

УДК 629.58

DOI: <http://doi.org/10.20535/2219-3804222020212650>

А. М. Войтасик¹, *старший викладач*

**РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
БАГАТОВИМІРНИМ РУХОМ ВАНТАЖНОГО САМОХІДНОГО ПІДВОДНОГО
НОСІЯ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ**

En

An automated control system of a multidimensional motion of a self-propelled tethered underwater transport vehicle that provides high quality of control processes under the conditions of uncertainty is designed. To prove the operability of proposed system the simulation of the multidimensional motion of a self-propelled tethered underwater transport vehicle with three controllable degrees of freedom is performed. Automated control system provides transient processes that do not have overshoot and static errors and last no more than 4 s. After the end of transient processes system follows the set point that changes dynamically with relative

¹ Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

error that is less than 0,01 % of operation area boundaries. In the paper multidimensional control law for a self-propelled tethered underwater transport vehicle under the conditions of uncertainty based on the pseudo-inverse matrix of the configuration of propulsive and steering complex of underwater vehicle and the minimization of local functional performed by the method of gradient search is synthesized. Using proposed control law and multidimensional intensity setter the system of automated control of the multidimensional motion of a self-propelled tethered underwater transport vehicle that provides high quality of the processes of the control of its multidimensional motion under the conditions of uncertainty, constrained control signals and the influence of external disturbances is synthesized.

Ru

Разработана система автоматического управления многомерным движением самоходного привязного подводного аппарата транспортного типа, которая обеспечивает высокое качество процессов управления в условиях неопределенности. Работоспособность предложенной системы подтверждена методом имитационного моделирования многомерного движения самоходного привязного подводного аппарата транспортного типа с тремя управляемыми степенями подвижности. Система автоматического управления обеспечивает переходные процессы, которые не имеют перерегулирования и статических ошибок и длятся не более 4 с. После завершения переходного процесса система отрабатывает задачу управления, которая динамично меняется с относительной погрешностью, которая не превышает 0,01 % от границы допустимой рабочей зоны. В работе синтезирован многомерный закон управления самоходным привязным подводным аппаратом транспортного типа в условиях неопределенности с применением псевдообратной матрицы движительно-рулевого комплекса подводного аппарата и метода минимизации локального функционала на основе градиентного поиска. На основе предложенного закона управления и при применении многомерного задатчика интенсивности синтезирована система автоматического управления многомерным движением самоходного привязного подводного аппарата транспортного типа, которая обеспечивает высокое качество процессов управления его многомерным движением в условиях неопределенности, ограниченный управляющих воздействий и воздействий внешних возмущений.

Вступ

Підводне транспортування та установка корисних вантажів на морському дні відноситься до найбільш складних підводно-технічних задач за реалізацією. Вплив зовнішніх збурюючих чинників під час виконання подібної роботи може суттєво ускладнювати виконання такої підводної місії [1]. Тому, найбільш ефективним технічним засобом для такої місії є застосування безекіпажного самохідного прив'язного підводного апарата транспортного типу (СППА-Т) проекту «Вантажний самохідний підводний носій» (ВСПН, проектувальник – НУК ім. адмірала Макарова, Україна) із високоєфективною системою автоматичного керування (САК).

Через суттєво нелінійну динаміку корпусу та рушійного-кермового комплексу (РКК) ВСПН його рух як об'єкта керування описується системою нелінійних диференціальних рівнянь. Для маневрування ВСПН із ші-

стьма степенями рухливості його РКК складається із чотирьох електрорушійних пристроїв (ЕРП) маршового та чотирьох ЕРП вертикального руху. Кожний ЕРП містить гребний гвинт (ГГ), який через валопровід приводиться до руху електродвигуном. Найбільший негативний вплив на якість керування ВСПН завдають властивості підводної течії та невизначені зовнішні збурення від кабель-тросового зв'язку апарата із судном забезпеченням.

Таким чином, вирішення задачі автоматизації руху ВСПН потребує синтезу багатовимірної САК нелінійним об'єктом, здатної забезпечити високу точність керування за умов невизначеності. Для побудови САК багатовимірним рухом морських рухомих об'єктів (МРО) застосовують класичні пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) регулятори [2, 3], регулятори на базі штучних нейронних мереж [4] та правил нечіткої логіки [5, 6], регулятори у вигляді нелінійних спостерігачів [7] та працюючі у режимі «ковзання» [8]. Кожна із цих систем має певні переваги та недоліки. На цей час вже реалізовані САК багатовимірними нелінійними об'єктами в умовах структурної та параметричної невизначеності об'єктів керування. Тому, процеси керування МРО ускладнюються впливом невизначених зовнішніх збурень, що призводить до зниження якості процесів керування.

Постановка задачі

Необхідно розробити САК багатовимірним рухом СППА-Т, яка забезпечить високу якість процесів керування за умов невизначеності. Актуальність даної мети обумовлена необхідністю удосконалення керування СППА-Т проєкту «ВСПН».

Виклад основного матеріалу дослідження

У загальному вигляді, поступальний рух МРО характеризується рухом його полюса. У цьому випадку, достатньо досліджувати рух СППА-Т, як об'єкта керування в околі довільної точки криволінійної траєкторії руху у разі обмежень часових і просторових інтервалах, тобто у базовій системі координат (БСК) із осями $O_b x_b y_b z_b$.

Для зв'язку окремих систем координат кожного ЕРП, розміщеного на підводному апараті, будемо застосовувати зв'язану систему координат (ЗСК) із осями $O_a x_a y_a z_a$. Поступальний рух ВСПН спричиняється рівнодіючою рушійних сил, яку можна представити у вигляді вектору $\bar{F}_p = [F_{p(x)}, F_{p(y)}, F_{p(z)}]^T$, де $F_{p(x)}, F_{p(y)}, F_{p(z)}$ – проекції вектора рівнодійної рушійних сил, відповідно, на осі $O_a x_a, O_a y_a, O_a z_a$ ЗСК. Керуючий вплив, сформований рівнодійною рушійних сил РКК підводного апарата, можна

представити у вигляді матриці упорів $F = [F_1, F_2, \dots, F_8]^T$, де індексами 1–8 позначено відповідний ЕРП.

Відповідно до просторової орієнтації ЕРП відносно корпусу ВСПН напрямок прикладання упору представимо у вигляді одиничного вектора $o_i = [o_{i(x)}, o_{i(y)}, o_{i(z)}]^T$, де індекс i – це номер ЕРП, від 1–8. Вектор упору ЕРП матиме вигляд $\bar{F}_p = \sum_i \bar{F}_i$, де $\bar{F}_i = o_i \cdot F_i$. У матричній формі розподіл рушійних сил набуває виду $D_p = [o_1, o_2, \dots, o_8]$. Таким чином, $\bar{F}_p = D_p F$.

Обертний рух ВСПН спричиняється рівнодіючою рушійних моментів, яку можна представити у вигляді вектору $\bar{M}_p = [M_{p(x)}, M_{p(y)}, M_{p(z)}]^T$, де $M_{p(x)}, M_{p(y)}, M_{p(z)}$ – проекції вектора рівнодійної рушійних моментів відповідно на осі $O_a x_a, O_a y_a, O_a z_a$ ЗСК.

Вектор рівнодійної рушійних моментів ЕРП матиме вигляд $\bar{M}_p = \sum_i \bar{M}_i$, де індекс i – це номер ЕРП, від 1–8. Тоді, $\bar{M}_i = (\bar{r}_i \times o_i) \cdot F_i$, де \bar{r}_i – координати точки розташування ЕРП відносно корпусу ВСПН, представлені у ЗСК. У матричній формі розподіл рушійних моментів набуває виду $D_p = [(\bar{r}_1 \times o_1), (\bar{r}_2 \times o_2), \dots, (\bar{r}_8 \times o_8)]$. Таким чином, $\bar{M}_p = D_p F$.

Загальна матриця T рівнодіючих сил та моментів РКК ВСПН матиме вид

$$T = \begin{bmatrix} D_p \\ D_r \end{bmatrix} F.$$

Представлені матриці надають змогу описувати рух ВСПН відповідно до шести ступенів вільності. Під час моделювання роботи РКК ВСПН використовуємо квазістаціонарну модель ЕРП. За цієї мети представимо керуючі впливи для кожного ступеня рухливості ВСПН у вигляді ортогональної матриці $U' = [u_x, u_y, u_z, u_\theta, u_\phi, u_\psi]^T$. Формування керуючих впливів виконуємо відповідно до виразу $U' = DU$, де $U = [u_1, u_2, \dots, u_8]^T$ – матриця сигналів керування ЕРП розміщеними на апараті.

Матрицю, обернену до D , можна використовувати для розподілення сигналів керування ступенями рухливості ВСПН по ЕРП. У зв'язку із цим будемо використовувати замість оберненої матриці D^{-1} псевдо обернену матрицю D^+ , розраховану за алгоритмом Мура-Пенроуза.

Для побудови САК багатовимірним рухом ВСПН застосуємо одновимірний закон керування, отриманий раніше [9]. Введемо матрицю позиційних кінематичних параметрів ВСПН $R = [x, y, z, \theta, \phi, \psi]^T$ та матрицю

їх бажаних значень $R_g = [x_g, y_g, z_g, \theta_g, \varphi_g, \psi_g]^T$. Складові даних матриць отримуємо відповідно до БСК. Для їх переведення у ЗСК введемо матрицю зв'язку K_v позиційних кінематичних параметрів ВСПН виду

$$K_v = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \psi & (\sin \varphi \sin \theta - & (\cos \varphi \sin \psi \sin \theta + \\ & - \cos \varphi \sin \psi \cos \theta) & + \sin \varphi \cos \theta) \\ \sin \psi & \cos \psi \cos \theta & - \cos \psi \sin \theta \\ - \sin \varphi \cos \psi & (\sin \varphi \sin \psi \cos \theta + & (\cos \varphi \cos \theta - \\ & + \cos \varphi \sin \theta) & - \sin \varphi \sin \psi \sin \theta) \end{bmatrix},$$

та матрицю зв'язку K_ω обертових кінематичних параметрів ВСПН виду

$$K_\omega^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \psi & 0 \\ 0 & \cos \varphi \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & - \cos \psi \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}.$$

Загальний вигляд обчислень представимо у вигляді однієї матриці зв'язку позиційних та обертових кінематичних параметрів ВСПН виду

$$K_V = \begin{bmatrix} K_v & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & K_\omega \end{bmatrix}.$$

Таким чином, отримуємо закон керування багатовимірним рухом ВСПН

$$\left. \begin{aligned} U &= D^+ \cdot (K_u^{-1} \cdot K_m \cdot \ddot{R}_d + \text{sign}(\dot{R}) \circ K_R \circ \dot{R} \circ \dot{R}) - U_D; \\ \ddot{R}_d &= \ddot{R}_g + 2 \cdot T_r^{-1} \cdot (\dot{R}_g - \dot{R}) + T_r^{-2} \cdot (R_g - R); \\ \dot{R}_{dm} &= \dot{R} + 2 \cdot T_{rm}^{-1} \cdot (R - R_m) + T_{rm}^{-2} \int (R - R_m) dt; \\ U_D &= \Theta \cdot K \cdot (\dot{R}_{dm} - \dot{R}_m); K = C \cdot K_m \cdot K_u^{-1} \cdot T_{rm}^{-1}; C \gg 1; \\ \ddot{R}_m &= K_m^{-1} \cdot (K_u \cdot D \cdot U + U_D) - \text{sign}(\dot{R}_m) \circ K_R \circ \dot{R}_m \circ \dot{R}_m; \\ \Theta &= \text{sign}(\nabla \ddot{R}(U')), \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де U – матриця сигналів керування; символом « \circ » позначено операцію обчислення добутку Адамара, тобто поелементне перемноження матриць; символом « ∇ » позначено операцію визначення градієнта функції $\ddot{R}(U')$; точкою позначено операцію взяття похідної за часом t .

Застосовуючи закон керування (1) разом із еталонною моделлю другого порядку, забезпечимо високу динамічну точність під час керування ВСПН за умов невизначеності. Високу якість керування рухом СППА-Т за умов обмежень забезпечено застосуванням задавача інтенсивності [10].

Можливість застосування еталонної моделі САК забезпечимо введенням матриці бажаних значень вихідних величин R_d

$$\begin{aligned} R_d &= [x_d, y_d, z_d, \theta_d, \varphi_d, \psi_d]^T; \\ \ddot{R}_d &= \ddot{R}_g + 2 \cdot T_r^{-1} \cdot (\dot{R}_g - \dot{R}) + T_r^{-2} \cdot (R_g - R), \end{aligned} \quad (2)$$

де $T_r = \text{diag} \{ \tau_{r(x)}, \tau_{r(y)}, \tau_{r(z)}, \tau_{r(\theta)}, \tau_{r(\varphi)}, \tau_{r(\psi)} \}$ – матриця постійних часу.

Введемо матриці коефіцієнтів моделі, які враховують вплив приєднаних мас води K_m , сил K_u , та моментів K_R на багатовимірний рух ВСПН

$$\begin{aligned} K_u &= \text{diag} \{ K_{u(x)}, K_{u(y)}, K_{u(z)}, K_{u(\theta)}, K_{u(\varphi)}, K_{u(\psi)} \}; \\ K_m &= \text{diag} \{ K_{m(x)}, K_{m(y)}, K_{m(z)}, K_{m(\theta)}, K_{m(\varphi)}, K_{m(\psi)} \}; \\ K_R &= [K_{R(x)}, K_{R(y)}, K_{R(z)}, K_{R(\theta)}, K_{R(\varphi)}, K_{R(\psi)}]^T; \\ U &= D^+ \cdot (K_u^{-1} \cdot K_m \cdot \ddot{R}_d + \text{sign}(\dot{R}) \circ K_R \circ \dot{R} \circ \dot{R}) - U_D, \end{aligned} \quad (3)$$

де $U_D = [U_{D(x)}, U_{D(y)}, U_{D(z)}, U_{D(\theta)}, U_{D(\varphi)}, U_{D(\psi)}]^T$ – матриця компенсаційних параметрів, яка визначає відмінність інверсної моделі від ідеальної інверсної моделі об'єкту керування.

Бажані значення вихідних параметрів R_{dm} та значення керованих параметрів R_m об'єкту керування у матричному вигляді набувають виду

$$\begin{aligned} R_{dm} &= [x_{dm}, y_{dm}, z_{dm}, \theta_{dm}, \varphi_{dm}, \psi_{dm}]^T; \\ R_m &= [x_m, y_m, z_m, \theta_m, \varphi_m, \psi_m]^T; \\ \dot{R}_{dm} &= \dot{R} + 2 \cdot T_{rm}^{-1} \cdot (R - R_m) + T_{rm}^{-2} \int (R - R_m) dt, \end{aligned} \quad (4)$$

де $T_{rm} = \text{diag} \{ \tau_{rm(x)}, \tau_{rm(y)}, \tau_{rm(z)}, \tau_{rm(\theta)}, \tau_{rm(\varphi)}, \tau_{rm(\psi)} \}$ – матриця постійних часу еталонної моделі контуру компенсації.

Введемо функцію обмеження $\text{sat}(X, X_{\text{lim}})$, кожний елемент якої обчислюється за формулою

$$\text{sat}(x, x_{\text{lim}}) = \begin{cases} x_{\text{lim}}, & \text{якщо } x > x_{\text{lim}}; \\ -x_{\text{lim}}, & \text{якщо } x < -x_{\text{lim}}; \\ x, & \text{інакше,} \end{cases} \quad (5)$$

де X – матриця параметрів, що обмежуються; X_{lim} – матриця заздалегідь визначених обмежень; x, x_{lim} – елементи матриць X та X_{lim} відповідно.

Для забезпечення високої якості процесів керування багатовимірним рухом ВСПН необхідно враховувати обмеження його РКК. Для врахування цих обмежень застосовуємо функцію

$$U_i = \text{sat}(U_{\Lambda}, U_{\text{lim}}), \quad (6)$$

Розділ 1. Інформаційні системи

де $U_{\Lambda} = U$ із виразу (3); U_{lim} – матриця розмірністю $N+1$, у якій всі елементи рівні одиниці, а керуючі впливи змінюються у діапазоні $[-1; 1]$.

Динаміку перехідних процесів САК багатовимірним рухом ВСПН було досліджено методом комп'ютерного моделювання з використанням математичної моделі руху СППА-Т [9]. Основні параметри математичної моделі відповідають параметрам СППА-Т проекту «ВСПН» та зведені у табл. 1.

Таблиця 1.

Основні параметри математичної моделі багатовимірного руху СППА-Т проекту ВСПН

Параметр	Одиниця виміру	Значення
Форма корпусу:		Тривісний еліпсоїд:
– довжина/ висота / ширина	м	2,7 / 0,6 / 1,3
Маса / водотоннажність	кг/м ³	1129 / 1,103
Плавуність ВСПН	Н	нульова (залишкова >0)
Координати точки прикладання сили плавучості в ЗСК	м	{0, 0,2, 0}
Довжина КТ/Швидкість течії	м/м/с	100 / {-0,25, 0, 0}
Координати точки кріплення КТ у ЗСК	м	{0,25, 0,25, 0}
Координати розміщення ЕРП у ЗСК:		
– лівий / правий носовий	м	{0,765, 0, -0,32}/{0,765, 0, 0,32}
– лівий / правий кормовий	м	{-0,765, 0, -0,32} / {-0,765, 0, 0,32}
– вер. носовий та кормовий	м	{0,765, 0,15, 0}
– вер. лівий / правий	м	{0, 0,15, -0,32} / {0, 0,15, 0,32}
Координати векторів напрямку рушійних сил ЕРП ЗСК:		
– лівий / правий носовий	м	{0,71, 0, 0,71} / {0,71, 0, -0,71}
– лівий / правий кормовий	м	{0,71, 0, -0,71} / {0,71, 0, 0,71}
– чотири вертикальні	м	{0, -1, 0}
Потужність ЕРП	Вт	500

Для підвищення швидкодії запропонованої САК, обрано такі значення постійних часу регулятора:

$$T_m = \text{diag}\{0,75, 0,75, 0,75, 1, 0,75, 1\},$$

$$T_r = \text{diag}\{1,5, 1,5, 1,5, 4, 1, 4\}.$$

На основі критеріїв, наведених у [9], обрано такі параметри регулятора:

$$K_R = \left[313,7 \text{ Н} \cdot (\text{м/с})^{-2}, 0, 944,6 \text{ Н} \cdot (\text{м/с})^{-2}, 0, 4298 \text{ Н} \cdot (\text{м/с})^{-2}, 0 \right]^T,$$

$$K_m = \text{diag}\{1256 \text{ кг}, 0 \text{ кг}, 1552 \text{ кг}, 0 \text{ кг}, 581,6 \text{ кг}, 0 \text{ кг}\},$$

$$K_u = \text{diag}\{50 \text{ Н}, 0 \text{ Н}, 300 \text{ Н}, 0 \text{ Н}, 300 \text{ Н}, 0 \text{ Н}\},$$

$$C = 1, \Theta = 1.$$

За результатами комп'ютерного моделювання роботи ВСПН на граничній глибині визначено матриці обмежень сигналів керування внутрішнього регулятора задавача інтенсивності та керованих величин:

$$U_{lim} = [100\text{м}, 0\text{м}, 100\text{м}, 0, \pi, 0]^T; \quad R_{lim} = U_{lim}.$$

Матрицю обмежень швидкості руху ВСПН визначено за результатами комп'ютерного моделювання руху підводного апарата за максимальних керуючих впливів:

$$\dot{R}_{lim} = [1,4\text{м/с}, 0\text{м/с}, 0,6\text{м/с}, 0\text{рад/с}, 0,3\text{рад/с}, 0\text{рад/с}]^T.$$

Матриця обмежень складників прискорення руху ВСПН має вигляд

$$\ddot{R}_{lim} = \left[\infty\text{м/с}^2, \infty\text{м/с}^2, \infty\text{м/с}^2, \infty\text{рад/с}^2, \infty\text{рад/с}^2, \infty\text{рад/с}^2 \right]^T.$$

Динаміку перехідних процесів САК для задачі керування, яка змінюється за ступінчастим законом, зображено на рис. 1.

Результати досліджень

Перехідний процес багатовимірного руху ВСПН починається після виходу САК із режиму насичення. Тривалість перехідного процесу не перевищує 4 с. Після виходу із режиму насичення САК відпрацьовує задачу керування за поступальними ступенями рухливості без перерегулювань. Найшвидше задачу керування САК відпрацьовує за курсом. Перерегулювання САК за обертовим ступенем рухливості відсутнє, оскільки сигнал керування не виходить за 1% допустиму робочу зону. Також відсутня і статична похибка за обертовим ступенем рухливості, оскільки сигнал керування асимптотично наближується до задачі керування.

Для аналізу динамічної точності САК багатовимірним рухом ВСПН на вхід системи подаємо сигнал задачі керування, яка змінюється за гармонічним законом. Графіки процесу керування представлені на рис. 2.

Тривалість перехідного процесу після виходу САК з режиму насичення не перевищує 4 с. Перерегулювання САК за обертовим ступенем рухливості відсутнє, оскільки сигнал керування не виходить за 1% допустиму робочу зону. Також відсутня і статична похибка за обертовим ступенем рухливості, оскільки сигнал керування асимптотично наближується до задачі керування.

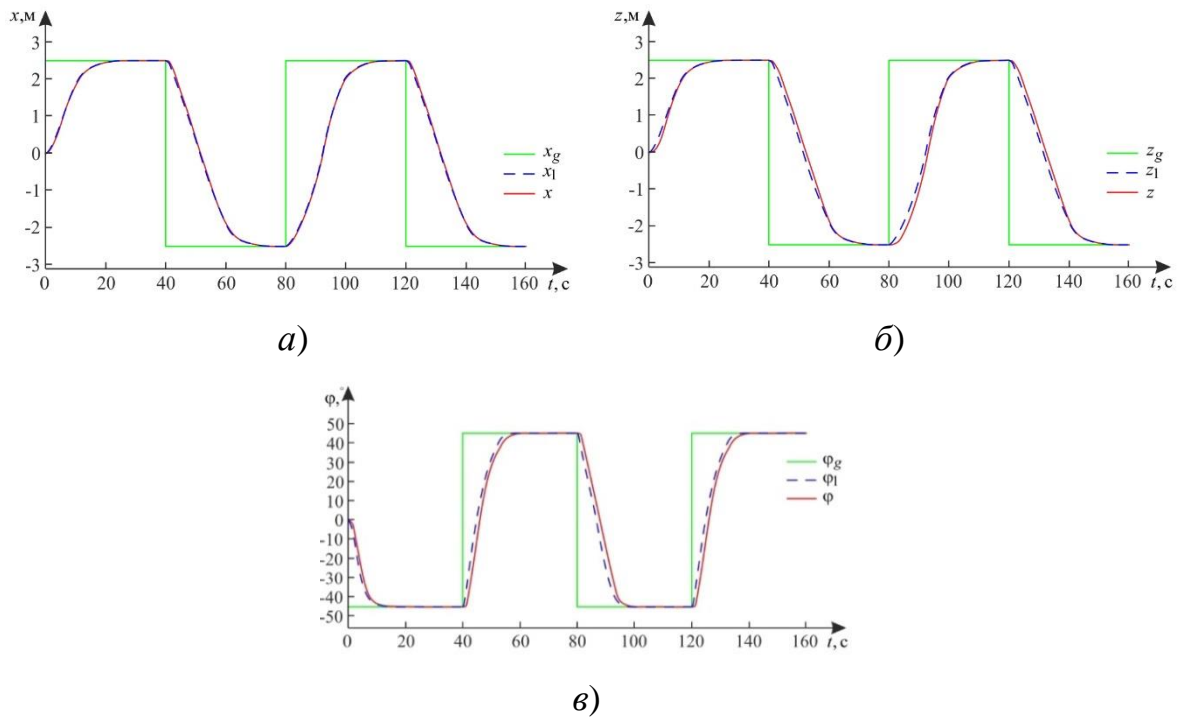


Рис. 1. Динаміка керованих ступенів рухливості ВСПН у разі ступінчатої зміни задачі керування: а) маршовий рух; б) лаговий рух; в) обертальний рух

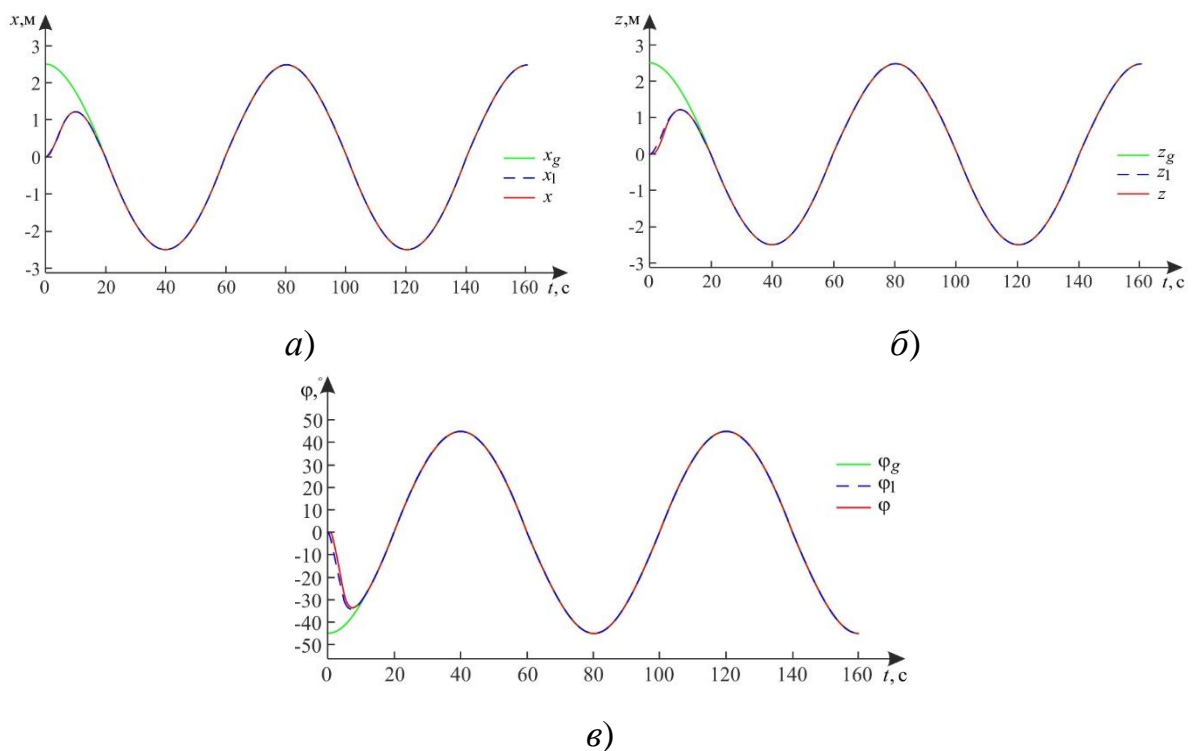


Рис. 2. Динаміка керованих ступенів рухливості ВСПН у разі зміни задачі керування за гармонічним законом: а) маршовий рух; б) лаговий рух; в) обертальний рух

За високої точності перехідного процесу САК відпрацьовує задачу керування, що динамічно змінюється. Найбільша відносна похибка САК за поступальними ступенями не перевищує 0,01% (0,01 м), а за обертним – 0,01 % (0,04°).

Отже, запропонована САК забезпечує високу динамічну точність процесів керування багатовимірним рухом ВСПН за умов невизначеності та впливу збурень.

Обговорення отриманих результатів

На основі методу мінімізації локальних функціоналів, який не використовує інформації про параметри СППА-Т проєкту ВСПН, запропонована САК реалізує багатовимірний закон керування, що забезпечує високу динамічну точність в умовах невизначеності. Синтезований закон керування використовує матриці позиційних кінематичних параметрів СППА-Т.

Забезпечити високі показники якості керування багатовимірним рухом ВСПН за умов обмеження керуючих впливів можливо, задіявши задавач інтенсивності у складі САК. Проте, варто зауважити, що для виведення САК із режиму насичення варто збільшувати значення постійних часу задавача інтенсивності.

Керування багатовимірним рухом СППА-Т проєкту «ВСПН» виконано із розподіленням керуючих сигналів по ступенях рухливості апарата. За цією метою синтезовано багатовимірний закон керування ВСПН із застосуванням псевдооберненої матриці його РКК.

Висновки

1. На основі методів оберненої задачі динаміки та мінімізації локальних функціоналів синтезовано високоточний багатовимірний закон керування самохідним прив'язним підводним апаратом транспортного типу проєкту «Вантажний самохідний підводний носій» за умов невизначеності, інверсна складова дає вектор керуючих впливів, мінімізація локальних функціоналів компенсує невизначеності структури і параметрів об'єкта та зовнішніх збурень.
2. Застосуванням задавача інтенсивності задачі керування, побудованого на основі багатовимірної лінійної моделі об'єкта керування та інверсного регулятора, досягнуто покращення якості процесів керування багатовимірним рухом вантажного самохідного підводного носія апарата за умов обмежень.

3. Синтезовано систему автоматичного керування багатомірним рухом самохідного прив'язного підводного апарата транспортного типу проекту «Вантажний самохідний підводний носій» на основі запропонованого закону керування. Система забезпечує високу динамічну точність керування багатовимірним рухом вантажного самохідного підводного носія за умов невизначеності, обмежень керуючих впливів та впливу зовнішніх збурень.
4. Методом комп'ютерного моделювання досліджено роботу запропонованої системи автоматичного керування багатомірною рухом самохідного прив'язного підводного апарата транспортного типу проекту «Вантажний самохідний підводний носій». Працездатність розробленої системи автоматичного керування підтверджують отримані перехідні процеси керування за відносної похибки не більше 0,01 %. Тривалість перехідних процесів під час потрапляння у 1 % коридор не перевищує 4 с, що є цілком достатнім для системи автоматичного керування багатовимірним рухом вантажного самохідного підводного носія.

Список використаної літератури

1. *Блінцов, В. С., Войтасик, А. М.* Підводна роботизована технологія установки корисного вантажу на морське дно. Міжнародний науково-виробничий журнал Підводні технології. Промислова та цивільна інженерія, 4, 2016. С. 50-59.
2. *Gayvoronskiy S. A., Khozhaev I. V. & Ezangina T. A.* Motion Control System for a Remotely Operated Vehicle with Interval Parameters. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 6:5, 2017, p. 378–384. DOI: 10.18178/ijmerr.6.5.378–384.
3. *Rúa S., Vásquez R. E.* Development of a low-level control system for the ROV Visor3. International Journal of Navigation and Observation, 12. 2016. DOI: 10.1155/2016/8029124.
4. *Xia, G., Pang, C., Xue, J.* Fuzzy neural network-based robust adaptive control for dynamic positioning of underwater vehicles with input dead-zone. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 29, 2015. P. 2585–2595. DOI: 10.3233/IFS-151961.
5. *Yu C., Xiang X., Zhang Q., Xu G.* Adaptive Fuzzy Trajectory Tracking Control of an Under-Actuated Autonomous Underwater Vehicle Subject to Actuator Saturation. International Journal of Fuzzy Systems, 20 (1), p. 269-279. DOI: 10.1007/s40815-017-0396-9.
6. *Herman P., Adamski W.* Non-adaptive velocity tracking controller for a class of vehicles. Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences, 65:4, 2017. P. 459–468. DOI: 10.1515/bpasts-2017-0051.

7. Li X., Zhao M., Ge T. A Nonlinear Observer for Remotely Operated Vehicles with Cable Effect in Ocean Currents. *Applied Sciences*, 8:6, 2018. P. 27. doi: 10.3390/app8060867.
8. Guerrero, J., Torres, J., Creuze, V., Chemori, A. Trajectory tracking for autonomous underwater vehicle: An adaptive approach. *Ocean Engineering*, 172, 2019. P. 511–522. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.12.027.
9. Blintsov, O. V., Burunina Zh. Yu. Voitasyk A. M. Improvement of the inverse dynamics method for high-precision control of nonlinear objects under conditions of uncertainty. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/2 (98), 2019. P. 55-62. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.160345.
10. Блінцов, О. В., Корицький, В. І., Розробка системи автоматичного керування просторовим рухом телекерованого підводного апарата в умовах невизначеності. *Shipbuilding and Marine Infrastructure*, 1 (11), 2019. P. 85-95.