

УДК 681.5

Топалов А.М.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Кондратенко Ю.П.

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Козлов О.В.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

СИНТЕЗ І ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПЛАВУЧОГО ДОКУ ДЛЯ ЗАДАЧ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Стаття описує розроблену авторами узагальнену математичну модель плаваючого доку для задач автоматичного керування. Запропонована модель складається з математичного опису головних елементів баластної системи і корпусу плаваючого доку у формі диференціальних рівнянь. На основі розробленої математичної моделі сформована структура системи автоматичного керування осадкою плаваючого доку. Отримані результати комп'ютерного моделювання у вигляді перехідних процесів занурення та спливання плаваючого доку з судном і без судна. Аналіз результатів моделювання показує, що розроблена авторами математична модель має високу адекватність реальним процесам і достатньою мірою відображає основні властивості реального плаваючого доку як складного об'єкта керування.

Ключові слова: плаваючий док, докові операції, математична модель, система автоматичного керування, баластна система.

Постановка проблеми. Плаваючі доки, як суднопідійомні споруди, порівняно із сухими доками мають меншу первісну вартість і термін будівництва, а також значно меншу тривалість докових операцій. Плаваючі доки більш мобільні, можуть використовуватися у відриві від судноремонтної бази, дозволяють простіше проводити модернізацію [1–3].

Спуск чи підняття судна плавучим доком є складним відповідальним процесом. Зазвичай, під час виконання докових операцій власна вага судна передається через кільблоки палубі понтона, внаслідок чого можуть відбутися нахили та порушення міцності. Тому прогин, перегин і кути нахилу (крен і диферент) плаваючого доку повинні знаходитися в межах допустимого діапазону, щоб забезпечити безпеку експлуатації суднопідійомної споруди.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науково-технічній літературі є певна кількість публікацій стосовно автоматизації та математичного моделювання морських об'єктів. Математичний опис різноманітних морських плаваючих об'єктів і суден докладно розглянуто в роботах [4; 7–14]. Зокрема, в [11] наведено математичне моделювання руху морських об'єктів, розглядаються задачі статики та динаміки. У роботі [4], в свою чергу, описано застосування імітаційного

моделювання безпосередньо під час дослідження систем керування доковими операціями плаваючих доків. У процесі дослідження динаміки плаваючих конструкцій слід відзначити різні постановки задач, що використовуються різними дослідниками у цій сфері. Так, в [11] розглядається задача динаміки плаваючої споруди за малих коливань. У роботі [12] наведена задача нелінійної динаміки за кінцевих коливань споруди і постійних гідродинамічних характеристик. У свою чергу, задача нелінійної динаміки за кінцевих коливань споруди зі змінними гідродинамічними характеристиками розглянута в [13]. Також роботи [11; 14] присвячені вирішенню задачі динаміки споруди з урахуванням динаміки якірних пристроїв.

Кількість публікацій стосовно моделювання плаваючих доків різного призначення в науковій літературі обмежена, а задачі розробки адекватних математичних моделей для синтезу та дослідження систем автоматичного керування доковими операціями плаваючих доків нині залишаються предметом наукових досліджень.

Постановка завдання. Складність сучасних плаваючих доків як технологічних об'єктів зумовлює необхідність розробки спеціалізованих систем керування їх доковими операціями в автоматичних режимах. Для дослідження ефективності таких систем автоматичного керування на стадії їх

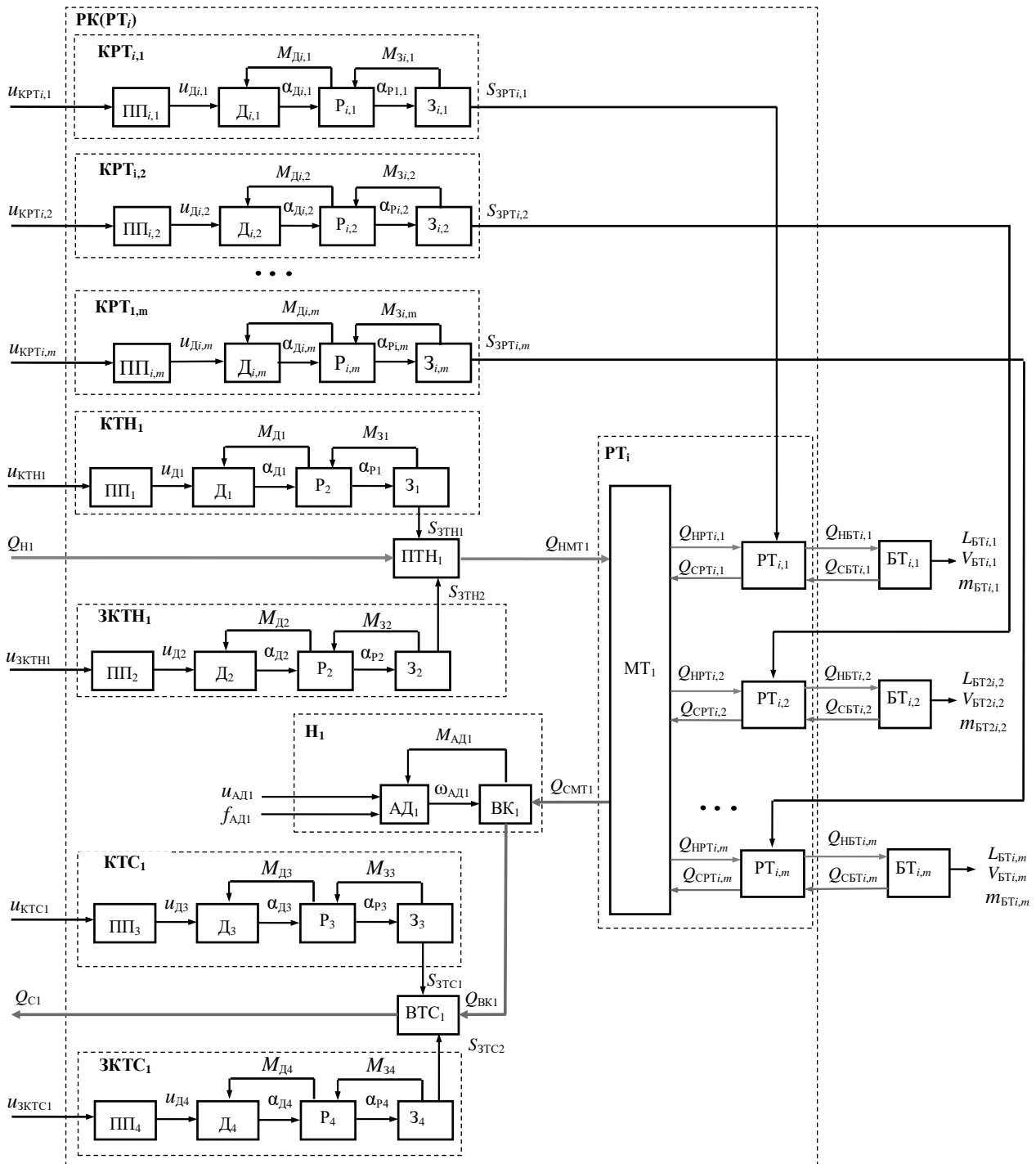


Рис. 1. Функціональна структура фрагмента баластної системи в рамках *i*-ї розподільної коробки (червона лінія – напрямок руху рідини під час наповнення баластних танків, синя лінія – напрямок руху рідини під час спустошення баластних танків)

проектування доцільно використовувати методи математичного та комп'ютерного моделювання [12; 13]. Аналітичне математичне та комп'ютерне моделювання порівняно з експериментальними та іншими підходами є ефективним інструментом із низькою вартістю. Метою статті є розробка

математичної моделі плавучого доку як складного об'єкта керування та дослідження процесів проведення його докових операцій під час занурення та спливання з судном і без судна.

Виклад основного матеріалу дослідження. Докові операції плавучого доку є технологічними

процесами занурення та спливання для обслуговування судна. Підняття судна плавучим доком здійснюється в такій послідовності. Док, приймаючи баластну воду через клінкети в баластні відсіки понтона і веж, занурюється на глибину, достатню для установки судна. Після цього (а) судно заводиться над опорними пристроями стапель-палуби, (б) з баластних відсіків насосами відкачується вода та (в) проводиться посадка судна на докові опори. Процес підняття судна завершується остаточним спливанням дока.

Отже, формуючи узагальнену математичну модель плавучого доку як складного об'єкта керування, доцільно здійснити розробку математичних моделей: баластних танків, трубопроводу, приводів клінкетів і корпусу плавучого доку як об'єкта керування осадкою.

Баластна система відіграє найголовнішу роль, оскільки вона призначена для забезпечення занурення та спливання плавучого доку на певне задане значення рівня його осадки, що є ключовим керованим параметром під час проведення докових операцій плавучого доку.

Баластна система плавучого доку складається з баластних танків, трубопроводів і розподільних коробок. Кожна розподільна коробка обслуговує певну кількість баластних танків і включає один прийомний трубопровід для технологічного процесу наповнення баласту, насос та один відливний трубопровід для технологічного процесу спустошення рідкого баласту. Від розподільної коробки в кожний баластний танк понтона виведені трубопровідні відведення складників розгалуженого трубопроводу. Трубопровідна арматура зазвичай представлена у вигляді автоматизованих клінкетів, що розміщуються на прийомному і відливному трубопроводах і на кожній гілці розгалуженого трубопроводу. Самі розподільні коробки з'єднані між собою за кільцевою або лінійною схемою загальним трубопроводом із клінкетами.

Число розподільних коробок лінійної або кільцевої схем визначається залежно від заданого часу занурення і спливання плавучого доку. Функціональна структура фрагмента баластної системи для i -ї розподільної коробки наведена на рис. 1, де $i = 1 \dots n$.

На рис. 1 прийнято такі позначення: РК(РТ_{*i*}) – розподільна коробка з розгалуженим трубопроводом; БТ_{*i,1*}, БТ_{*i,2*}, ..., БТ_{*i,m*} – баластні танки; Н₁ – насос; ПТН₁ – прийомний трубопровід наповнення; ВТС₁ – відливний трубопровід спустошення; МТ₁ – магістральний трубопровід; РТ_{*i*} – розгалужений трубопровід; РТ_{*i,1*}, РТ_{*i,2*}, ..., РТ_{*i,m*} – відве-

дення (гілки) РТ_{*i*}; КТН₁ – клінкет ПТН₁; КТС₁ – клінкет ВТС₁; ЗКТН₁ – запірний клінкет ПТН₁;

КРТ_{*i,1*}, КРТ_{*i,2*}, ..., КРТ_{*i,m*} – клінкети складників РТ₁; ПП, Д, Р, З – перетворювач потужності, привідний двигун, редуктор і затвор, що входять до складу кожного з клінкетів КТН₁, КТС₁, ЗКТН₁, ЗКТС₁, КРТ_{*i,1*}, КРТ_{*i,2*}, ..., КРТ_{*i,m*}; АД₁, ВН₁ – асинхронний двигун і відцентрове колесо Н₁; $u_{КТН1}$, $u_{КТС1}$, $u_{ЗКТН1}$, $u_{ЗКТС1}$, $u_{КРТi,1}$, $u_{КРТi,2}$, ..., $u_{КРТi,m}$ – сигнали керування КТН₁, КТС₁, ЗКТН₁, ЗКТС₁, КРТ_{*i,1*}, КРТ_{*i,2*}, ..., КРТ_{*i,m*}; $u_{Д1}$, $u_{Д2}$, $u_{Д3}$, $u_{Д4}$, $u_{Дi,1}$, $u_{Дi,2}$, ..., $u_{Дi,m}$ – значення напруги керування Д₁, Д₂, Д₃, Д₄, Д_{*i,1*}, Д_{*i,2*}, ..., Д_{*i,m*}; $\alpha_{Д1}$, $\alpha_{Д2}$, $\alpha_{Д3}$, $\alpha_{Д4}$, $\alpha_{Дi,1}$, $\alpha_{Дi,2}$, ..., $\alpha_{Дi,m}$ – значення кутів повороту валів Д₁, Д₂, Д₃, Д₄, Д_{*i,1*}, Д_{*i,2*}, ..., Д_{*i,m*}; $\alpha_{З1,1}$, $\alpha_{З1,2}$, $\alpha_{З1,3}$, $\alpha_{З1,4}$, $\alpha_{Зi,1}$, $\alpha_{Зi,2}$, ..., $\alpha_{Зi,m}$ – значення кутів повороту вихідних валів Р₁, Р₂, Р₃, Р₄, Р_{*i,1*}, Р_{*i,2*}, ..., Р_{*i,m*}; $S_{ЗТН1}$, $S_{ЗТС1}$, $S_{ЗТН2}$, $S_{ЗТС2}$, $S_{ЗРТi,1}$, $S_{ЗРТi,2}$, ..., $S_{ЗРТi,m}$ – площини задіяних поверхонь затворів З₁, З₂, З₃, З₄, З_{*i,1*}, З_{*i,2*}, ..., З_{*i,m*}; $M_{Д1}$, $M_{Д2}$, $M_{Д3}$, $M_{Д4}$, $M_{i,1}$, $M_{i,2}$, ..., $M_{i,m}$ – значення моментів навантаження Д₁, Д₂, Д₃, Д₄, Д_{*i,1*}, Д_{*i,2*}, ..., Д_{*i,m*}; $M_{З1}$, $M_{З2}$, $M_{З3}$, $M_{З4}$, $M_{Зi,1}$, $M_{Зi,2}$, ..., $M_{Зi,m}$ – значення моментів навантаження від З₁, З₂, З₃, З₄, З_{*i,1*}, З_{*i,2*}, ..., З_{*i,m*}; $u_{АД1}$, $f_{АД1}$ – значення напруги та частоти керування Н₁, відповідно; $\omega_{АД1}$ – значення кутової швидкості обертання АД₁; $M_{АД1}$ – значення моменту навантаження АД₁; $Q_{Н1}$ – витрата баластної рідини під час наповнення на вході РК(РТ_{*i*}); $Q_{С1}$ – витрата баластної рідини під час спустошення на виході розподільної коробки; $Q_{НМТ1}$ – витрата баластної рідини під час наповнення на вході МТ₁; $Q_{СМТ1}$ – витрата баластної рідини під час спустошення на виході МТ₁; $Q_{ВК1}$ – витрата баластної рідини під час спустошення на виході ВК₁; $Q_{НРТi,1}$, $Q_{НРТi,2}$, ..., $Q_{НРТi,m}$ – витрата баластної рідини під час наповнення на вході РТ_{*i,1*}, РТ_{*i,2*}, ..., РТ_{*i,m*}; $Q_{СРТi,1}$, $Q_{СРТi,2}$, ..., $Q_{СРТi,m}$ – витрата баластної рідини під час спустошення на виході РТ_{*i,1*}, РТ_{*i,2*}, ..., РТ_{*i,m*}; $Q_{НБТi,1}$, $Q_{НБТi,2}$, ..., $Q_{НБТi,m}$ – витрата баластної рідини під час наповнення на вході БТ_{*i,1*}, БТ_{*i,2*}, ..., БТ_{*i,m*}; $Q_{СБТi,1}$, $Q_{СБТi,2}$, ..., $Q_{СБТi,m}$ – витрата баластної рідини під час спустошення на виході БТ_{*i,1*}, БТ_{*i,2*}, ..., БТ_{*i,m*}; L , V , m – рівень, об'єм і маса баластної рідини кожного БТ_{*i,1*}, БТ_{*i,2*}, ..., БТ_{*i,m*}.

Керування поточними значеннями параметрів L , V , m баласту здійснюється за допомогою наповнення або спустошення баластних танків.

Для моделювання трубопровідної ділянки наповнення чи спустошення рідкого баласту необхідно враховувати геометричні характеристики трубопроводу і регулюючих клінкетів. Стосовно трубопроводу необхідно мати такі дані: діаметри проміжних труб, довжини прямих труб, число і характер місцевих опорів (звуження, розширення,

поворот) для підрахунку сумарного значення коефіцієнтів втрат у ділянках наповнення і спустошення. Для клінкетів необхідно мати такі дані: прохідний перетин у заданому режимі й умовну пропускну здатність кожного клінкету.

Фізичні процеси в трубопроводі незалежно від типу операцій (наповнення чи спустошення) описуються рівнянням збереження кількості руху (баланс сил).

Розіберемо складний трубопровід баластної системи на ділянки. Введемо допущення, що трубопровідна ділянка є об'єктом із зосередженими параметрами. Відповідно баланс сил буде таким:

$$m \frac{dv}{dt} = F_{TЖ} + F_{PE} - F_{PA} - F_T \quad (1),$$

де m – маса рідини в зосередженому об'ємі; v – швидкість рідини; F_{PE} , F_{PA} – сила тиску на вході і виході; $F_{TЖ} = mgs \sin \alpha$ – сила тяжіння; α – кут нахилу трубопроводу до горизонту; F_T – сила тертя; g – прискорення вільного падіння.

Якщо знехтувати силою тяжіння в рівнянні (1) і перейти від балансу сил до балансу тисків, то можна отримати таку математичну модель ділянки трубопроводу на основі прирощень (різниць) [15]:

$$\begin{cases} \frac{L}{S_{TP}} \frac{dK}{dt} = \Delta P_E + \Delta \Delta P_H - \Delta \Delta P_{PK} - \Delta \Delta P_{TP} - \Delta P_A; \\ \Delta P_H = f(\Delta K, \Delta n); \\ \Delta P_{PK} = k_{PK} \left(\frac{K}{S_{PK}} \right)^2; \\ \Delta P_{TP} = k_{TP} K^2, \end{cases} \quad (2),$$

де ΔP_H – перепад тиску на насосі; L – сумарна довжина прямих частин ділянки трубопроводу; ΔP_E , ΔP_A – тиск на вході і виході ділянки трубопроводу; S_{TP} – перетин трубопроводу; S_{PK} – перетин трубопроводу в регулюючому клінкеті; ΔP_{PK} – перепад тиску на регулюючому клінкеті; ΔP_{TP} – втрати тиску в трубопроводі; K – масова витрата рідини; n – частота обертів відцентрового колеса насоса; k_{PK} – коефіцієнт запірною клінкету, що залежить від витрати і перетину клінкету; k_{TP} – коефіцієнт трубопроводу, що залежить від місцевих опорів і тертя.

В окремих випадках у рівнянні (2) перепад тиску на насосі може бути відсутнім. Насос може працювати за постійного числа обертів (технологічний процес спустошення баластних танків) або може зовсім бути відсутнім (технологічний процес наповнення баластних танків самопливом).

Як приводи трубопровідної арматури доцільно використовувати вентильні електродвигуни, які також називають безколекторними двигунами постійного струму. Порівняно з асинхронними

двигунами вони мають значно менший час розгону та гальмування, більший питомий момент, а також більш широкий діапазон регулювання швидкості обертання за постійної потужності.

Для опису приводу автоматизованого клінкету скористаємося такою системою рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dI_Y}{dt} = \frac{U_Y - R_Y I_Y - k_E \omega_D}{L_Y}; \\ \frac{d\omega_D}{dt} = \frac{k_M I_Y - M_H}{J_\Sigma}, \end{cases} \quad (3),$$

де I_Y – струм у якірному ланцюзі; U_Y – напруга джерела живлення, R_Y – активний опір якоря; L_Y – індуктивність якірної обмотки; J_Σ – приведений момент інерції до ротора двигуна; k_M – коефіцієнт пропорційності; k_E – коефіцієнт пропорційності постійної електрорушійної сили двигуна; M_H – момент навантаження; ω_D – кутова швидкість обертання валу двигуна.

Для опису баластного танку розглянемо його витрати притоку і стоку (K_e , K_a). Зміни кількості рідини в резервуарі зв'язані такою залежністю:

$$\frac{dm}{dt} = \Delta K_e - \Delta K_a \quad (4)$$

Перерахунок зміни маси в зміну об'єму ΔV проводиться за допомогою густини $\frac{dm}{dt} = \rho \frac{dV}{dt}$, а рівняння (4) можна представити у вигляді:

$$\rho S \frac{dH}{dt} = \Delta K_e - \Delta K_a \quad (5),$$

де ΔH – приріст рівня рідини в баластному танку; S – площа дна баластного танку; ρ – густина рідини.

Надалі сформуємо математичну модель корпусу плавучого доку. Внаслідок розподілення маси рідини в баластних танках плавучий док зміщується у вертикальному положенні відносно поверхні води та, відповідно, має певну плавучість за різної осадки.

Плавучість зумовлена дією на плавучий док сил власної ваги разом із вагою судна та тиску води. Рівнодійна сили тяжіння дорівнює вазі плавучого доку або сумарній вазі плавучого доку і судна, що докується, та проходить через центр тяжіння, а також спрямована вертикально вниз. Рівнодійна вертикальних складників сил тиску води називається силою підтримки. Згідно із законом Архімеда вона спрямована вертикально вгору, проходить через центр тяжіння підводних частин плавучого доку і судна та називається центром величини. Сила підтримки дорівнює вазі води в об'ємі підводних частин плавучого доку та судна і часто враховується у вигляді масової водотоннажності.

Процеси нерівномірного вертикального руху плавучого доку можна описати такою системою рівнянь:

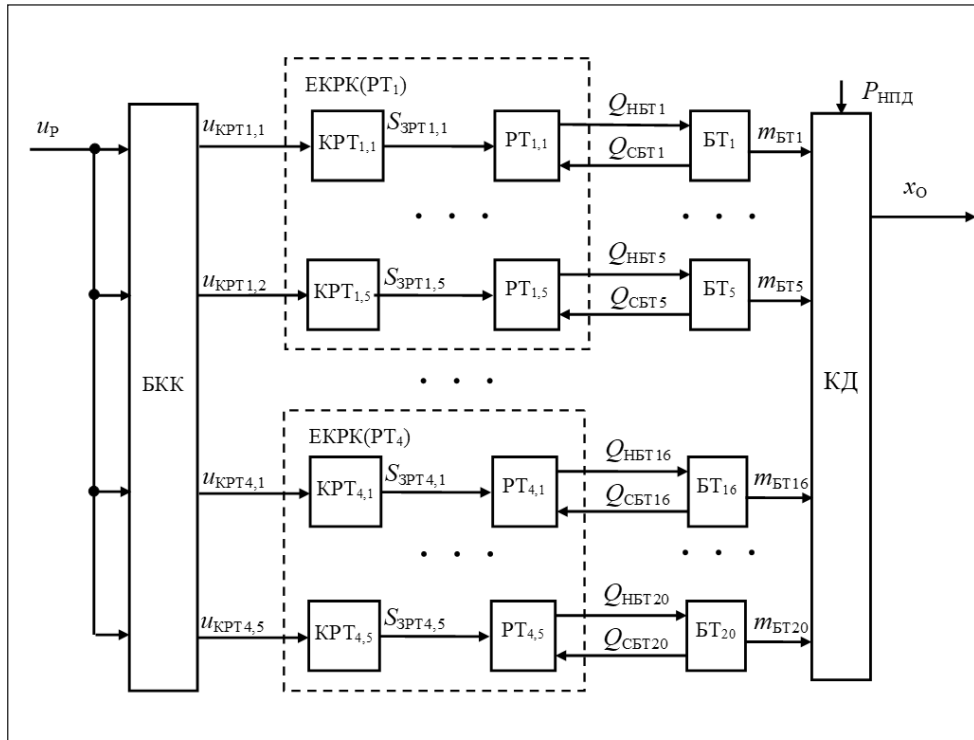


Рис. 2. Функціональна структура узагальненої системи управління осадкою плавучого доку

$$\left\{ \begin{aligned} (m_{\text{ПДС}} + \lambda) \frac{d^2 T}{dt^2} &= (P_{\text{ТПД}} + P_{\text{НПД}}) - R_{\Phi} - R_{\Gamma} - D_{\text{ВПД}}; \\ P_{\text{ТПД}} &= m_{\text{ПДС}} g; \\ P_{\text{НПД}} &= m_{\text{С}} g - k_{\text{С}} (T_{\text{ПД}} - H_{\text{ППД}}); \\ D_{\text{ВПД}} &= k_{\text{ВПД}} T_{\text{ПД}}; \\ R_{\Gamma} &= k_{\Gamma} \left(\frac{dT_{\text{ПД}}}{dt} \right)^2; \\ R_{\Phi} &= k_{\Phi} \left(\frac{dT_{\text{ПД}}}{dt} \right)^2, \end{aligned} \right. \quad (6)$$

де λ – прикріплена маса плавучого доку; $m_{\text{ПДС}}$ – загальна маса плавучого доку, яка складається з маси корпусу $m_{\text{ПД}}$ плавучого доку та маси баластної води $m_{\text{БТ}\Sigma}$ всіх баластних танків; $T_{\text{ПД}}$ – осадка плавучого доку; R_{Φ} – сила опору форми; R_{Γ} – сила в'язкого тертя; $D_{\text{ВПД}}$ – сила виштовхування плавучого доку; $P_{\text{ТПД}}$ – сила тяжіння (вага плавучого доку); $P_{\text{НПД}}$ – сила навантаження від судна, що докується; $m_{\text{С}}$ – маса судна; $H_{\text{ППД}}$ – висота понтона плавучого доку; $k_{\text{С}}$ – коефіцієнт судна, який залежить від осадки плавучого доку; $k_{\text{ВПД}}$ – коефіцієнт плавучого доку, що залежить від осадки плавучого доку; k_{Γ} – коефіцієнт тертя, який залежить від швидкості плавучого доку; k_{Φ} – коефіцієнт форми, що залежить від швидкості плавучого доку.

В окремому випадку деякими членами системи рівнянь (6) можна знехтувати. Якщо розглядати процес занурення та спливання як квазістатичний,

то рух плавучого доку можна вважати рівномірним, і, відповідно, прикріплена маса λ має несуттєвий вплив. Крім того, швидкість занурення та спливання плавучого доку надзвичайно низька, а отже, сила опору форми R_{Φ} і сила в'язкого тертя R_{Γ} будуть також несуттєвими.

Таким чином, рівняння (2), (3), (4), (6) утворюють динамічну математичну модель плавучого доку як складного об'єкта керування осадкою.

Розглянемо функціональну структуру узагальненої системи управління осадкою плавучого доку, що має баластну систему з 4 розподільними коробками і 20 баластними танками (рис. 2), де приймаються такі позначення: $ЕКРК(PT_1), \dots, ЕКРК(PT_4)$ – елементи керування розподільних коробок із розгалуженими трубопроводами; x_0 – реальне значення осадки; $БКК$ – блок керування клінкетами; $КД$ – корпус плавучого доку; $P_{\text{НПД}}$ – сила навантаження плавучого доку від судна; $КРТ_{1,1}, \dots, КРТ_{4,5}$ – клінкети складників розгалуженого трубопроводу $PT_{1,1}, \dots, PT_{4,5}$; u_p – сигнал керування осадкою; $u_{КРТ1,1}, \dots, u_{КРТ4,5}$ – сигнали керування $КРТ_{1,1}, \dots, КРТ_{4,5}$; $Q_{НБТ1}, \dots, Q_{НБТ20}$ – витрати баластної рідини під час наповнення на входах $БТ_1, \dots, БТ_{20}$; $Q_{СБТ1}, \dots, Q_{СБТ20}$ – витрати баластної рідини під час спустошення на виходах $БТ_1, \dots, БТ_{20}$; $S_{ЗРТ1,1}, \dots, S_{ЗРТ4,1}$ – площини задіяних поверхонь затворів у трубопроводах $PT_{1,1}, \dots$

$PT_{4,5}; m_{BT1}, \dots, m_{BT20}$ – маса баластної рідини кожного БТ₁, ..., БТ₂₀.

Незалежно від докової операції занурення або спливання регулювання осадки виконується за допомогою дроселювання клінкетами в РТ, а головним сигналом управління є сигнал регулювання осадки u_p . Сигнал регулювання осадки u_p (0...10 В) прямо пропорційно залежить від сумарної витрати Q_{Σ} . Сигнали керування $u_{KPT1,1}, \dots, u_{KPT4,5}$ (0...10 В) клінкетами КРТ_{1,1}, ..., КРТ_{4,5} формуються в БКК залежно від рівномірного наповнення або спустошення різних баластних танків. Відповідно БКК містить для кожної складової частини розгалуженого трубопроводу коефіцієнти пропорційності між u_p та кожним $u_{KPT1,1}, \dots, u_{KPT4,5}$, що дозволяє регулювати $S_{зРТ1,1}, \dots, S_{зРТ4,5}$, створюючи необхідні витрати $Q_{НБТ1}, \dots, Q_{НБТ20}$ для кожного баластного танку. Крім того, БКК автоматично закриває і відкриває групу КРТ складників РТ для баластних танків у понтоні за певної осадки (осадки плавучого доку за рівня баластної води, що дорівнює рівню висоти баластних танків понтону) під час занурення та спливання плавучого доку відповідно.

Таким чином, залежно від докової операції занурення чи спливання плавучого доку, яка визначає напрямок руху рідкого баласту, подається додатний сигнал u_p (10 В), який відповідає максимальній витраті в кожній складовій частині розгалуженого трубопроводу. Відповідно, для зведення витрати до нуля в певний момент часу сигнал регулювання u_p поступово зменшується до нуля В.

За допомогою розробленої математичної моделі плавучого доку проведено комп'ютерне моделювання основних докових операцій плавучого доку, а саме: занурення без судна, спливання без судна, занурення з судном, спливання з судном. Моделювання перехідних процесів проводилося для плавучого доку середнього класу вантажопідйомністю 8 500 т, що має такі параметри: ширина $B = 32,4$ м; довжина $L = 139,5$ м; ширина кожної вежі $B_B = 3,13$ м; висота понтона $h_{П} = 4,6$ м; висота плавучого доку $h = 12,8$ м; осадка плавучого доку без судна $T = 2$ м; кількість водяного баласту $m_B = 18\,500$ т. Причому максимальна маса доку (масова водотоннажність) з усім обладнанням складає $P_{ТПД} = 9\,253$ т. Також баластна система плавучого доку має чотири розподільні коробки, 20 баластних танків та укомплектована баластними насосами продуктивністю 3 750 м³/год. У свою чергу, насоси працюють із постійною частотою обертів коліс відцентрового типу. При-

ймні трубопроводи мають діаметр $d_1 = 750$ мм, розгалужений трубопровід баластних танків має діаметр $d_2 = 350$ мм. Всі клінкети мають мотор-редуктори 2–10 кВт і виступають у ролі регуляторів витрати [1]. Крім того, моделювання перехідних процесів проводилося для плоскобортного судна, що має такі параметри: ширина $B = 22,54$ м; довжина $L = 130$ м; вага $P_C = 8\,400$ т.

Результати комп'ютерного моделювання у вигляді графіків перехідних процесів занурення та спливання плавучого доку наведені на рис. 3, де прийнято такі позначення: t_{31} – час занурення понтона плавучого доку з судном; t_{32} – час занурення понтона плавучого доку без судна; t_{33} – час початку входу розміщеного на кільблоках, судна у воду; t_{34} – час занурення плавучого доку до осадки 8,6 м; t_{c1} – час спливання понтону плавучого доку з судном; t_{c2} – час спливання понтону плавучого доку без судна; t_{c3} – час виходу розміщеного на кільблоках судна за межі води; t_{c4} – час спливання плавучого доку до осадки 3,83 м з судном; t_{c4} – час спливання плавучого доку до осадки 2 м без судна.

Із графіків перехідних процесів занурення (рис. 3, а) видно, що початкова осадка плавучого доку без баласту в усіх баластних танках без судна складає 2 м, а з судном – 3,83 м. Процес занурення плавучого доку проходить повільно доти, поки понтон не зануриться у воду ($H_{ПД} = 4,6$ м), час занурення понтону для плавучого доку з судном $t_{31} = 980$ с, а без судна $t_{32} = 2\,900$ с. Після занурення понтону процес пришвидшується, і вже в момент часу $t_{33} = 5\,900$ с плавучий док (з судном і без судна) досягає осадки у 8,6 м. Процес занурення плавучого доку супроводжується зміною сигналу регулювання u_p , що в процесі призводить до збільшення маси рідкого баласту до 15 700 кг у плавучому доці.

Із графіків перехідного процесу спливання (рис. 3, б) видно, що початкова осадка плавучого доку складає 8,6 м. Процеси спливання плавучого доку з судном і без суттєво відрізняються: час спливання до рівня понтону без судна $t_{c2} = 1\,100$ с, а з судном $t_{c3} = 3\,300$ с. Після спливання плавучого доку до рівня понтона процеси спливання в обох випадках значно сповільнюються. Процес спливання плавучого доку супроводжується зміною сигналу регулювання u_p , що в процесі призводить до зменшення маси рідкого баласту (близько до 0) в плавучому доці.

Адекватність математичної моделі підтверджується результатами комп'ютерного моделювання (рис. 3 а, б), оскільки осадка плавучого

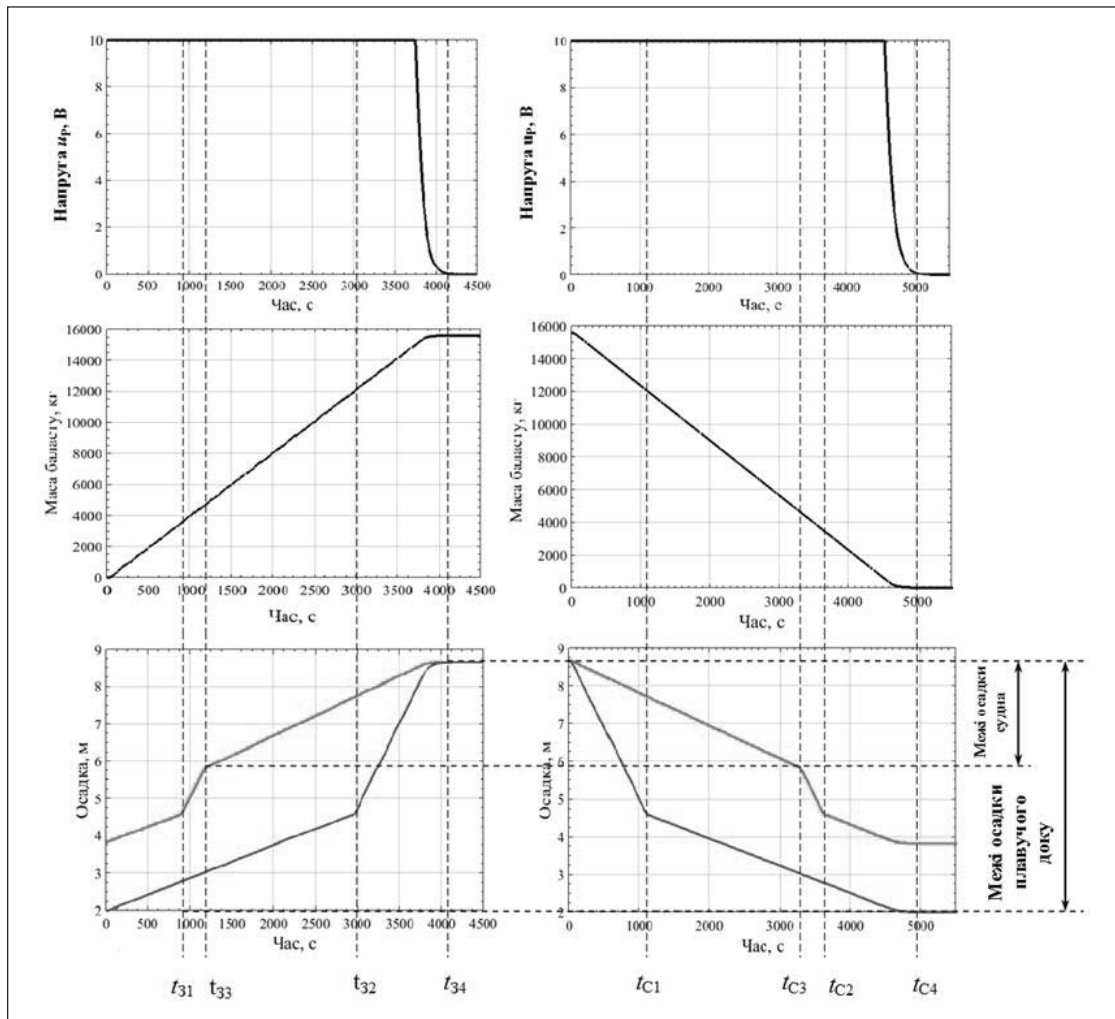


Рис. 3. Перехідні процеси (фіолетова лінія – з судном, зелена лінія – без судна): а) занурення плавучого доку; б) спливання плавучого доку

доку порожнем без судна і з судном становить 2 м і 3,83 м відповідно, що відповідає паспортним даним. У разі збільшення баласту до 15 700 кг осадка плавучого доку з судном і без судна збігаються на рівні 8,6 м, що відповідає осадці судна в 2,81 м (ватерлінія судна). У разі осадки судна в 2,81 м вага і виштовхувальна сила судна рівні між собою, а отже, дія судна на плавучий док стає несуттєвою, що призводить до однакової осадки плавучого доку.

Таким чином, результати комп'ютерного моделювання перехідних процесів (рис. 3) показують, що розроблена авторами математична модель є адекватною і достатньою мірою відображає реальну поведінку плавучого доку під час занурення та спливання з судном і без судна.

Висновки. У роботі представлений синтез математичної моделі плавучого доку як складного об'єкта керування та проведено дослі-

дження його докових операцій занурення та спливання з судном і без судна. Математичний опис у формі диференціальних рівнянь виконано для таких елементів: приводів клінкетів, трубопроводів, баластних танків, корпусу плавучого доку. Сформована математична модель плавучого доку дає змогу досліджувати поведінку цього складного об'єкта керування в усталеному та перехідному режимах, зокрема розраховувати поточне значення його осадки під час моделювання таких 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 має високу адекватність, достатньою мірою відображає основні властивості реального плавучого доку як

складного об'єкта керування з суттєво нелінійними характеристиками. Таким чином, синтезовану математичну модель доцільно застосовувати в подальших дослідженнях для проектування та налагодження високоефективних систем автоматичного керування плавучими доками.

Список літератури:

1. Павлов П.Я., Рогулин А.Н. Эффективность эксплуатации доков. Москва: Транспорт, 1987. 176 с.
2. Kondratenko Y.P. Synthesis and Optimization of Fuzzy Control Systems for Floating Dock's Docking Operations. *Fuzzy Control Systems: Design, Analysis and Performance Evaluation. Series: Computer Science, Technology and Applications*: chapter in the book / Y.P. Kondratenko, O.V. Kozlov, O.V. Korobko, A.M. Topalov; Wendy Santos (Ed). New York: NOVA Science Publishers, 2017. P. 141–214.
3. Рашковський О.С., Щедролюсов О.В., Єрмаков Д.В., Узлов О.М. Проектування, технологія і організація побудови композитних плавучих доків. Херсон: Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Херсонська філія, 2015. 320 с.
4. Zhukov Yu. Polymetric Sensing in Intelligent Systems. *Advances in Intelligent Robotics and Collaborative Automation*: chapter in the book / Yu. Zhukov, B. Gordeev, A. Zivenko, A. Nakonechniy. River Publishers, 2015. P. 211–234.
5. Вахарловский Г.А., Кучерявенко П.Ф., Бузык В.Ф. Современные доковые сооружения для крупных и средних судов. Ленинград, 1968. 251 с.
6. Григорьев В.И., Марченко Д.В., Симаков, Г.В., Смелов В.А. Судоспускные и судоподъемные сооружения. Ленинград: Стройиздат, 1976. 174 с.
7. Спосіб автоматичного контролю осадки, крену, деференту та стрілки прогину / перегину плавспоруди з бездротовою передачею даних: пат. 117729 Україна: МПІК G21C 17/035 (2006.01), G01F 23/22 (2006.01). u201613290; заявл. 26.12.2016; опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13. 11 с.
8. Топалов А.М., Кондратенко Ю.П., Козлов О.В. Комп'ютеризована система для дистанційної діагностики датчиків рівня баластного комплексу плавучого доку. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки, Інформатика, обчислювальна техніка та автоматизація*. 2018. Т. 29 (68). Ч. 2 № 4. С. 19–25.
9. 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. Polyana, Ukraine, 2016. P. 57–61.
10. Topalov A.M., Kondratenko Y.P., Kozlov O.V. *Computerized intelligent system for remote diagnostics of level sensors in the floating dock ballast complexes*: proceedings of the 14th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer. Kyiv, 2018. P. 94–108.
11. Большев А.С., Михаленко Е.Б., Фролов С.А. Математическое моделирование поведения морских плавучих сооружений. Санкт-Петербург, 2006. 38 с.
12. Фрейдзон И.Р. Моделирование корабельных систем управления. Ленинград, 1975. 232 с.
13. Вагущенко Л.Л., Цымбал Н.Н. Системы автоматического управления движением судна. Одесса: Латстар, 2002. 310 с.
14. Kondratenko Y.P. Fuzzy Controllers for Increasing Efficiency of the Floating Dock's Operations: Design and Optimization. *Control systems: Theory and Applications*: chapter in book / Y.P. Kondratenko, O.V. Kozlov, A.M. Topalov; V.M. Kuntsevich, V.F. Gubarev, Yu.P. Kondratenko, D.V. Lebedev, V.P. Lysenko (Ed). River Publisher, 2018. P. 197–232.
15. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС. Одесса: Астропринт, 2001. 308 с.

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЛАВУЧЕГО ДОКА ДЛЯ ЗАДАЧ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Статья описывает разработанную авторами математическую модель плавучего дока для задач автоматического управления. Предложенная модель состоит из математического описания главных элементов балластной системы и корпуса плавучего дока в форме дифференциальных уравнений. На основе разработанной математической модели сформирована структура системы автоматического управления осадкой плавучего дока. Получены результаты компьютерного моделирования в виде переходных процессов погружения и всплытия плавучего дока с судном и без судна. Анализ результатов моделирования показывает, что разработанная авторами математическая модель имеет высокую адекватность реальным процессам и в достаточной мере отражает основные свойства реального плавучего дока как сложного объекта управления.

Ключевые слова: плавучий док, доковые операции, математическая модель, система автоматического управления, балластная система.

**SYNTHESIS AND STUDY OF THE MATHEMATICAL MODEL
OF THE FLOATING DOCK FOR THE AUTOMATIC CONTROL TASKS**

The article describes developed by the authors generalized mathematical model of a floating dock for automated control tasks. The proposed model consists of the mathematical description of the main elements of the ballast system and the floating dock hull in the form of differential equations. On the basis of the developed mathematical model, the structure of the automatic control system of the floating dock draft is formed. The results of computer simulation in the form of transients of the floating dock immersion and emersion with and without the vessel are obtained. The analysis of simulation results shows that developed by the authors mathematical model has a high adequacy to real processes and fully reflects the basic properties of a real floating dock as a complex control object.

Key words: *floating dock. docking operations. mathematical model, automatic control system, ballast system.*