

DOI 10.15589/jnn20150516  
УДК 62-83:629.584  
В72

DEVELOPMENT AND STUDY OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM  
FOR UNDERWATER VEHICLE VELOCITY CONTROL  
AT RECTILINEAR PLATFORMING

РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ  
ШВИДКІСТЮ ПЕРЕМІЩЕННЯ ПІДВОДНОГО АПАРАТА  
ЗА ЙОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПРЯМОЛІНІЙНОГО РУХУ

Serhii M. Volianskyi

ffogres@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-7922-0441

С. М. Волянський

асист.

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

**Abstract.** The combined method of perturbation compensation has got a further development. It enables improving the underwater vehicle steering precision by selecting the coefficients of the adaptive controller depending on the time-varying parameters of the altitude-unloaded asynchronous engine. An automatic control system for underwater vehicle velocity control at rectilinear platforming has been developed. It consists of subsystems for control of the angular velocity of the propeller with the adaptive PID-controller, the propeller thrust and the velocity of the underwater vehicle with fuzzy controllers. The operation of the control system with synthesized controllers has been modelled. The studies have shown an increase of the performance up to two times and 12% decrease of the control system tracking error in a complex law of rectilinear motion velocity change of the underwater vehicle.

**Keywords:** propeller system; altitude-unloaded asynchronous engine, underwater vehicle, control law, controller.

**Анотація.** Отримав подальший розвиток комбінований метод компенсації збурень, який дає змогу шляхом вибору коефіцієнтів адаптивного регулятора залежно від нестационарних параметрів баророзвантаженого асинхронного двигуна підвищити точність керування підводним апаратом. Розроблено систему автоматичного керування швидкістю переміщення підводного апарата за його горизонтального прямолінійного руху. Проведено моделювання роботи системи керування із синтезованими регуляторами.

**Ключові слова:** рушійний комплекс; баророзвантажений асинхронний двигун; підводний апарат; закон керування; регулятор.

**Аннотация.** Получил дальнейшее развитие комбинированный метод компенсации возмущений, позволяющий путем выбора коэффициентов адаптивного регулятора в зависимости от нестационарных параметров бароразгруженного асинхронного двигателя повысить точность управления подводным аппаратом. Разработана система автоматического управления скоростью перемещения подводного аппарата при его горизонтальном прямолинейном движении. Проведено моделирование работы системы управления с синтезированными регуляторами.

**Ключевые слова:** движительный комплекс; бароразгруженный асинхронный двигатель; подводный аппарат; закон управления; регулятор.

#### REFERENCES

- [1] Ageev M. D., Kiselev L. V., Matvienko Yu. V. *Avtonomnye podvodnye roboty. Sistemy i tekhnologii* [Autonomous underwater robots. Systems and technologies]. Moscow, Nauka Publ., 2005. 400 p.
- [2] Vlasov K. P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of automatic control]. Kharkov, Gumanitarnyy tsentr Publ., 2007. 526 p.
- [3] Volyanskiy S. M. *Sintez matematicheskoy modeli dvizhitelno-rulevogo kompleksa podvodnogo apparata kak obekta upravleniya* [Synthesis of a mathematical model of the propulsion-steering system of an underwater vehicle as a control object]. *Visnik NUK — Bulletin of NUOS*, 2014, issue 3. Available at: <http://dx.doi.org/10.15589.evn20140305>.
- [4] Volyanskiy S. M. *Sintez zakonov upravleniya SAU dvizhitelno-rulevym kompleksom pri gorizontalnomy pryamolineynom dvizhenii podvodnogo apparata* [Synthesis of control laws of the automated control system

for a propulsion-steering system at the underwater vehicle rectilinear platforming]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of Scientific Publications of NUS*, 2015, no. 2, pp. 79–87.

- [5] Gostev V. I. *Sintez nechetkikh regulyatorov sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Synthesis of fuzzy controllers of automatic control systems]. Kiev, Radioamator Publ., 2003. 512 p.
- [6] Zaichenko, Yu. P. *Osnovy proektuvannia intelektualnykh sistem* [Basics of intellectual systems design]. Kyiv, Slovo Publ., 2004. 352 p.
- [7] Korol Yu. M. *Postroenie matematicheskoy modeli dlya avtomatizirovannogo proektirovaniya podrulivayushchiy ustroystv podvodnykh apparatov* [Construction of a mathematical model for the automated design of the maneuvering devices of underwater vehicles]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of Scientific Publications of NUS*, 2005, no. 3 (402), pp. 20–30.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Світовий досвід у сфері застосування підводних апаратів (ПА) досить великий [1, 6], проте багато важливих задач тільки формулюються в результаті виявлення низки технічних проблем, зумовлених специфікою підводного середовища й характером самих розв'язуваних завдань. Зокрема, постійно зростають вимоги щодо точності керування рухом ПА.

Успішний розв'язок цієї проблеми має особливу актуальність для створення високоточних систем керування рухом ПА. Такі системи дадуть змогу значно розширити перелік підводно-технічних робіт і підвищити продуктивність застосування ПА. Створення малих і дешевих ПА з ефективними системами автоматичного керування (САК) рухом дасть можливість реалізовувати багато задач, зокрема вимірювання параметрів водного середовища в інтересах природоохоронних організацій, висвітлення підводної обстановки на значних акваторіях в інтересах безпеки й оборони країни.

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Задачі автоматичного керування рухом ПА належать до найбільш складних у підводній робототехніці. Дослідження в цьому напрямі завжди були в центрі уваги вітчизняних і зарубіжних науковців. Зокрема, значний внесок у розробку таких систем зробили М. Д. Агеев, Л. Грейнер, О. М. Ткаченко, В. Ф. Філаретов, В. С. Ястребов, С. Мур.

До головних наукових результатів цих досліджень слід віднести створення загальної теорії автоматичного керування гребними електро- і гідравлічними двигунами ПА, розробку загальних принципів синтезу регуляторів кутової швидкості, упору, моменту і механічної потужності на валу приводних механізмів гребних гвинтів (ГГ), а також синтез високоефективних ПД — й адаптивних регуляторів цих приводів.

Перспективним підходом щодо подальшого вдосконалення САК рухом ПА є розробка систем керування, інваріантних до внутрішніх і зовнішніх збурюючих впливів.

**МЕТА РОБОТИ** — розробка й дослідження САК швидкістю переміщення ПА за його прямолинійного горизонтального руху.

### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Відомо, що до складу існуючих систем керування рухом ПА входять датчики швидкості переміщення ПА [2], сигнали з яких вводяться до зворотних зв'язків САК, але при цьому під час налаштування системи керування не враховуються зовсім або некоректно враховуються нелінійності в блоках розрахунку параметрів двигунів, рушіїв і гідродинамічного опору корпусу ПА. Тому спроба побудувати САК рухом ПА, використовуючи тільки зовнішній контур зворотного зв'язку зі швидкості переміщення ПА, призводить до появи великих помилок стеження, надмірного перегулювання й збільшення швидкодії при складних законах зміни заданої швидкості.

Для того, щоб усунути ці недоліки, САК рухом ПА можна уявити як сукупність окремих підсистем керування (ПСК), синтезованих за допомогою комбінованого методу компенсації збурень [2].

Компенсаційне керування перспективне у силу таких причин:

- наявна багатоконтурна схема з можливістю поділу контурів за програмними цілями керування: зовнішній контур реалізує критерій стабілізації, внутрішні — критерії компенсації або зменшення впливів збурень;

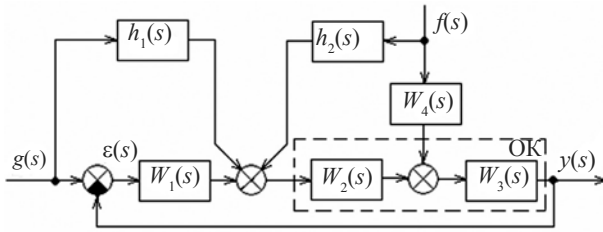
- при розподілі цілей за контурами керування зменшується обсяг синтезу й аналізу САК;

- за наявною поточною інформацією про збурення можливе паралельне вирішення задач контролю й діагностування;

- системи з компенсацією збурень можуть наблизитися за якістю до систем з повною інваріантністю.

В існуючих САК, синтезованих за допомогою комбінованого методу компенсації збурень (рис. 1), остання досягається за рахунок компенсації за входного задавального впливу й компенсації зовнішніх чи (або) внутрішніх збурень.

На відміну від схеми САК, представленої на рис. 1, у даній роботі компенсація збурень об'єкта виконується згідно із законами керування [4] шляхом врахування нелінійних характеристик втрат гальмівного гідродинамічного моменту баророзвантаженого асинхронного двигуна (БАД) й упорів рушіїв.



**Рис. 1.** Структура системи керування, синтезованої комбінованим методом компенсації збурень:

$W_1(s)$  — передатна функція регулятора;  $W_2(s)$  і  $W_3(s)$  — передатні функції об’єкта керування;  $W_4(s)$  — передатна функція збурюючої дії на ОК;  $h_1(s)$  — компенсатор з вхідного задавального впливу;  $h_2(s)$  — компенсатор зі збурення;  $y(s)$  — керована змінна;  $g(s)$  — заздалегідь невідома дія;  $\varepsilon(t)$  — помилка стеження;  $f(s)$  — збурююча дія

На першому етапі синтезується ПСК кутовою швидкістю ГГ, яка повинна забезпечити компенсацію динамічних властивостей БАД за будь-яких змін втрат його гальмівного гідродинамічного моменту. Це досягнуто шляхом введення блоку адаптивного підбору коефіцієнтів регулятора  $W_k(s)$  і блоку гідродинамічного гальмівного моменту  $W_\tau(s)$  у ланцюг збурюючої дії  $\tau$ .

На другому етапі синтезується ПСК упором ГГ, що дозволяє забезпечити незалежність процесу керування від змін параметрів і динамічних властивостей рушіїв. При цьому в процесі синтезу передбачається, що гребний БАД вже має незмінні динамічні властивості, які забезпечуються за допомогою синтезованої на першому етапі ПСК кутової швидкості ГГ.

Відомо, що якість роботи системи керування ПА загалом значною мірою залежить від якості керування рушійним пристроєм (РП). Тобто, при зниженні точності роботи САК РП ПА на 20% помилка стеження при переміщенні ПА за складним законом зміни швидкості може збільшитися майже вдвічі [2].

На третьому етапі синтезується ПСК швидкістю переміщення ПА, що забезпечує швидкодію й зниження перерегулювання САК в цілому. При цьому враховуються зміни параметрів і динамічні властивості ПА (наприклад, зміни гідродинамічного опору корпусу ПА залежно від його швидкості).

Нечіткі регулятори для ПСК упором ГГ і ПСК швидкістю переміщення ПА аналогічні регуляторам у [2, 5].

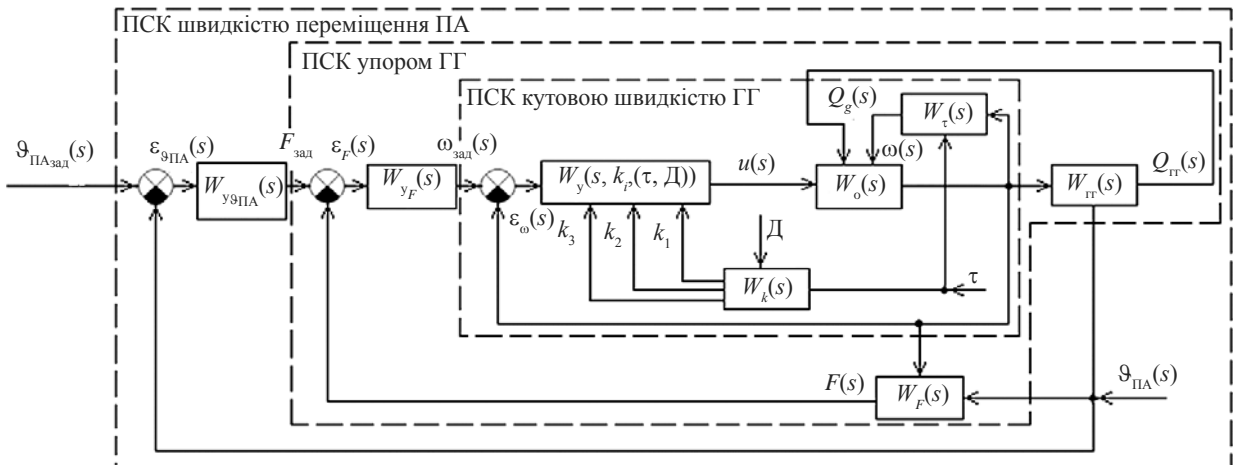
Структурна схема синтезованої САК швидкістю переміщення ПА за його горизонтального прямолінійного руху представлена на рис. 2.

Гальмівний гідродинамічний момент  $Q_g$  залежить лінійно від кутової швидкості вала електродвигуна й нелінійно від температури  $\tau$  і виду Д робочої рідини (діелектрика) БАД. Виходячи з цього, формулу [7] можна подати у вигляді:

$$Q_g(\tau, D, \omega_{ед}) = K_q(\tau, D)\omega_{ед},$$

де  $K_q(\tau, D) = 4\mu\pi r^3 \left( \frac{L_r}{r} + \frac{L_r}{2\delta_1} + \frac{r}{4\delta_2} \right)$  — коефіцієнт втрат гальмівного гідродинамічного моменту.

У БАД найчастіше використовуються такі діелектрики: етанол, масло П12А, масло Т750 і гас.



**Рис. 2.** Структурна схема САК швидкістю переміщення ПА за його горизонтального прямолінійного руху:

$\vartheta_{ПАзад}(s)$  — задавальний вплив зі швидкості ПА;  $F_{зад}(s)$  — задавальний вплив з упору ГГ;  $\omega_{зад}(s)$  — задавальний вплив з кутової швидкості ГГ;  $\varepsilon_{\vartheta_{ПА}}(s)$ ,  $\varepsilon_F(s)$ ,  $\varepsilon_{\omega}(s)$  — помилки стеження швидкості ПА, упору ГГ, кутової швидкості ГГ відповідно;  $W_{y\vartheta_{ПА}}(s)$ ,  $W_{yF}(s)$  — регулятори швидкості ПА й упору ГГ;  $F(s)$  — упор ГГ;  $\vartheta_{ПА}(s)$  — швидкість переміщення ПА за його горизонтального прямолінійного руху;  $W_y(s)$ ,  $W_o(s)$ ,  $W_{\tau}(s)$ ,  $W_{з3}(s)$ ,  $W_{\vartheta_{ПА}}(s)$ ,  $W_{\tau}(s)$ ,  $W_k(s)$  — передатні функції регулятора, об’єкта керування, ГГ, зворотного зв’язку, швидкості прямолінійного горизонтального руху ПА, гідродинамічного гальмівного моменту, блоку адаптивного підбору коефіцієнтів регулятора відповідно;  $u_{зад}(s) = g(s)$  — заздалегідь невідома дія;  $\varepsilon(s)$  — помилка стеження;  $u(s)$  — керуюча дія;  $\omega(s)$  — кутова швидкість електродвигуна;  $Q_{тр}(s)$  — гальмівний момент ГГ;  $\vartheta_{ПА}(s)$  — швидкість прямолінійного горизонтального руху ПА;  $y(s)$  — сигнал зворотного зв’язку;  $Q_g(s)$  — гідродинамічний гальмівний момент;  $\tau$  — температура робочої рідини;  $k_1, k_2, k_3$  — коефіцієнти регулятора; Д — вид робочої рідини

У результаті проведених експериментальних досліджень отримано значення коефіцієнта  $K_q$  для даних діелектриків, які представлено у вигляді таблиць. Однак, використання в математичній моделі РП ПА з БАД [3] коефіцієнта  $K_q$  у табличному вигляді для розрахунку моменту  $Q_g$  в усьому діапазоні зміни температури діелектрика неможливе, тому проведено апроксимацію коефіцієнта  $K_q$  методом найменших квадратів.

Аналитичні залежності коефіцієнта  $K_q$  для БАД потужністю 250 Вт відображено у вигляді полінома:

$$K_q = a_0 + a_1\tau + a_2\tau^2 + \dots + a_8\tau^8, \quad (1)$$

де  $a_0 \dots a_8$  — коефіцієнти полінома.

Експериментальні криві мають розбіжність з кривими, побудованими за поліномом [2, 9] у межах 10...11%.

Simulink-модель синтезованої САК швидкістю переміщення ПА за його горизонтального прямолінійного руху представлено на рис. 3.

Під час синтезу системи використовувалися:

- 1) система рівнянь удосконаленої математичної моделі [3];
- 2) синтезовані в [4] закони керування зі стабілізації кутової швидкості ГГ ПА, стабілізації упору ГГ ПА, стабілізації швидкості переміщення ПА за його горизонтального прямолінійного руху;
- 3) синтезований в [4] адаптивний ПІД-регулятор «PID» зі стабілізації кутової швидкості ГГ ПА.

Крім того, розроблено САК РКК з БАД за горизонтального прямолінійного руху ПА містить нечіткі регулятори «FUZZ1» і «FUZZ2», синтезовані для стабілізації швидкості переміщення ПА й упору ГГ.

У блоці «task» Simulink-моделі формується завдання зі швидкості переміщення ПА. Вихід блоку «task»  $v_{zad}$  подається на суматор для визначення помилки  $\varepsilon_{\text{ПІА}}(s)$ , яка поступає на вхід регулятора «FUZZ1». З виходу блоку «FUZZ1» сигнал подається на суматор для визначення помилки  $\varepsilon_F(s)$ , яка поступає на вхід регулятора «FUZZ2».

З виходу блоку «FUZZ2» сигнал  $\omega_{zad}(s)$  подається у блок «Motor», який поєднує в собі регульоване джерело напруги й БАД. Блок має два входи: «U» — вхід помилки з керуючої напруги; «Q» — вхід зворотного зв'язку з моменту ГГ. На виході блоку «Motor» отримуємо сигнал « $\tau$ » — температуру робочої рідини, який подається в блок  $K_q$  і у блоки апроксимації коефіцієнтів  $k_1, k_2, k_3$  блоку «PID». У блоці  $K_q$  для розрахунку коефіцієнта гідродинамічних втрат залежно від температури й виду робочої рідини використовуються аналітичні залежності [3]. Також на виході блоку «Motor» маємо сигнал « $w$ » — кутову швидкість обертання валу електродвигуна, який далі подається в блок «Propeller» — блок розрахунку моменту «Q» й упору «F» ГГ, швидкості «V» горизонтального переміщення ПА.

Блок «Propeller» має також вхід « $v$ », на який подається зворотний зв'язок за швидкістю переміщення ПА. Вихід блоку «Propeller» «V» подається на осцилограф «v\_Vzad». Сигнал з виходу «Q» блоку «Propeller» підсумовується з гідродинамічним гальмівним моментом  $Q_q$  і подається на вхід блоку «Motor».

Результати моделювання роботи синтезованої ПСК упором ГГ САК швидкістю переміщення ПА за його горизонтального прямолінійного руху представлено на рис. 4.

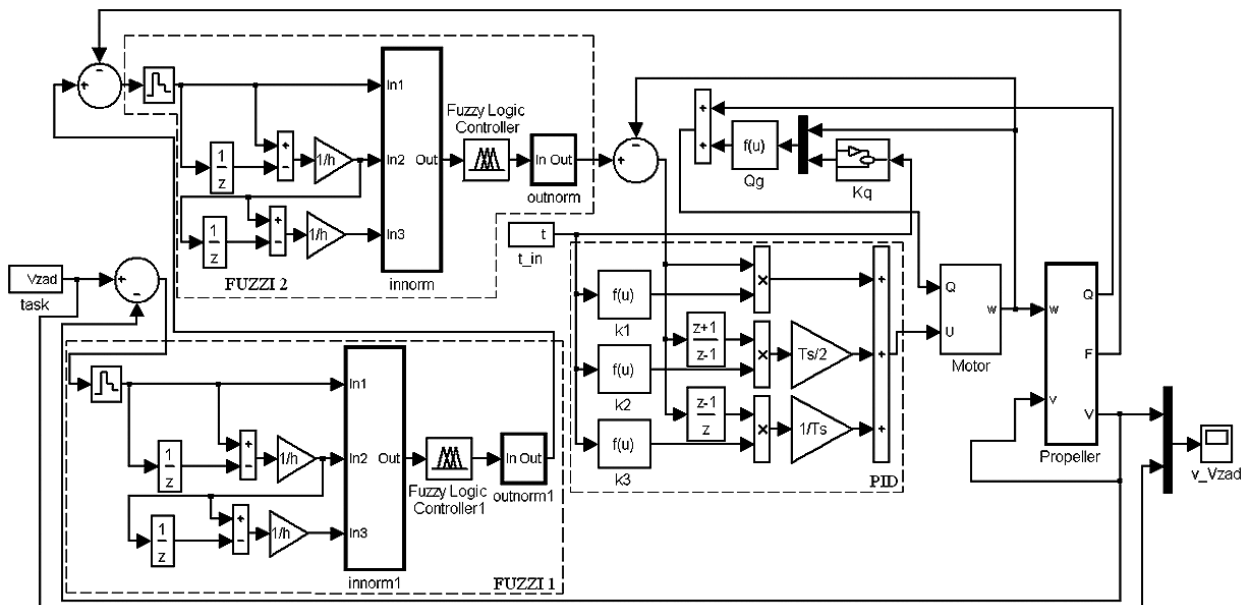
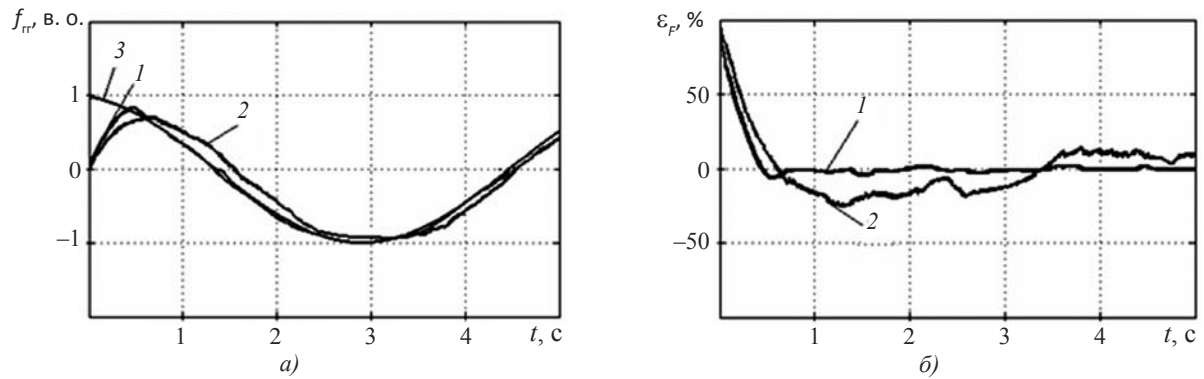


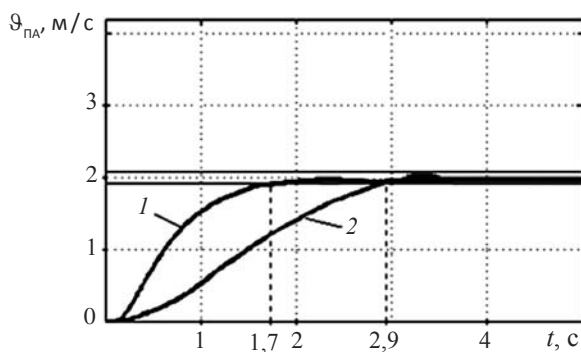
Рис. 3. Simulink-модель синтезованої САК швидкістю переміщення ПА за його горизонтального прямолінійного руху



**Рис. 4.** Результати моделювання роботи синтезованої ПСК упором ГГ САК швидкістю переміщення ПА за його горизонтального прямолінійного руху:

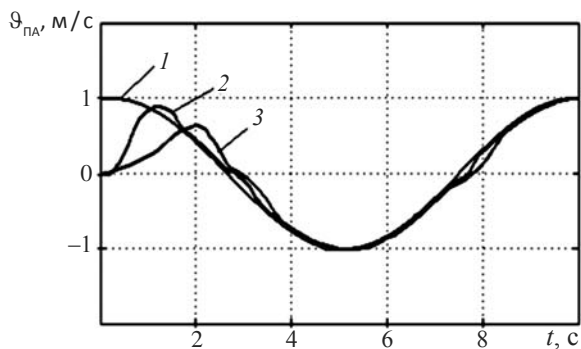
а) упор ГГ: крива 1 — упор ГГ в ПСК з нечітким регулятором; крива 2 — упор ГГ у ПСК з класичним ПІД-регулятором; крива 3 — задавальний вплив з упору ГГ  $F_{зад}$ ;

б) помилка стеження упору ГГ  $\epsilon_F'$ : крива 1 —  $\epsilon_F'$  упору ГГ в ПСК з нечітким регулятором; крива 2 —  $\epsilon_F'$  упору ГГ у ПСК з класичним ПІД-регулятором



**Рис. 5.** Результати моделювання роботи синтезованої САК швидкістю переміщення ПА за його горизонтального прямолінійного руху і при ступінчатій зміні задавального впливу  $v_{ПАзад}$ :

крива 1 — швидкість переміщення ПА у САК з нечітким регулятором; крива 2 — швидкість переміщення ПА у САК з класичним ПІД-регулятором



**Рис. 6.** Результати моделювання роботи синтезованої САК швидкістю переміщення ПА за його горизонтального прямолінійного руху при синусоїдальній зміні задавального впливу  $v_{ПАзад}$ :

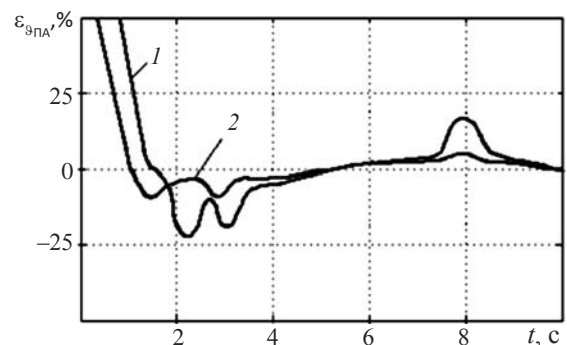
крива 1 — задавальний вплив зі швидкості переміщення ПА  $v_{ПАзад}$ ; крива 2 — швидкість переміщення ПА у САК з нечітким регулятором; крива 3 — швидкість переміщення ПА у САК з класичним ПІД-регулятором

Як видно з графіків, які наведено на рис. 4, б, помилка стеження упору ГГ  $\epsilon_F'$  в ПСК з нечітким регулятором не перевищує 5%, а в ПСК з класичним ПІД-регулятором — досягає 20%. Тому при подальшому синтезі підсистем САК швидкістю переміщення ПА за його горизонтального прямолінійного руху буде використовуватися ПСК упором ГГ із синтезованим нечітким регулятором.

Результати моделювання роботи синтезованої САК швидкістю переміщення ПА за його горизонтального прямолінійного руху подано на рис. 5–7.

Як видно з графіків, які наведено на рис. 5, швидкодія синтезованої САК швидкістю переміщення ПА за його горизонтального прямолінійного руху з нечітким регулятором в 1,7 рази більше, ніж в аналогічній САК з класичним ПІД-регулятором.

З графіків рис. 7 видно, що максимальна помилка стеження синтезованої САК швидкістю переміщення



**Рис. 7.** Помилка стеження  $\epsilon_{v_{ПА}}$  швидкості переміщення ПА за його горизонтального прямолінійного руху:

крива 1 — помилка швидкості переміщення ПА у САК з нечітким регулятором  $\epsilon_{v_{ПА}}$ ; крива 2 — помилка швидкості переміщення ПА у САК з класичним ПІД-регулятором  $\epsilon_{v_{ПА}}$

ня ПА за його горизонтального прямолінійного руху з класичним ПД-регулятором досягає 20%, це в 2,4 рази більше, ніж помилка стеження аналогічної САК з нечітким регулятором.

Також слід відзначити, що час перехідного процесу синтезованої САК швидкістю переміщення ПА за його горизонтального прямолінійного руху, яка містить підсистеми керування кутовою швидкістю ГГ, упором ГГ і швидкістю переміщення ПА, на 23% менший, ніж аналогічної системи, яка має лише один контур зворотного зв'язку з класичним ПД-регулятором.

**ВИСНОВКИ.** Вперше для БАД як об'єкта керування рушійно-кермового комплексу отримано математичну модель коефіцієнта гідродинамічних втрат у вигляді аналітичних залежностей, які враховують температуру й вид заповнюючої рідини — діелектрика, що дає змогу будувати його механічні характеристики в усьому температурному діапазоні експлуатації для різних видів заповнюючих рідких діелектриків

і виконувати кількісну оцінку втрат його гальмівного гідродинамічного моменту. Дістав подальшого розвитку комбінований метод компенсації збурень, який шляхом вибору коефіцієнтів адаптивного регулятора залежно від нестационарності параметрів БАД підвищує точність керування ПА. Розроблено структуру САК швидкістю переміщення ПА за його горизонтального прямолінійного руху, яка складається з ПСК кутовою швидкістю ГГ з адаптивним ПД-регулятором, що враховує нелінійні характеристики втрат гальмівного гідродинамічного моменту БАД, упором ГГ й швидкістю переміщення ПА з нечіткими регуляторами, які враховують нелінійні характеристики упорів рушіїв і гідродинамічного опору корпусу ПА.

Проведено моделювання роботи САК швидкістю переміщення ПА за його горизонтального прямолінійного руху. Дослідження показали збільшення до двох разів швидкодії й зниження на 12% помилки стеження системи керування при складному законі зміни швидкості прямолінійного руху ПА.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Агеев, М. Д. Автономные подводные роботы. Системы и технологии [Текст] / М. Д. Агеев, Л. В. Киселев, Ю. В. Матвиенко. — М. : Наука, 2005. — 400 с.
- [2] Власов, К. П. Теория автоматического управления [Текст] : учебное пособие / К. П. Власов. — Харьков : Изд-во Гуманитарный центр, 2007. — 526 с.
- [3] Волянский, С. М. Синтез математической модели движительно-рулевого комплекса подводного аппарата как объекта управления [Текст] / С. М. Волянский // Вісник НУК. — Миколаїв : НУК, 2014. — № 3. — Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.15589.evn20140305>.
- [4] Волянский, С. М. Синтез законов управления САУ движительно-рулевым комплексом при горизонтальном прямолинейном движении подводного аппарата [Текст] / С. М. Волянский // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2015. — № 2. — С. 79–87.
- [5] Гостев, В. И. Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления [Текст] / В. И. Гостев — К. : «Радио-аматор», 2003. — 512 с.
- [6] Зайченко, Ю. П. Основы проектирования интеллектуальных систем [Текст] : навчальний посібник / Ю. П. Зайченко. — К. : Видавничий дім «Слово», 2004. — 352 с.
- [7] Король, Ю. М. Построение математической модели для автоматизированного проектирования подруливающих устройств подводных аппаратов [Текст] / Ю. М. Король // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2005. — № 3 (402). — С. 20–30.

© С. М. Волянский

Надійшла до редколегії 18.09.2015  
Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. Г. В. Павлов