

**Показано можливість синтезу систем автоматичного керування рушійно-кермовим комплексом на базі баророзвантаженого асинхронного двигуна при горизонтальному прямолінійному русі підводного апарата з синтезованими адаптивними ПИД-регуляторами та нечіткими регуляторами й подальшої їх корекції за допомогою спеціалізованого моделюючого комплексу. Експериментально доведено працездатність синтезованих систем керування**

**Ключові слова:** баророзвантажений асинхронний двигун, ефективність керування, моделювання, рушійно-кермовий комплекс, спеціалізований моделюючий комплекс

**Показана возможность синтеза систем автоматического управления движительно-рулевым комплексом на базе бароразгруженного асинхронного двигателя при горизонтальном прямолинейном движении подводного аппарата с синтезированными адаптивными ПИД-регуляторами и нечеткими регуляторами и последующей их коррекции с помощью специализированного моделирующего комплекса. Экспериментально доказана работоспособность синтезированных систем управления**

**Ключевые слова:** бароразгруженный асинхронный двигатель, эффективность управления, моделирование, движительно-рулевой комплекс, специализированный моделирующий комплекс

УДК 62-83:629.584  
DOI: 10.15587/1729-4061.2015.51708

# СІНТЕЗ І ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ РУШІЙНО-КЕРМОВИМ КОМПЛЕКСОМ ПІДВОДНОГО АПАРАТА

**В. С. Блінцов**

Доктор технічних наук, професор,  
проректор з наукової роботи,  
завідувач кафедри\*

E-mail: volodymyr.blintsov@nuos.edu.ua

**С. М. Волянський**

Викладач \*

E-mail: ffogres@yandex.ru

\*Кафедра електрообладнання суден та інформаційної безпеки  
Національний університет

кораблебудування ім. адмірала Макарова

пр. Героїв Сталінграда, 9, м. Миколаїв, Україна, 54000

## 1. Вступ

Задача синтезу систем автоматичного керування (САК) підводними апаратами (ПА) через свою неоднозначність є однією з найскладніших при проектуванні таких систем. Найбільш поширеним є параметричний синтез системи заданої структури та синтез коригувальних пристроїв САК за заданими показниками якості: часом перехідного процесу, необхідною точністю та прийнятним характером перехідних процесів у першу чергу – коливальністю перехідного процесу). З можливих рішень остаточно вибирається одне, найкраще, виходячи з конкретних умов застосування ПА.

Розробка САК рухомими об'єктами різного призначення завжди знаходилася в центрі уваги провідних вітчизняних і зарубіжних вчених, серед них академік НАН України В. М. Кунцевич, академіки РАН В. Г. Пешехонов і М. Д. Агеев, J. N. Gores, G. Griffiths (США), С. Mott (Норвегія), J. G. Bellingham (Канада). А з підвищенням швидкості руху, маневрених характеристик, вимог до точності керування й продуктивності підводних робіт актуальності набуває задача удосконалення систем автоматичного керування ПА шляхом розробки нових алгоритмів керування.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

З позиції теорії автоматичного керування ПА є твердим тілом, яке рухається в потоці води завдяки упорам рушійно-кермового комплексу, який в свою чергу є виконавчим механізмом САК рухом ПА. До останніх висуваються жорсткі вимоги: найвища точність керованого руху апарата по заданій траєкторії, досягнення максимальної швидкодії при різних видах руху, зменшення енергоємності [1, 2]. Сьогодні найбільш перспективними є схеми РКК з баророзвантаженими асинхронними двигунами (БАД), заповненими рідким діелектриком, які мають відносно просту конструкцію та невисоку вартість. Саме РКК ПА, як об'єкт керування, без прив'язки його до інших систем підводного апарата, в даний час залишається мало дослідженим, тому що у більшості проведених досліджень ПА розглядається як єдиний комплекс, що призводить до складних розрахункових схем та похибок через велику кількість допущень.

Таким чином, при вирішенні задач синтезу САК РКК ПА на базі БАД, інваріантних до зовнішніх впливів і зв'язків з іншими частинами ПА (маніпуляторами, змінним націпним обладнанням, вантаєм, що транспортується), можна отримати систему керування, що

задовольняє описаним вище вимогам [3]. Крім того, це стимулює побудову систем керування на основі різних елементних баз, зокрема адаптивних ПІД-регуляторів і нечіткої логіки [4–6]. Проте, питання розробки таких регуляторів для САК РКК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА на сьогодні в науково-технічній літературі розглянуто недостатньо.

Відомо, що значна частина досліджень САК електроприводами проводиться шляхом математичного моделювання з використанням прикладних пакетів MATLAB, Mathcad [7]. При цьому допущення, прийняті при описі блоків САК, призводять до зниження її точності, стійкості і т. д. [2]. Для зведення до мінімуму впливу допущень на ефективність керування системою необхідно проводити експерименти на конкретному електроприводі, що не завжди можливо, або на його натурній імітаційній моделі. Але вирішення цієї, також актуальної задачі, потребує розробки спеціалізованого технічного обладнання для дослідження САК РКК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА.

### 3. Ціль і задачі дослідження

Ціль досліджень: підвищення ефективності керування ПА шляхом розробки й дослідження на спеціалізованому моделюючому комплексі систем автоматичного керування РКК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА з синтезованими адаптивними ПІД-регуляторами та нечіткими регуляторами.

Для досягнення поставленої цілі необхідно розв'язати наступні задачі:

- синтезувати закони керування САК РКК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА та підтвердити їх працездатність методом комп'ютерного моделювання;

- розробити, створити й випробувати спеціалізований моделюючий комплекс (СМК) для дослідження ефективності роботи САК РКК ПА в стаціонарних і динамічних режимах, до складу якого має входити метрологічно атестований навчально-дослідницький лабораторний засіб «Стенд випробувальний СВ-1»;

- розробити, реалізувати та дослідити на СМК системи автоматичного керування РКК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА з синтезованими адаптивними та нечіткими регуляторами з метою експериментального підтвердження ефективності отриманих законів керування.

### 4. Матеріали та методи досліджень

#### 4.1. Синтез законів керування САК РКК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА

Рішення задачі синтезу законів керування САК РКК ПА на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА зводиться до синтезу регуляторів. Зазвичай, в системах керування РКК ПА застосовують типові регулятори, най-

більш поширеними серед них є ПІД-регулятори, а також регулятори, побудовані на нечіткій логіці. Але застосування типових регуляторів, що мають жорстке налаштування параметрів, не дозволяє забезпечити необхідні показники якості керування. Крім того, система РКК ПА є об'єктом, де апріорні дані про характеристики або рівняння, що описують всі реакції, отримати неможливо через занадто широкий розкид параметрів. Тому виникає необхідність у використанні слідкуючих систем керування з адаптивними, здатними пристосовуватися до змінюючихся умов довкілля, регуляторами. Такі системи широко використовують робочу інформацію для аналізу динамічного стану системи керування та реалізації контрольованих змін властивостей, параметрів, керуючих дій і структури системи керування. Узагальнена схема слідкуючої адаптивної САК з урахуванням впливу гальмівного гідродинамічного моменту  $Q_g$  (вихід блоку  $W_r(t)$ ) і блоку  $W_k(t)$  адаптивного підбору коефіцієнтів  $k_1, k_2, k_3$  регулятора залежно від температури  $\tau$  та виду  $D$  робочої рідини (діелектрика) баророзвантаженого двигуна, представлена на рис. 1.

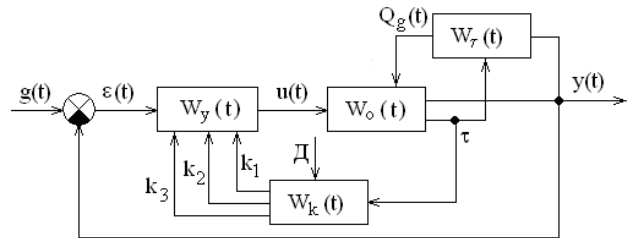


Рис. 1. Узагальнена схема слідкуючої адаптивної САК

Для синтезу САК РКК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА використана спрощена структурна схема РКК ПА [8] з урахуванням узагальненої схеми слідкуючої адаптивної САК (рис. 1). Вихідними параметрами цієї структурної схеми є кутота швидкості обертання гребного гвинта, температура робочої рідини, момент, створюваний гребним гвинтом (ГГ) і швидкість переміщення ПА при його горизонтальному прямолінійному русі. У системі діють наступні збурення: гальмівний момент  $Q_{gr}$  є зовнішньою дією на об'єкт керування, швидкість переміщення ПА  $\vartheta_{ПА}$  – на гребний гвинт, вид робочої рідини  $D$  – на коефіцієнти регулятора. Узагальнена структурна схема синтезуємої САК РКК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА представлена на рис. 2.

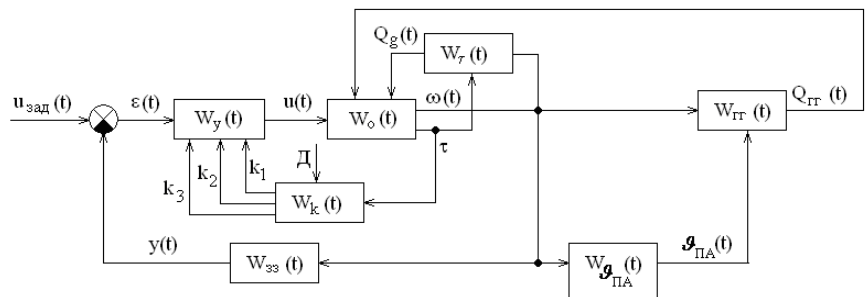


Рис. 2. Узагальнена структурна схема САК РКК, що синтезується, на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА

На рис. 2 позначено:  $W_y(t)$ ,  $W_o(t)$ ,  $W_{гр}(t)$ ,  $W_{зз}(t)$ ,  $W_{\vartheta_{ПА}}(t)$ ,  $W_{\tau}(t)$ ,  $W_k(t)$  – передатні функції регулятора, об'єкту керування, гребного гвинта, зворотного зв'язку, швидкості прямолінійного горизонтального руху ПА, гідродинамічного гальмівного моменту, блоку адаптивного підбору коефіцієнтів регулятора відповідно;  $u_{зад}(t)$  – заздалегідь невідома дія;  $\epsilon(t)$  – помилка стеження;  $u(t)$  – керуюча дія;  $\omega(t)$  – кутова швидкість обертання електродвигуна;  $Q_{гр}(t)$  – гальмівний момент ГГ;  $\vartheta_{ПА}(t)$  – швидкість прямолінійного горизонтального руху ПА;  $y(t)$  – сигнал зворотного зв'язку;  $Q_g(t)$  – гідродинамічний гальмівний момент;  $\tau$  – температура робочої рідини;  $k_1, k_2, k_3$  – коефіцієнти регулятора;  $D$  – вид робочої рідини.

Блоки  $W_o(t)$ ,  $W_{гр}(t)$ ,  $W_{зз}(t)$ ,  $W_{\vartheta_{ПА}}(t)$ ,  $W_{\tau}(t)$ ,  $W_k(t)$  є нелінійними й мають суттєву невизначеність. Спроба зробити лінеаризацію цих блоків може призвести до істотного збільшення помилок при проходженні сигналів у системі. Блок  $W_y(t)$  при використанні в ньому класичних регуляторів є лінійним ( $W_y(p)$ ), а при застосуванні нечіткої логіки – нелінійним ( $W_y(t)$ ). Внаслідок того, що передатна функція регулятора  $W_y(t)$  залежить від  $\tau$  і  $D$ , вона перетворюється до виду  $W_y(t, k_i(\tau, D))$ , де  $k_i(\tau, D)$  – функція коефіцієнтів ПІД-регулятора.

В залежності від того, за якою величиною проводиться керування, узагальнена структурна схема синтезованої САК РКК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА (рис. 2) трансформується до видів, представлених на рис. 3–5. На рис. 3 введено зворотний зв'язок через блок  $W_F(t)$  – передатну функцію упору гребного гвинта.

Загальний вигляд закону керування для структурних схем (рис. 3–5) визначається видом функції  $u(t)$

$$u(t) = \epsilon(t) W_y(t, k_i(\tau, D)), \quad (1)$$

де  $W_y(t, k_i(\tau, D))$  – передатна функція регулятора.

Враховуючи, що в усіх приведених на рис. 3–5 структурних схемах передатна функція регулятора  $W_y(t, k_i(\tau, D))$  одна і та ж величина, то закони керування (1) для цих схем визначаються функцією помилки стеження  $\epsilon(t)$ .

Закон керування САК РКК по стабілізації кутової швидкості обертання гребного гвинта ПА має вигляд (схема рис. 3):

$$\epsilon(t) = u_{зад}(t) - \omega(t),$$

$$u(t) = W_y(t, k_i(\tau, D)) \epsilon(t) = W_y(t, k_i(\tau, D)) [u_{зад}(t) - \omega(t)]. \quad (2)$$

Закон керування САК РКК по стабілізації упору гребного гвинта ПА має вигляд (схема рис. 4):

$$\epsilon(t) = u_{зад}(t) - F_{гр}(t),$$

$$u(t) = W_y(t, k_i(\tau, D)) \epsilon(t) = W_y(t, k_i(\tau, D)) [u_{зад}(t) - F_{гр}(t)]. \quad (3)$$

Закон керування САК РКК по стабілізації швидкості переміщення ПА при його горизонтальному прямолінійному русі має вигляд (схема рис. 5):

$$\epsilon(t) = u_{зад}(t) - \vartheta_{ПА}(t),$$

$$u(t) = W_y(t, k_i(\tau, D)) \epsilon(t) = W_y(t, k_i(\tau, D)) [u_{зад}(t) - \vartheta_{ПА}(t)]. \quad (4)$$

Блоки наведених на рис. 3–5 структурних схем, крім блоку регулятора  $W_y(t, k_i(\tau, D))$  будуються за рівняннями уточненої математичної моделі системи РКК ПА на базі БАД при його горизонтальному прямолінійному русі, детально розглянутій у [2, 8].

Синтез регулятора  $W_y(t, k_i(\tau, D))$  в роботі виконано за допомогою пакету Simulink середовища MATLAB.

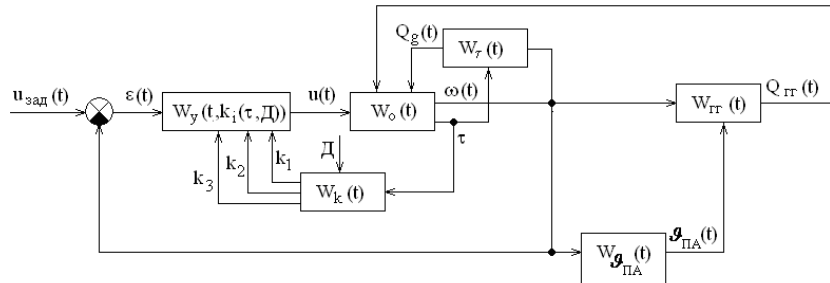


Рис. 3. Структурна схема САК РКК стабілізації кутової швидкості обертання гребного гвинта ПА

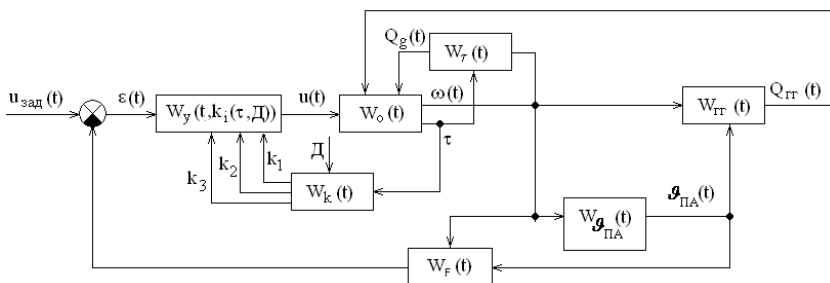


Рис. 4. Структурна схема САК РКК стабілізації упору гребного гвинта ПА

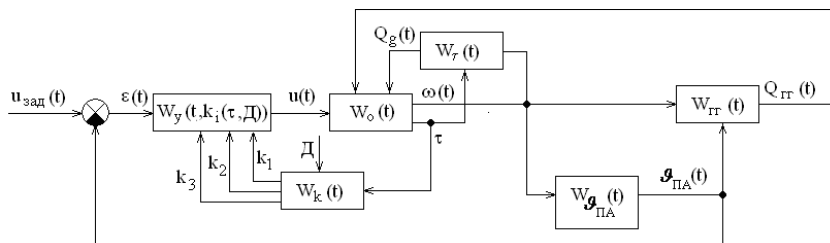


Рис. 5. Структурна схема САК РКК стабілізації швидкості переміщення ПА при його горизонтальному прямолінійному русі

**4. 2. Розробка спеціалізованого моделюючого комплексу**

До складу спеціалізованого моделюючого комплексу (СМК) входить навчально-дослідницький лабораторний засіб «Стенд випробувальний СВ-1», зовнішній вигляд якого представлено на рис. 6.

Структурно СМК містить:

- електромеханічну частину у вигляді набору електродвигунів постійного та змінного струму з програмно керованим електромеханічним навантаженням на їхні робочі вали;

- програмну частину у складі розроблених у середовищі Matlab Simulink – моделей САК РКК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА, бібліотеки даних з синтезованими адаптивними ПІД-регуляторами та нечіткими регуляторами;

- інтерфейс електромеханічної та програмної частин.

СМК пройшов метрологічну атестацію і дає змогу досліджувати ефективність САК з ПІД- та нечіткими регуляторами для електроприводів рушійно-кермових комплексів підводних апаратів.

**4. 3. Експериментальні дослідження САК РКК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА на СМК з різними синтезованими регуляторами**

Для проведення експериментальних досліджень САК РКК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА використано розроблений спеціалізований моделюючий комплекс і синтезовані в [8] регулятори. Розроблено Simulink – моделі САК РКК по стабілізації кутової швидкості обертання, упору ГГ та швидкості переміщення ПА при його горизонтальному прямолінійному русі з синтезованими адаптивними ПІД-регуляторами та нечіткими регуляторами (рис. 7).

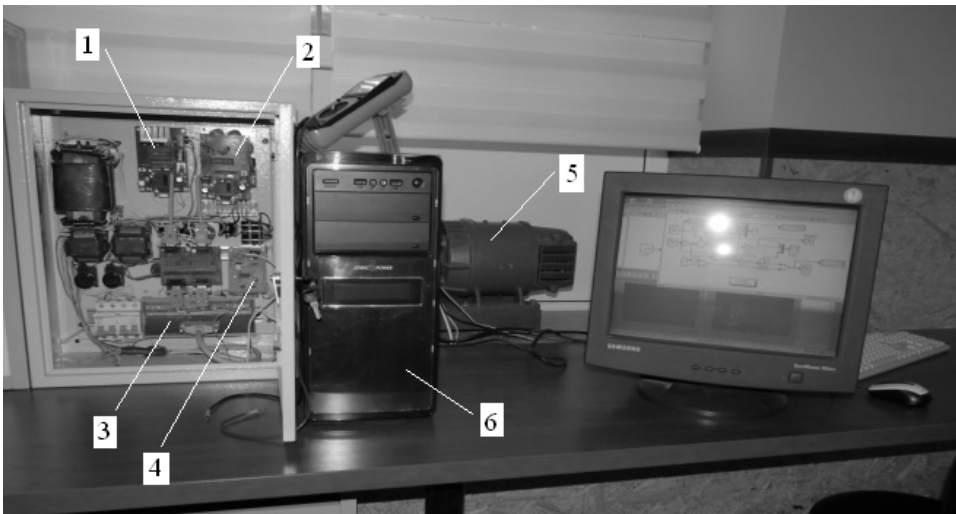


Рис. 6. Фото спеціалізованого моделюючого комплексу: 1 – силовий блок-1; 2 – силовий блок-2; 3 – блок інтерфейсу; 4 – блок вимірювання; 5 – електромеханічний блок; 6 – блок керування ПЕОМ

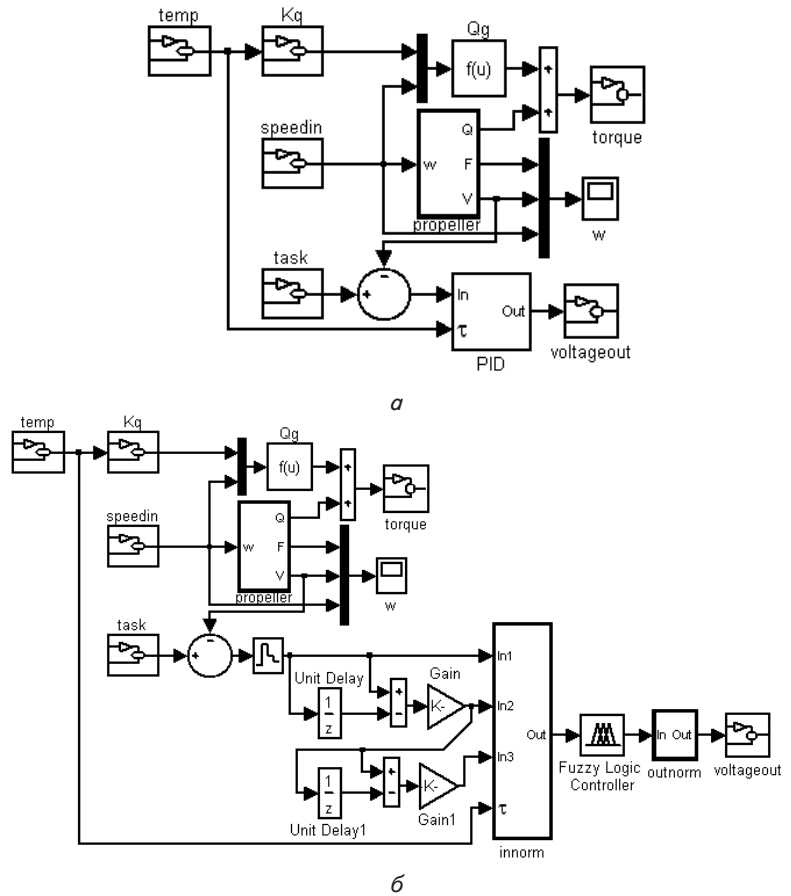


Рис. 7. Simulink – модель для експериментальних досліджень САК РКК по стабілізації швидкості переміщення ПА при його горизонтальному прямолінійному русі на СМК: а – з адаптивним ПІД-регулятором; б – з нечітким регулятором

Simulink – моделі (рис. 7) містять наступні основні блоки:

- блок «voltageout» служить для перетворення та передачі керуючої дії на привід виконавчої машини;
- блок «torque» призначений для перетворення та передачі керуючої дії на привід машини навантаження;
- блок «speedin» служить для отримання та перетворення сигналів з датчика частоти обертання виконавчої машини;
- блок «temp» призначений для отримання та перетворення сигналу з датчика температури рідини робочої машини;
- блок «w» використовується для візуалізації результатів експерименту;
- блок «PID» є адаптивним ПІД-регулятором;
- блок «propeller» служить для розрахунку упору гальмівного моменту гребного гвинта;
- блок «inppgm», в якому робиться фазифікація



помилки, першої і другої похідних помилки, температури робочої рідини;

– блок «Fuzzy Logic Controller», в якому проводиться розрахунок керуючої дії;

– блок «outport», в якому робиться дефазифікація керуючої дії.

Основні результати досліджень, САК РРК ПА проведених на базі СМК, наведено нижче.

**5. Результати досліджень САК РРК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА на СМК з різними синтезованими регуляторами**

Результати експериментальних досліджень САК РРК по стабілізації швидкості переміщення ПА при його горизонтальному прямолінійному русі на СМК представлено на рис. 8, а, б.

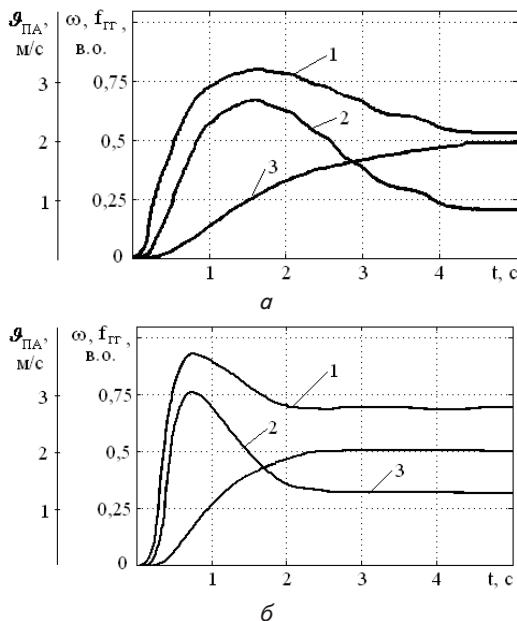


Рис. 8. Результати експериментальних досліджень САК РРК по стабілізації швидкості переміщення ПА при його горизонтальному прямолінійному русі на СМК з адаптивним ПІД-регулятором (а) і з нечітким регулятором (б): крива 1 – кутова швидкість обертання ГГ  $\omega_{ед}$ ; крива 2 – упор ГГ  $f_{гр}$ ; крива 3 – швидкість переміщення при горизонтальному русі ПА  $v_{ПА}$

З графіків рис. 8 видно, що синтезовані САК РРК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА є стійкими. Розбіжність результатів комп’ютерного моделювання та результатів експериментальних досліджень незначна й складає 5–8 %, що є достатнім для об’єктів такої складності.

**6. Обговорення результатів дослідження розробленої САК РРК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА на СМК з різними синтезованими регуляторами**

Наявність в САК РРК ПА такої нелінійної зовнішньої обурюючої дії як гідродинамічний гальмів-

ний момент [4] призводить до того, що класичний ПІД-регулятор [9, 10] з постійними коефіцієнтами не забезпечує стабільні параметри якості керування в усьому діапазоні зміни температури робочої рідини (діелектрика) баророзвантаженого асинхронного двигуна. Застосування в САК РРК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА адаптивних ПІД-регуляторів дало змогу суттєво поліпшити показники якості керування: перерегулювання зменшене з 22 % до 0 %, час перехідного процесу скорочено до 2,5 разів у крайніх точках робочого діапазону температури.

При аналізі перехідних процесів можна зробити висновок, що адаптивні ПІД-регулятори в САК РРК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА забезпечують стійке відпрацювання вхідного сигналу по різних каналах керування з досить малими помилками розузгодження.

Як показали проведені дослідження, застосування нечіткого регулятора, наприклад, в САК РРК по стабілізації упору гребного гвинта ПА, дало змогу понизити в 2,5 рази помилку розузгодження й в 3 рази перерегулювання в порівнянні з аналогічною системою з адаптивним ПІД-регулятором. Крім того, застосування нечітких регуляторів в САК РРК ПА по стабілізації кутової швидкості обертання ГГ та по стабілізації швидкості переміщення ПА при його горизонтальному прямолінійному русі забезпечує зниження від 1,6 до 2 разів часу перехідного процесу в порівнянні з аналогічними САК РРК ПА з адаптивними ПІД-регуляторами.

Таким чином, можна стверджувати наступне: особливості налагодження адаптивного ПІД-регулятора дозволяють ефективно використовувати його за наявності достовірних функцій зміни внутрішніх збурюючих дій, наприклад, гідродинамічного гальмівного моменту баророзвантаженого асинхронного двигуна. Але в той же час, практично, дуже складно враховувати зовнішні обурюючі дії (набігаючий на ПА потік води, що нелінійно змінюється, нелінійний момент гребного гвинта і т. д.). За наявності достовірного спостерігача та відповідних баз правил цих недоліків позбавлена САК РРК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА з нечіткими регуляторами.

**7. Висновки**

Встановлено наступне:

– на основі удосконаленої узагальненої структури РРК ПА шляхом введення в неї передатних ланок, які відповідають заданому параметру керування та зворотних зв’язків, що враховують властивості БАД як нелінійного об’єкту керування в залежності від температури та виду діелектрика, синтезовано закони керування САК РРК по стабілізації кутової швидкості обертання, упора гребного гвинта ПА та швидкості переміщення ПА при його горизонтальному прямолінійному русі, що дають змогу підвищити ефективність керування підводним апаратом;

– на підставі розробленої узагальненої структурної схеми слідкуючої адаптивної САК РРК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА залежно від того, за якою величиною проводиться керуван-

ня, отримано структурні схеми, які використано для синтезу законів керування САК РКК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА;

Рішенням другої задачі є розробка, створення, випробування, впровадження у виробництво й до навчального процесу спеціалізованого моделюючого комплексу для дослідження ефективності САК електроприводами будь-якого роду струму, до складу якого входить метрологічно атестований навчально-дослідницький лабораторний засіб «Стенд випробувальний СВ-1».

Розробка, реалізація та дослідження на СМК САК РКК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА з синтезованими адаптивними ПІД-регуляторами та нечіткими регуляторами – це

рішення третьої задачі. Експериментально підтверджено ефективність отриманих законів керування, розбіжність результатів комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень незначна й складає 5–8%. Крім того, проведені дослідження підтвердили можливість подальшого удосконалення структури САК РКК ПА шляхом використання синтезованих адаптивних ПІД-регуляторів і нечітких регуляторів, бібліотеки даних з автоматичним вибором регулятора за наявності невизначених зовнішніх збурень при горизонтальному прямолінійному русі ПА, що підвищує ефективність керування під час переміщення підводного апарата при довільному законі зміни його горизонтальної прямолінійної швидкості.

### Література

1. Агеев, М. Д. Автономные необитаемые подводные аппараты [Текст] / М. Д. Агеев. – Владивосток: Дальнаука, 2004. – 272 с.
2. Блинцов, В. С. Определение потерь в погружном электроприводе подводного аппарата. [Текст] / В. С. Блинцов, Д. В. Костенко, П Шимчак // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірка наукових праць. – 2001. – Вип. 10. – С. 410–411.
3. Filaretov, V. P. Adaptive Control System with Variable Structure for Underwater Robot [Text] / V. P. Filaretov, D. A. Uklimeets // Proc. of the 12 DAAAM Symp. on Intelligent Automation and Manufacturing, Jena, Germany, 2001. – P. 141–142.
4. Король, Ю. М. Влияние гидродинамических потерь на механические характеристики капсулированных управляемых асинхронных двигателей подводных аппаратов [Текст]: сб. науч. тр. / Ю. М. Король // Николаев: НУК. – 2004. – № 6. – С. 15–24.
5. Mann, G. K. I. Analysis of direct action fuzzy PID controller structures [Text] / G. K. I. Mann, Hu Bao-Gang, R.G. Gosine // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B (Cybernetics). – 1999. – Vol. 29, Issue 3. – P. 371–378. doi: 10.1109/3477.764871
6. Widrow, B. Adaptive Inverse Control [Text] / B. Widrow, E. Walach // Prentice-Hall. – 1996. – Vol. 4. – P. 111–114.
7. Бочаров, Л. Ю. Современные тенденции в развитии миниатюрных подводных аппаратов и роботов за рубежом [Текст] / Л. Ю. Бочаров // Подводные исследования и робототехника. – 2006. – № 2. – С. 36–52.
8. Воляський, С. М. Удосконалення автоматичного керування рушійно-кермовим комплексом підводного апарата [Текст]: сб. наук. пр. / В. С. Блінцов, С. М. Воляський // Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. НТУ «ХПІ», 2015. – С. 238–243.
9. Aicardi, M. Closed Loop Time Invariant Control of 3D Underactuated Underwater Vehicles [Text] / M. Aicardi, G. Casalino, G. Indiveri // Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164), 2001. – P. 903–908. doi: 10.1109/robot.2001.932665
10. Zhou, J. Y. Robust Nonlinear Reduced-Order Dynamic Controller Design and its Application to a Single-link Manipulator [Text] / J. Y. Zhou, R. J. Zhou, Y. Y. Wang // Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164), 2001. – P. 1149–1154. doi: 10.1109/robot.2001.932766