

УДК 629.58:681.5

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2219-3804192018169210>О. В. Блінцов<sup>1</sup>, д.т.н., доцент, В. І. Корицький<sup>2</sup>, викладач**СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ  
ВЕРТИКАЛЬНИМ РУХОМ ТЕЛЕКЕРОВАНОВОГО ПІДВОДНОГО  
АППАРАТА В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ****En**

The automated control system synthesis of vertical motion of a remotely operated underwater vehicle is considered in the paper. To control the motion of the vehicle the law based on local functional minimization method that provides high dynamic precision of the system in uncertainty conditions is used.

The analysis of the depth regulator transitional modes detected the presence of overshoot which significantly increases response time. The overshoot is caused by the delayed exit of the system from saturation mode.

The intensity setter based on a linear dynamic link of the second order and an inverse regulator is proposed. To provide high precision the bounds of plant dynamics have been incorporated in the control law of the intensity setter. The exit of control system from saturation mode is provided by the correction of the intensity setter dynamics. The addition of the intensity setter linked serially with the depth regulator to the system provides the response time decrease without affecting the control system accuracy.

In order to examine the effectiveness of the synthesized automatic control system the computer simulation of the vertical motion of a remotely operated underwater vehicle is performed. The results of computer experiment demonstrated high system accuracy.

**Ru**

Синтезована система автоматического управления вертикальным движением телеуправляемого подводного аппарата в условиях неопределенности на основе метода минимизации локальных функционалов. Анализ процессов управления вертикальным движением подводного аппарата показал наличие перерегулирований, существенно увеличивающих длительность переходных процессов. Установлено, что причиной перерегулирований является несвоевременный выход системы управления из режима насыщения.

Для устранения перерегулирований разработан задатчик интенсивности на базе линейного звена второго порядка и инверсного регулятора, учитывающего ограничения динамики объекта управления. Вывод системы автоматического управления из режима насыщения обеспечивается коррекцией динамики задатчика интенсивности. Подключение задатчика интенсивности последовательно с регулятором глубины обеспечивает уменьшение длительности переходных процессов без влияния на точность системы управления. Результаты компьютерного моделирования показали высокое качество процессов управления.

<sup>1</sup> Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, кафедра комп'ютерних технологій та інформаційної безпеки

<sup>2</sup> Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, кафедра комп'ютерних технологій та інформаційної безпеки

## **Вступ**

Телекеровані підводні апарати (ТПА) застосовуються для виконання великого різноманіття підводних робіт (пошук підводних об'єктів, обстеження гідротехнічних споруд та корпусів суден, монтаж підводних трубопроводів тощо). Керування рухом ТПА у ручному режимі потребує тривалої напруженої роботи оператора, через що знижується ефективність виконуваних підводних робіт. Тому особливо актуальною є задача автоматизації процесу керування рухом ТПА.

Керований рух ТПА, зазвичай, описується системою нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку [1]. Нелінійна природа ТПА, як об'єкта керування, робить неефективним використання традиційних підходів теорії автоматичного керування у вирішенні задачі автоматизації керування рухом апарата. Окрім того, до складу ТПА входять компоненти (кабель-трос, маніпулятор) зі змінними у часі параметрами, точне визначення яких ускладнене. Таким чином для вирішення задачі автоматизації керування рухом ТПА необхідно синтезувати високоточні системи автоматичного керування (САК), які здатні функціонувати в умовах невизначеності параметрів апарата та впливу зовнішніх збурень.

## **Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Існує багато підходів до автоматизації керування рухомими об'єктами, зокрема, підводними апаратами. Найбільш поширеними є методи з застосуванням пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) закону керування, нечітких систем, штучних нейронних мереж, регуляторів в режимі «ковзання».

Системи на основі ПІД закону є простими у розробці та використанні. Однак, ПІД регулятори забезпечують незадовільну якість процесів керування нелінійними об'єктами в умовах невизначеності, що потребує застосування підходів лінеаризації об'єкта керування та введення контурів компенсації зовнішніх збурень.

Так у [2] запропоновано САК просторовим рухом ТПА на базі ПІД регуляторів з контуром компенсації впливу гідродинамічного опору, параметри якого визначаються методом інтервальної лінеаризації. Варто зазначити, що якість процесів керування такої САК залежатиме як від кроку лінеаризації так і від точності виміру складових вектору гідродинамічного опору в контрольних точках.

У [3] запропоновано багатовимірну САК просторовим рухом ТПА на основі ПІД регуляторів. Компенсація збурень від кабель-троса (КТ) забезпечується нелінійним спостерігачем із високим коефіцієнтом підсилення. Запропонований спостерігач моделює рух апарата лише за керованими ступенями рухливості. Це знижує якість процесів керування та

призводить до ускладнення регулятора у разі зміни конфігурації рушійного комплексу ТПА.

У роботі [4] запропоновано САК просторовим рухом ТПА на базі багатовимірного адаптивного ПД регулятора. Підбір параметрів регулятора виконується рекурентною штучною нейронною мережею. Недоліком даної САК є складність налаштування нейронної мережі через можливість потрапляння алгоритму оптимізації вагових коефіцієнтів до локального мінімуму функції втрат.

Багатовимірну САК на основі ПД регулятора для керування ТПА із чотирма ступенями рухливості запропоновано в [5]. Недоліком даної САК є використання законом керування параметрів рушійних пристроїв, які, у загальному випадку, є невизначеними.

Окрім ПД регуляторів поширення набули системи керування рухомими об'єктами на основі регуляторів, які функціонують у режимі «ковзання». Наприклад, у [6] запропоновано САК траєкторним рухом ТПА, яка функціонує у режимі «ковзання». Ефективність САК підтверджено шляхом моделювання ТПА із чотирма керованими ступенями рухливості. Узгодженість роботи рушійних пристроїв забезпечується вибором таких параметрів еталонної моделі, при яких ТПА буде здатний рухатись за еталонною траєкторією. У разі входу САК у режим насичення можливий схід ТПА із еталонної траєкторії, через що бажані значення керуючих впливів можуть вийти за допустимі межі.

У роботі [7] запропоновано багатовимірний регулятор швидкості руху рухомого об'єкта у режимі «ковзання». Авторами запропоновано компенсувати вплив приєднаних мас на швидкісні параметри руху шляхом декомпозиції матриці інерційних параметрів об'єкта керування. Варто відмітити, що якість процесів керування запропонованої системи суттєво знижується при впливі зовнішніх збурень.

Авторами [8] розроблено САК просторовим рухом ТПА із чотирма керованими ступенями рухливості на основі регулятора у режимі «ковзання». Система компенсує вплив течії та збурень від КТ за допомогою нелінійного спостерігача з високим коефіцієнтом підсилення. Модель, яку реалізує спостерігач, не враховує вплив некерованих ступенів рухливості на просторовий рух ТПА, що обмежує можливість застосування розглянутої САК для керування ТПА з іншими конфігураціями рушійних комплексів.

Варто відмітити, що використання САК як із ПД регуляторами, так і з регуляторами у режимі «ковзання» потребує інформації про похідні керованої величини першого та більш високих порядків. Даний недолік усунуто у САК просторовим рухом на базі нейронечіткого регулятора, яку запропоновано у [9]. Також для усунення впливу нелінійності типу «зона нечутливості» авторами запропоновано використання нечіткого

компенсатора. Однак, перехідний процес супроводжується коливаннями сигналів керування у широких діапазонах, які знижують якість процесу.

Аналіз публікацій показує, що під час розробки САК рухомими об'єктами, зокрема ТПА, недостатньо уваги приділяється питанням керування в умовах невизначеності та впливу зовнішніх збурень. Дану роботу присвячено розробці САК рухом ТПА, яка забезпечить високу якість процесів керування в умовах невизначеності та із урахуванням обмежень фазових координат апарата.

### Мета і задачі дослідження

Метою роботи є розробка задавача інтенсивності для керування нелінійним об'єктом в умовах обмежень та удосконалення системи автоматичного керування вертикальним рухом телекерованого підводного апарата із застосуванням розробленого задавача інтенсивності, яка забезпечить високу якість керування в умовах невизначеності.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- проаналізувати роботу САК вертикальним рухом ТПА на основі закону керування, отриманого методом мінімізації локальних функціоналів;
- розробити задавач інтенсивності задачі керування, який забезпечить покращення динамічних характеристик САК;
- синтезувати САК вертикальним рухом підводного апарата із застосуванням задавача інтенсивності;
- дослідити роботу запропонованої САК в умовах невизначеності.

### Аналіз особливостей функціонування високоточної САК нелінійним об'єктом другого порядку в умовах невизначеності

У [10] запропоновано САК нелінійним об'єктом другого порядку із використанням закону керування, отриманого на основі методу мінімізації локального функціоналу методом градієнтного пошуку:

$$\left. \begin{aligned} u &:= \sigma k \left( e + \frac{k}{T_r} e_i \right) + \chi_i; & \chi_i &:= I_\chi(\chi, s, I_\chi, t); \\ e_i &:= I_e(e, s, I_e, t); & \chi &:= \frac{\sigma k}{T_r^2} e_i - hu; & k > 0; & \sigma = \text{sign} \left( \frac{\partial \ddot{y}}{\partial u} \right), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де  $e$  – похибка керування;  $u$  – сигнал керування;  $k$ ,  $h$  – коефіцієнти градієнтного пошуку;  $T_r$  – постійна часу САК;  $e_i$  та  $\chi_i$  – результати інтегрування параметрів  $e$  та  $\chi$  відповідно. Точкою позначено операцію взяття похідної за часом  $t$ .

Для усунення інтегрального насичення САК величини  $e$  та  $\chi$  запропоновано інтегрувати за умовою:

$$I_x(x, s, C, t) := \begin{cases} 0, & \text{за } t = 0; \\ \int_{t_{s=0}}^{\max(t) < t_{s=1}} x dt + C_{t_{s=0}}, & \text{за } s = 0; t > 0; \\ C, & \text{за } s = 1; t > 0, \end{cases} \quad (2)$$

де  $I_x$  – вихід інтегратора;  $x$  – параметр, який надходить до входу інтегратора;  $s$  – ознака інтегрального насичення САК;  $C$  – параметр, який задає початкову умову інтегрування;  $t_{s=0}$  – момент останнього виходу САК із режиму насичення;  $t_{s=1}$  – момент входу САК у режим насичення.

За законом керування, запропонованим в [10], було синтезовано САК вертикальним рухом ТПА. Працездатність розробленої САК підтверджено шляхом комп'ютерного моделювання роботи системи при зміні задачі керування за ступінчастим законом. Динаміку роботи такої системи зображено на рис. 1.

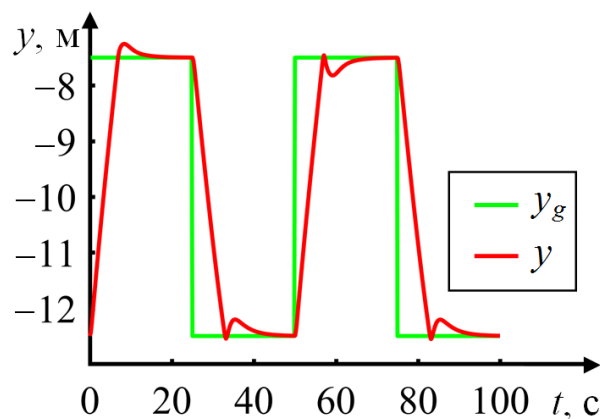


Рис. 1. Динаміка роботи САК у разі ступінчастої зміни задачі керування

Період зростання глибини занурення ТПА у значно менший за період зміни задачі керування  $y_g$ . Однак, наявність перерегулювань суттєво збільшує тривалість перехідного процесу. Для визначення причини виникнення перерегулювань розглянемо динаміку компонентів системи, яку зображено на рис. 2.

На початку перехідного процесу САК входить до режиму насичення, в якому, згідно виразу (2), значення  $e_i$  та  $\chi_i$  не змінюються. Після виходу системи із режиму насичення швидкодії інтеграторів недостатньо для формування керуючого впливу, здатного компенсувати надмірну швидкість руху ТПА. Це призводить до виникнення перерегулювання. Таким чином, для усунення перерегулювань необхідно забезпечити

функціонування САК на межі режиму насичення. Це дозволить уникнути перерегулювань із збереженням швидкодії системи.

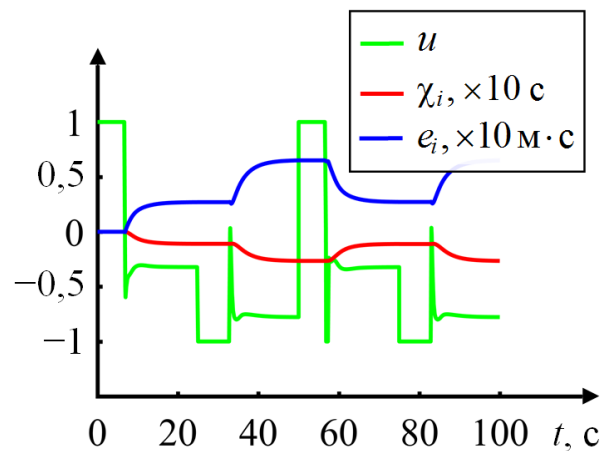


Рис. 2. Динаміка компонентів САК у разі ступінчастої зміни задачі керування

### Розробка задавача інтенсивності для САК об'єктом другого порядку

Якість перехідних процесів САК можна підвищити введенням обмежень на динаміку задачі керування. Поширеним методом реалізації таких обмежень є застосування задавачів інтенсивності (ЗІ) [11]. Зазвичай, задавач представляють динамічною ланкою, яка обмежує похідні задачі керування першого та більш високих порядків.

Введемо обмежуючу функцію:

$$\text{sat}(x, x_{\text{lim}}) = \begin{cases} x_{\text{lim}}, & \text{за } x > x_{\text{lim}}; \\ -x_{\text{lim}}, & \text{за } x < -x_{\text{lim}}; \\ x, & \text{інакше,} \end{cases} \quad (3)$$

де  $x$  – параметр, що обмежується;  $x_{\text{lim}}$  – граничне значення параметру, що обмежується.

Ефективним вважається використання ЗІ із порядком не меншим за порядок диференціальних рівнянь, які описують динаміку об'єкта керування. Оскільки ТПА апроксимовано системою рівнянь другого порядку, то до складу САК рухом ТПА включимо ЗІ другого порядку. Математичну модель такого задавача можна описати наступним виразом:

$$\ddot{y}_{IS} = \text{sat}([K_{IS} y_{in} - 2\zeta T_{IS} \text{sat}(\dot{y}_{IS}, \dot{y}_{IS.lim}) - y_{IS}] / T_{IS}^2, \ddot{y}_{IS.lim}), \quad (4)$$

де  $y_{in}$  – вхід ЗІ;  $y_{IS}$  – вихід ЗІ;  $\ddot{y}_{IS.lim}$ ,  $\dot{y}_{IS.lim}$  – параметри, які визначають порогові насичення сигналів відповідно  $\ddot{y}_{IS}$  та  $\dot{y}_{IS}$ ;  $K_{IS}$  – коефіцієнт передачі ЗІ;  $T_{IS}$  – постійна часу, яка визначає динаміку перехідного

процесу під час виходу параметру  $y_{IS}$  із режиму насичення;  $\zeta$  – коефіцієнт демпфування.

Для уникнення перерегулювань у (4) в інтеграторі, на виході якого отримується швидкість  $\dot{y}_{IS}$ , необхідно застосовувати інтегрування за умовою [12], тобто призупиняти інтегрування, коли перша похідна вхідної величини виходить за допустимі межі.

Використання ЗІ (4) у складі САК обмежить похідні задачі керування. Однак ускладненим є визначення обмежень на відхилення керованої величини об'єкта. Це може призвести до зниження якості процесу керування через неможливість САК за певних умов забезпечити відповідність динаміки ЗІ динаміці об'єкта.

Для вирішення даної проблеми пропонується розробити задавач інтенсивності, який враховуватиме обмеження об'єкта керування, забезпечуватиме високу динамічну точність керування, та ввести його до складу САК, синтезованої на основі закону (1) – (2).

Задавач інтенсивності пропонується представити як систему автоматичного керування високої динамічної точності з внутрішніми регулятором та об'єктом керування з урахуванням обмежень керуючого впливу та фазових координат.

Динаміку об'єкта керування апроксимуємо лінійною динамічною ланкою другого порядку, яка представлятиме внутрішню лінійну модель об'єкта керування ЗІ:

$$\ddot{y}_1 = (k_1 u_1 - 2\zeta T_1 \dot{y}_1 - y_1) / T_1^2, \quad (5)$$

де  $y_1$ ,  $u_1$ ,  $T_1$ ,  $k_1$  – відповідно вихідне значення, сигнал керування, постійна часу та коефіцієнт передачі внутрішньої лінійної моделі об'єкта керування у ЗІ.

Сигнал керування для моделі (5) отримаємо на виході внутрішнього регулятора, синтезованого методом оберненої динаміки [13].

Еталонну модель внутрішнього регулятора в ЗІ також представимо лінійною динамічною ланкою другого порядку:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{y}_{1d} &= \ddot{y}_g + 2\zeta \dot{e} / T_r + e / T_m^2; \\ e &= y_g - y_1, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

де  $y_{1d}$  – бажане значення величини  $y_1$ ;  $y_g$  – задача керування;  $T_m$  – постійна часу еталонної моделі регулятора.

Для отримання закону керування ланкою (5) згідно методу оберненої динаміки виразимо  $u_1$  із (5) та в отриманий вираз підставимо  $\ddot{y}_{1d}$  із (6) замість  $\ddot{y}_1$ :

$$u_1 = (T_1^2 \ddot{y}_{1d} + 2\zeta T_1 \dot{y}_g + y_g) / k_1. \quad (7)$$

Врахуємо нелінійність типу «обмеження» шляхом застосування функції обмеження (3) до фазових координат та керуючого впливу закону керування (7):

$$u_1 = \text{sat}([T_1^2 \text{sat}(\ddot{y}_{id}, \ddot{y}_{lim}) + 2\zeta T_1 \text{sat}(\dot{y}_g, \dot{y}_{lim}) + \text{sat}(y_g, y_{lim})] / k_1, u_{lim}), \quad (8)$$

де  $u_{lim}$ ,  $y_{lim}$ ,  $\dot{y}_{lim}$ ,  $\ddot{y}_{lim}$  – обмеження відповідно керуючого впливу, керованої змінної об'єкта керування, а також першої та другої її похідних.

Обмеження  $u_{lim}$ ,  $y_{lim}$ ,  $\dot{y}_{lim}$ ,  $\ddot{y}_{lim}$  – це визначені параметри об'єкта керування. Наприклад, для прив'язних підводних апаратів позиційні кінематичні параметри (координати) обмежені довжиною кабель-троса, а швидкість руху апарата обмежується потужністю та конфігурацією рушійного комплексу, параметрами КТ та зовнішнього середовища. Обмеження керуючих впливів, обумовлені скінченною потужністю рушійного комплексу. Дані обмеження відповідають параметру  $u_{lim}$  регулятора. Прискорення руху підводних апаратів в загальному випадку залежать від керуючих впливів, тому, прийнявши обмеження для керуючих впливів, можна приймати  $\ddot{y}_{lim} = \infty$ .

Таким чином, ЗІ складається із лінійної моделі об'єкта керування (5), еталонної моделі (6) та закону керування (7), який із урахуванням обмежень (3) приймає вид (8).

### Підвищення ефективності роботи задавача інтенсивності в режимі насичення

Внутрішній об'єкт керування ЗІ апроксимує динаміку об'єкта керування лінійною динамічною ланкою. Використання ЗІ у такій формі забезпечить покращення динамічних характеристик САК лише в окремих режимах, коли лінійна модель об'єкта у ЗІ за структурою та параметрами відповідає реальному об'єкту керування. Для того, щоб ЗІ виводив САК із режиму насичення, введемо до складу САК коригувальну ланку, яка обмежить зростання величини  $u_1$  на період до виходу системи із режиму насичення. Для цього представимо фазовий простір задачі керування матрицею  $Y_g = [y_g \quad \dot{y}_g \quad \ddot{y}_g]$  та введемо матрицю коригованих значень фазових змінних  $\hat{Y}_g = [\hat{y}_g \quad \hat{\dot{y}}_g \quad \hat{\ddot{y}}_g]$ .

Для виведення САК із режиму насичення необхідно забезпечити рух вихідної змінної ЗІ до керованої змінної. Тому коригувальна ланка має реалізовувати наступний вираз:

$$\hat{Y}_g(s, \varphi) = \begin{cases} [y \quad 0 \quad 0], & \text{якщо } s=\text{true} \wedge \varphi=\text{true}; \\ Y_g, & \text{інакше;} \end{cases} \quad (9)$$



$$\varphi = \begin{cases} \text{false, при } (y_1 > y_g + \delta \wedge y_1 > y + \delta) \vee (y_1 < y_g - \delta \wedge y_1 < y - \delta); \\ \text{true, інакше,} \end{cases} \quad (10)$$

де  $\varphi$  – ознака, яка показує, чи знаходиться чисельне значення виходу задавача інтенсивності між значеннями параметрів  $y_g$  та  $y$ ;  $\delta$  – допустиме значення відхилення.

Для забезпечення стійкості САК необхідно сповільнювати ЗІ у режимі насичення, тобто коли вихідна змінна ЗІ рухається до керованої змінної. Для цього виконаємо масштабування постійної часу еталонної моделі внутрішнього регулятора у ЗІ:

$$\hat{T}_m(s, \varphi) = \begin{cases} k_m T_m, \text{ за } s=\text{true} \wedge \varphi=\text{false}; \\ T_m, \text{ інакше,} \end{cases} \quad (11)$$

де  $\hat{T}_m$  – масштабована постійна часу еталонної моделі ЗІ;  $k_m$  – коефіцієнт масштабування. Параметр  $k_m \gg 1$  обирається таким, щоб забезпечити стійкість САК із мінімальним впливом на швидкодію ЗІ.

Структуру запропонованої САК можна представити функціональною схемою, яку зображено на рис. 3.

Регулятор глибини реалізує закон керування (1), інтегральні складові якого обчислюються за виразом (2) та використовує в якості задачі керування вихід задавача інтенсивності  $y_1$ . ЗІ під'єднується послідовно із регулятором глибини та реалізує рівняння (3), (5) – (8). Сигнал керування для ЗІ формується блоком коригування динаміки (9), (11) на основі ознаки  $\varphi$ , яка обчислюється блоком перевірки відхилень (10).

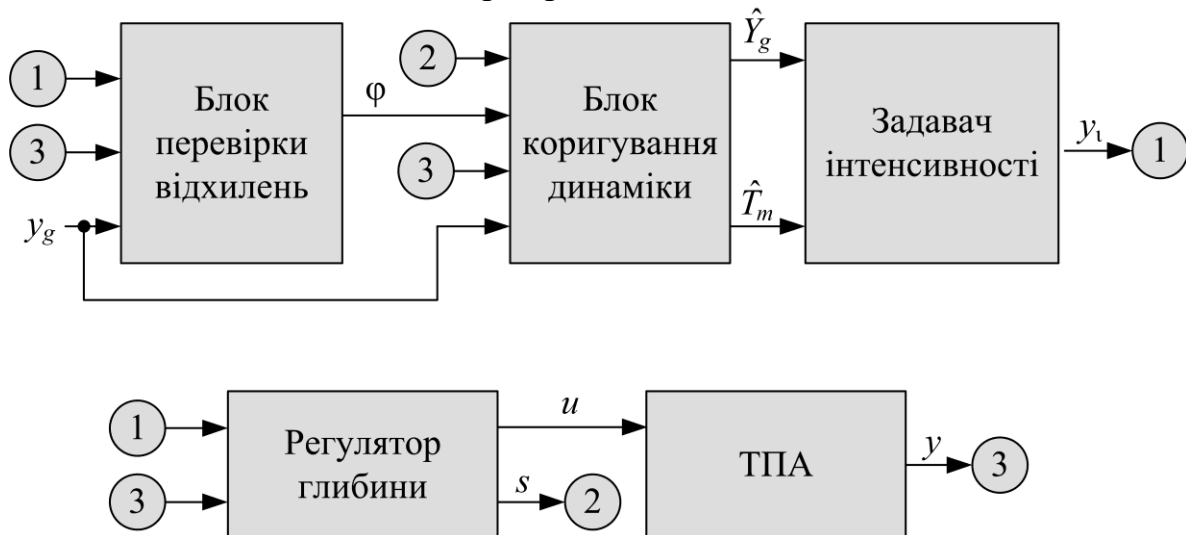


Рис. 3. Структурна схема САК вертикальним рухом ТПА

## Синтез САК вертикальним рухом ТПА

Для дослідження САК використаємо математичну модель динаміки просторового руху ТПА [14], згідно якої динаміка вертикального руху ТПА представляється виразом:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{y} &= F_p(\dot{y}, u) + F_h(\dot{y}) + F_c(y, \dot{y}); \\ F_p &= f(\dot{y}, u); \quad F_h = -0,5\rho k_h S |\dot{y}| \dot{y}; \\ F_c &= f(y, v_c, \rho, L_c, D_c, C_n, C_t); \\ \dot{y} &= v_{rv}; \quad v_c = v_{wg} - v_{vg}, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

де  $m$  – маса ТПА з приєднаною масою води;  $\ddot{y}$  – прискорення вертикального руху ТПА;  $\dot{y}$  – швидкість вертикального руху ТПА відносно води;  $y$  – вертикальна координата підводного апарата відносно судна-носія;  $F_p$  – рушійна сила;  $F_h$  – сила гідродинамічного опору корпусу ТПА;  $F_c$  – збурююча сила КТ;  $k_u$  – коефіцієнт підсилення драйвера електродвигуна;  $u$  – сигнал керування;  $\rho$  – густина води;  $k_h$  – гідродинамічний коефіцієнт корпусу ТПА;  $S$  – характерна площа корпусу ТПА;  $L_c$  – довжина випущеної частини КТ;  $D_c$  – діаметр КТ;  $C_n$ ,  $C_t$  – відповідно нормальний та тангенціальний гідродинамічні коефіцієнти КТ;  $v_c$  – горизонтальна швидкість руху КТ відносно води;  $v_{rv}$  – вертикальна швидкість руху ТПА відносно судна-носія;  $v_{vg}$  – горизонтальна швидкість руху судна-носія (СН) відносно ґрунту;  $v_{wg}$  – швидкість течії.

Моделювання процесу керованого руху будемо виконувати для ТПА, параметри моделі якого зведені у табл. 1.

Таблиця 1.

Параметри моделі вертикального руху ТПА

Параметр	Значення
Характерна площа корпусу	0,5 м <sup>2</sup>
Коефіцієнт гідродинамічного опору	1,5
Маса	100 кг
Коефіцієнт підсилення драйвера рушійного пристрою	310 В
Діапазон допустимих керуючих впливів рушійного пристрою	[-1, 1]
Кількість вертикальних рушійних пристроїв	1 шт
Діапазон упорів рушійного пристрою	[-126, 205] Н
Довжина кабель-троса	50 м
Діаметр поперечного перерізу кабель-троса	20 мм

Параметр	Значення
Коефіцієнт нормальної складової гідродинамічного опору КТ	1
Коефіцієнт тангенціальної складової гідродинамічного опору КТ	0,1

Такий ТПА може розвивати швидкість занурення до 1 м/с під час руху системи у потоці води зі швидкістю 1 м/с.

Застосування розробленого задавача інтенсивності дає змогу підвищити швидкодію САК, синтезованої у [10]. Тому постійну часу еталонної моделі  $T_r$ , обрану в [10], зменшимо із 2 с до 0,75 с. У якості обмежень для регулятора ЗІ оберемо наступні значення:  $u_{lim} = 1$ ,  $y_{lim} = 15$  м,  $\dot{y}_{lim} = 1$  м/с,  $\ddot{y}_{lim} = \infty$  м/с<sup>2</sup>. Оскільки точне визначення динамічних характеристик ТПА ускладнене, оберемо наступні параметри внутрішньої лінійної моделі у ЗІ:  $\zeta = 1$ ,  $k_1 = 1$ ,  $T_1 = T_r$ . Постійну часу еталонної моделі внутрішнього регулятора в ЗІ оберемо  $T_m = T_r$ . Коефіцієнт масштабування  $k_m$  із (11) із урахуванням умови  $k_m \gg 1$  оберемо  $k_m = 5$ . Допустиме значення відхилення траєкторії ТПА від траєкторії ЗІ  $\delta$  оберемо якомога меншим, але таким, щоб забезпечити стійкість САК у режимі насичення  $\delta = 0,01$  м.

Решту параметрів регулятора глибини залишимо незмінними:  $c = 10$ ,  $n = 10$ ,  $T_\Delta = 0,01$  с,  $\alpha^2 = 0,98$  с<sup>2</sup>/м,  $k = 43,6$  м<sup>-1</sup>,  $h = 13,4$ .

### Результати дослідження динаміки перехідних процесів САК вертикальним рухом телекерованого підводного апарата в умовах невизначеності

Динаміку перехідних процесів САК було досліджено методом комп'ютерного моделювання. Одновимірний рух ТПА здійснювався уздовж вертикальної осі (тобто за глибиною) на відстані 45 м від корми СН. Швидкість СН по відношенню до ґрунту складала 1,5 м/с, швидкість зустрічної течії складала 1 м/с. Вся система тому (СН, ТПА та КТ) рухалась відносно водної товщі зі швидкістю  $v_{vw} = 2,5$  м/с.

Якість процесу керування оцінюватимемо за наступними показниками: перерегулювання, похибка керування, тривалість перехідного процесу. За результатами комп'ютерного експерименту у разі швидкості маршового руху відносно води  $v_{vw} = 2,5$  м/с максимальна глибина занурення ТПА складає 15 м. Тому відносну похибку керування будемо визначати відносно максимальної глибини занурення апарата. Тривалість перехідного процесу визначимо як проміжок часу від моменту виходу САК із режиму насичення до моменту, коли відносна похибка керування стає меншою за 1 % (0,15 м).

Динаміку перехідних процесів САК для задачі керування, яка змінюється за ступінчастим законом, зображено на рис. 4.

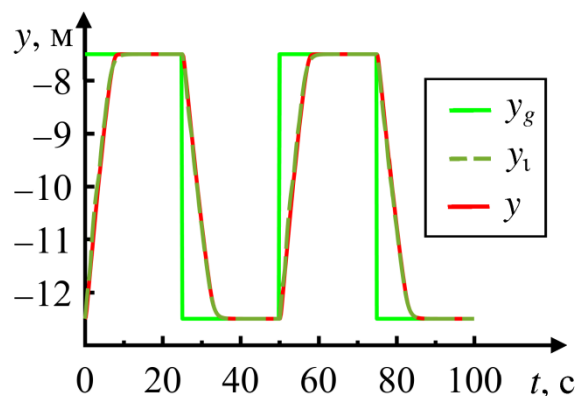


Рис. 4. Динаміка роботи САК у разі ступінчастої зміни задачі керування

На початку перехідного процесу регулятор формує сигнал керування, необхідний для слідування керованої змінної за виходом ЗІ. Однак, на вході системи до режиму насичення блок коригування динаміки сповільнює ЗІ та формує сигнали керування, які наближують значення його виходу до значення керованої змінної. Після виходу системи із режиму насичення ЗІ повертається до роботи у штатному режимі, тобто внутрішні регулятор та лінійна модель об'єкта ЗІ відпрацьовують задачу керування  $y_g$ .

САК забезпечує аперіодичний характер перехідного процесу без перерегулювань та асимптотичне усунення похибки керування. Тривалість перехідного процесу не перевищує 3 с.

Динаміку САК із застосуванням розробленого ЗІ було оцінено шляхом подачі на вхід САК задачі керування, яка змінюється за гармонічним законом. Графік перехідного процесу зображено на рис. 5.

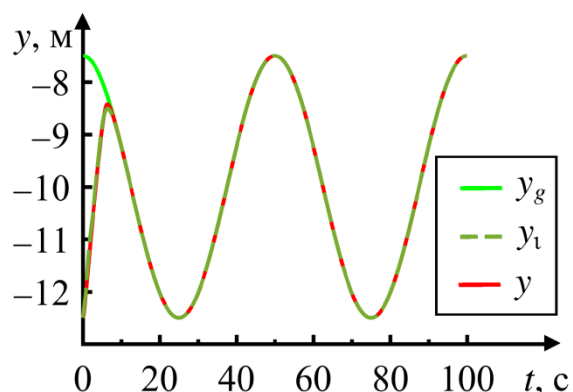


Рис. 5. Динаміка роботи САК при зміні задачі керування за гармонічним законом

У даному випадку САК забезпечує перехідний процес без перерегулювань, тривалість якого також не перевищує 3 с. По завершенні

перехідного процесу САК відпрацьовує задачу керування, що динамічно змінюється, із високою точністю, відносна похибка керованої величини не перевищує 0,01 % (0,0015 м). Таким чином, запропонована САК забезпечує високу динамічну точність процесів керування рухом ТПА в умовах невизначеності та впливу зовнішніх збурень.

### **Висновки**

Проаналізовано особливості функціонування системи автоматичного керування вертикальним рухом телекерованого підводного апарата на основі високоточного закону керування нелінійним об'єктом другого порядку в умовах невизначеності. Встановлено, що перерегулювання виникають внаслідок несвоєчасного виходу системи з режиму насичення.

Розроблено задавач інтенсивності задачі керування на основі лінійної динамічної ланки другого порядку та інверсного регулятора. Регулятор задавача інтенсивності враховує обмеження динаміки об'єкта керування, що дає змогу усунути перерегулювання та збільшити швидкодію системи автоматичного керування в умовах невизначеності.

Удосконалено систему автоматичного керування вертикальним рухом телекерованого підводного апарата, синтезовану на основі методу мінімізації локальних функціоналів, шляхом введення до її складу розробленого задавача інтенсивності. Це дало змогу усунути перерегулювання та підвищити швидкодію системи автоматичного керування телекерованим підводним апаратом при забезпеченні високої динамічної точності керування в умовах невизначеності.

Досліджено роботу удосконаленої системи автоматичного керування методом математичного моделювання вертикального руху телекерованого підводного апарата. Система забезпечує перехідні процеси без перерегулювань та з відносною похибкою не більшою за 0,01 %. Тривалість перехідних процесів після виходу системи із режиму насичення та до потрапляння в 1 % коридор не перевищує 3 с.

### **Список використаної літератури**

1. *Blintsov, O.* Devising a method for maintaining manageability at multidimensional automated control of tethered underwater vehicle [Text] / O. Blintsov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 1, Issue 9. – P. 4–16. doi: 10.15587/1729-4061.2017.93291
2. *Gayvoronskiy, S. A.* Motion Control System for a Remotely Operated Vehicle with Interval Parameters [Text] / Sergey A. Gayvoronskiy, Ivan V. Khozhaev, Tatiana A. Ezangina // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. – 2017. – Issue 6:5. – Pp. 378–384. doi: 10.18178/ijmerr.6.5.378-384.

3. *Fernandes, D. A.* Output feedback motion control system for observation class ROVs based on a high-gain state observer: theoretical and experimental results [Text] / D. A. Fernandes, A. J. Sørensen, K. Y. Pettersen, D. C. Donha // *Control Engineering Practice*, 2015. – Vol. 39. – P. 90–102. doi: 10.1016/j.conengprac.2014.12.005
4. *Hernández-Alvarado, R.* Neural Network-Based Self-Tuning PID Control for Underwater Vehicles [Text] / R. Hernández-Alvarado, L. G. García-Valdovinos, T. Salgado-Jiménez et. al. // *Sensors*. – 2016. – Vol. 16. – 18 p. doi: 10.3390/s16091429.
5. *Rúa, S.* Development of a low-level control system for the ROV Visor3 [Text] / S. Rúa, R. E. Vásquez // *International Journal of Navigation and Observation*, 2016. – Vol. 2016. – 12 p. doi: 10.1155/2016/8029124.
6. *García-Valdovinos, L. G.* Modelling, design and robust control of a remotely operated underwater vehicle [Text] / L. G. García-Valdovinos, T. Salgado-Jiménez, M. Bandala-Sánchez, L. Nava-Balanzar, R. Hernández-Alvarado, J. A. Cruz-Ledesma // *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2014. – Issue 11:1. – 16 p. doi: 10.5772/56810.
7. *Herman, P.* Non-adaptive velocity tracking controller for a class of vehicles [Text] / P. Herman, W. Adamski // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*. – 2017. – Issue 65:4. – Pp. 459–468. doi: 10.1515/bpasts-2017-0051.
8. *Li, X.* A Nonlinear Observer for Remotely Operated Vehicles with Cable Effect in Ocean Currents [Text] / Xiang Li, Min Zhao, Tong Ge // *Applied Sciences*. – 2018. – Issue 8:6. – 27 p. doi: 10.3390/app8060867.
9. *Xia, G.* Fuzzy neural network-based robust adaptive control for dynamic positioning of underwater vehicles with input dead-zone [Text] / G. Xia, C. Pang, J. Xue // *Journal Of Intelligent and Fuzzy Systems*. – 2015. – Vol. 29. – Pp. 2585–2595. doi: 10.3233/IFS-151961.
10. *Блінцов, О. В.* Автоматичне керування безекіпажним підводним комплексом системи моніторингу акваторії в умовах невизначеності [Текст] / О. В. Блінцов, В. В. Соколов, В. І. Корицький // *Сучасні проблеми інформаційної безпеки на транспорті – 2018: Матер. VIII Всеукр. наук.-техн. конф. з між нар. уч.* – Миколаїв : НУК, 2018. – С. 19–26.
11. *Казанцев, В. П.* Системы управления исполнительными механизмами [Текст]: уч. пос. / В. П. Казанцев. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – 274 с.
12. *Денисенко, В. В.* Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием [Текст] / В. В. Денисенко. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 608 с.
13. *Крутько, П. Д.* Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. Цикл лекций [Текст]: уч. пос. / П. Д. Крутько. – М.: Машиностроение, 2004. – 576 с.

14. *Korytskyi, V. I.* Improvement of the Mathematical Model of Spatial Motion of a Remotely Operated Underwater Vehicle with Technological Equipment [Text] / V. I. Korytskyi // *Shipbuilding & Marine Infrastructure*. – 2018. – Issue 1 (9). – Pp. 44-52. doi: 10.15589/SMI.2018.01.06.