigation i upravlenie dvizheniem sudov. SPb – Elmore, 2002. – 359 s.

Рецензент: д.т.н., проф. Павлов Г.В.

Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова