

DOI 10.15589/jnn20150213

УДК 62-83:629.584

B72

**SYNTHESIS OF CONTROL LAWS OF THE CAS OF POWERHELM UNIT  
AT HORIZONTAL RECTILINEAR MOVEMENT OF UNDERWATER VEHICLE****СИНТЕЗ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ САУ ДВИЖИТЕЛЬНО-РУЛЕВЫМ  
КОМПЛЕКСОМ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ  
ДВИЖЕНИИ ПОДВОДНОГО АППАРАТА****Serhii M. Volianskyi**

ffogres@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-7922-0441

**С. М. Волянский,**

канд. техн. наук, доц.

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv**Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*

**Abstract.** The generalized flow diagram of the synthesized system of automatic control of an underwater vehicle powerhelm unit, as well as particular flow diagrams used for the synthesis of control laws of the systems of automatic control of the powerhelm unit for the horizontal rectilinear movement of underwater vehicle, have been obtained. Simulink models for the synthesis of an inaccurate and PID controller are developed. The system of automatic control of the underwater vehicle with the synthesized controllers is modelled. The modelling showed that the systems of the automatic control of the powerhelm unit with the synthesized inaccurate and PID controllers were stable. However, the application of inaccurate controllers allowed us to improve significantly the transitional characteristics of the system.

**Keywords:** powerhelm unit; underwater vehicle; control law; regulator.

**Аннотация.** Получены обобщенная структурная схема синтезируемой САУ движительно-рулевого комплекса подводного аппарата, учитывающая потери гидродинамического тормозного момента бароразгруженного гребного электродвигателя, а также частные структурные схемы, используемые для синтеза законов управления САУ движительно-рулевого комплекса при горизонтальном прямолинейном движении подводного аппарата. Проведено моделирование САУ движительно-рулевого комплекса подводного аппарата с синтезированными регуляторами.

**Ключевые слова:** движительно-рулевой комплекс; подводный аппарат; закон управления; регулятор.

**Анотація.** Отримано узагальнену структурну схему синтезованої системи автоматичного керування рушійно-кермового комплексу підводного апарата, яка враховує втрати гідродинамічного гальмівного моменту баророзвантаженого гребного електродвигуна, а також часткові структурні схеми, використані для синтезу законів управління рушійно-кермового комплексу при горизонтальному прямолінійному русі підводного апарата. Проведено моделювання САК рушійно-кермового комплексу підводного апарата із синтезованими регуляторами.

**Ключові слова:** рушійно-кермовий комплекс; підводний апарат; закон управління; регулятор.

**REFERENCES**

- [1] Ageev M.D., Kiselev L.V., Matvienko Yur.V. *Avtonomnye podvodnye roboty. Sistemy i tekhnologii* [Autonomous submarine robots. Systems and technologies]. Moskva, Nauka Publ., 2005. 400 p.
- [2] Volyanskiy S.M. *Proverka adekvatnosti matematicheskoy modeli dvizhitelno-rulevogo kompleksa podvodnogo apparata* [Verification of the adequacy of the mathematical model of the underwater vehicle powerhelm unit]. *Naychno-tekhnicheskii zhurnal Odesskogo Natsionalnogo Politekhnicheskogo Universiteta — Scientific-technical magazine of Odessa National Polytechnic University*, 2011, no. 3, issue 79, pp. 240–241.
- [3] Gostev V.I. *Sintez nechetkikh regulyatorov system avtomaticheskogo upravleniya* [Synthesis of inaccurate controllers of the systems of automatic control]. Kyiv, Radioamator Publ., 2003. 512 p.
- [4] Korol Yu.M. *Postroenie matematicheskoy modeli dlya avtomatizirovannogo proektirovaniya podrulivayushchikh ystroystv podvodnykh apparatov* [Construction of a mathematical model for the automated design of underwater vehicles thruster]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of scientific publications of NUS*, 2005, no. 3, issue 402, pp. 20–30.
- [5] Popovich M.G., Lozinskiy O.Y., Klepikov V.B. *Elektromekhanichni sistemy avtomatychnogo keruvannya ta elektropryvody* [Electromechanic systems of automatic control and electrodrives]. Kyiv, Lybid Publ., 2005. 680 p.

**ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Задача синтеза САУ из-за своей неоднозначности является одной из сложнейших для проектирования систем, поэтому ее ставят ограниченно. Наибольшее развитие получили следующие вопросы синтеза: синтез оптимальных динамических характеристик системы; параметрический синтез системы заданной структуры, т. е. определение параметров (коэффициентов усиления, постоянных времени, временных запаздываний и т. д.) элементов САУ, структура, которой определена заранее; синтез корректирующих устройств системы по заданным показателям качества. Синтез оптимальных динамических характеристик системы обычно сводится к решению вариационной задачи, обеспечивающей в соответствии с принятым критерием оптимальности наилучшее управление или теоретический минимум ошибки управления. Параметрический синтез параметров системы заданной структуры и синтез корректирующих устройств системы по заданным показателям качества рассматривают, в большинстве случаев, как инженерную задачу, сводящуюся к такому построению САУ, при котором обеспечивается удовлетворение требуемых показателей качества САУ [4]. При этом как показатели качества САУ принимают: время переходного процесса, требуемая точность и приемлемый характер переходных процессов, как правило, «колебательность» переходного процесса. Из возможных решений окончательно выбирается одно, лучшее с точки зрения существующих конкретных условий.

**АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ**

Разработка систем управления и методов моделирования подвижными объектами различного назначения всегда находилась в центре внимания ведущих отечественных и зарубежных ученых. Значительный вклад в решение задач автоматизации управления такими объектами внесли академик НАН Украины В. М. Кунцевич, академики РАН В. Г. Пешехонов, М. Д. Агеев [1], ученые Дж. Горес, Дж. Гриффитс (США), К. Мотт (Норвегия), Дж. Беллингмат (Канада).

Несмотря на существенные достижения в автоматизации управления подводным аппаратом (ПА), автоматизация процесса управления движением ПА не достигла нужного уровня развития. С повышением скорости движения, маневренных характеристик и требований к точности управления и производительности, выполняемых в условиях неопределенности подводных работ, актуальной становится задача совершенствования системы управления движением ПА путем разработки новых алгоритмов управления. Это, в свою очередь, предусматривает разработку и комплексную отладку математических и имитационных моделей движительно-рулевого комплекса

(ДРК) ПА как наиболее требовательного к качеству управления объекта.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** — синтез законов управления САУ ДРК при горизонтальном прямолинейном движении ПА.

**ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА**

В любой САУ можно выделить неизменяемую и изменяемую части — объект управления (ОУ) и устройство управления (УУ) соответственно. Современные управляемые объекты, в том числе и подводные аппараты, являются динамическими системами, характеризуются высокой степенью сложности, к факторам которой относятся многомерность, нелинейность, неопределенность математической модели [4].

Устройства управления САУ представляют собой аналоговые или цифровые вычислительные элементы, в которых по принятому алгоритму формируется управляющее воздействие на ОУ. Характер поступающей на УУ информации определяется принципом управления. Так как большинство САУ являются локальными системами, к которым относятся системы стабилизации режимов и следящие системы, реализующие принцип отрицательной обратной связи, то устройством управления таких систем является регулятор УУ [1].

В настоящее время САУ движением ПА строятся по принципу раздельного управления отдельными движениями или участками траекторного движения. Поскольку траектории движения ПА в некоторых случаях заранее неизвестны, а в некоторых — представляют собой сложные пространственные кривые, то САУ движением ПА проектируют как следящие системы со сложной логикой управления (рис. 1).

В следящих системах управляемая переменная  $y(t)$  должна воспроизводить заранее неизвестное воздействие  $g(t)$ , в идеальном случае с ошибкой  $\epsilon(t)$ , стремящейся к нулю:

$$\epsilon(t) = g(t) - y(t).$$

Устройство управления формирует управляющее воздействие  $u(t)$  в зависимости от величины этой ошибки. В этом случае строится система с обратной связью, а задачей синтеза является определение алгоритма регулятора, т. е. закона управления  $u(t) = F\{\epsilon(t)\}$ , обеспечивающего воспроизведение задающего воздействия с требуемой точностью.

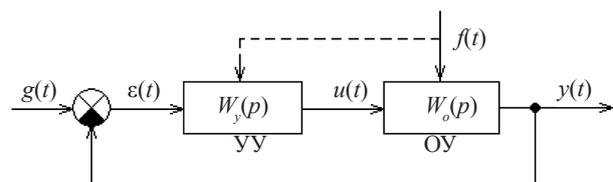


Рис. 1. Обобщенная структурная схема следящей САУ

В случае, если в УУ подается информация о возмущающих воздействиях  $f(t)$ , то закон управления принимает вид:

$$u(t) = F\{\varepsilon(t), f(t)\}.$$

Решение задачи синтеза законов управления САУ ДРК ПА в данной работе сводится к синтезу регуляторов. Как правило, в системах управления ДРК ПА применяют типовые регуляторы, наиболее распространенными среди них являются ПИД-регуляторы, а также регуляторы, основанные на нечеткой логике [3]. Однако применение типовых регуляторов, имеющих жесткую настройку параметров, не позволяет обеспечить необходимые показатели качества управления. Кроме того, система ДРК ПА является объектом, где априорные данные о характеристиках или уравнениях, описывающих все реакции, получить невозможно из-за слишком широкого разброса параметров. Возникает необходимость в использовании следящих систем управления с адаптивными, способными приспособляться к изменяющимся условиям окружающей среды, регуляторами. Такие системы широко используют рабочую информацию для анализа динамического состояния системы управления и организации контролируемых изменений свойств, параметров, управляющих воздействий и структуры системы управления. Обобщенная схема следящей адаптивной САУ, полученная на основании рис. 1 с учетом влияния тормозного гидродинамического момента  $Q_g$  (выход блока  $W_\tau(t)$ ) и блока  $W_k(t)$  адаптивного подбора коэффициентов  $k_1, k_2, k_3$  регулятора в зависимости от температуры  $\tau$  и вида Д рабочей жидкости (диэлектрика) бароразгруженного двигателя, представлена на рис. 2.

Для синтеза САУ ДРК ПА (рис. 4) использована упрощенная структурная схема ДРК ПА, представленная на рис. 3 с учетом обобщенной схемы следящей адаптивной САУ (рис. 2).

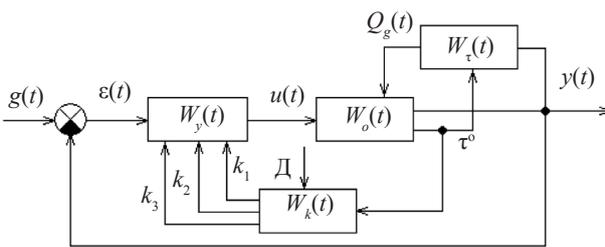


Рис. 2. Обобщенная схема следящей адаптивной САУ

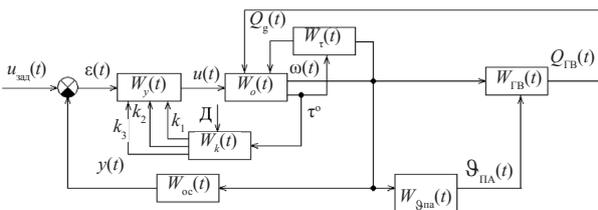


Рис. 4. Обобщенная структурная схема синтезируемой САУ ДРК ПА

На рис. 3 обозначены:  $u_{\text{ДРК}}$  — сигнал задания;  $M_{\text{эд}}$  — момент на валу электродвигателя (ЭД);  $\omega_{\text{эд}}$  — угловая скорость вращения вала (ротора) ЭД;  $\omega_{\text{гв}}$  — угловая скорость вращения гребного винта (ГВ);  $Q_{\text{гв}}$  — тормозной момент ГВ;  $F_{\text{гв}}$  — упор ГВ;  $M_{\text{н}}$  — момент нагрузки на валу ЭД;  $M$  — момент, развиваемый ГВ.

Выходными параметрами обобщенной структурной схемы синтезируемой САУ ДРК ПА (рис. 4) являются угловая скорость вращения ГВ, температура рабочей жидкости, момент, создаваемый ГВ, и скорость перемещения ПА при его горизонтальном прямолинейном движении. В системе проявляются возмущающие воздействия: тормозной момент ГВ  $Q_{\text{гв}}$  является внешним воздействием на ОУ, скорость перемещения ПА  $\vartheta_{\text{ПА}}$  — на ГВ и вид рабочей жидкости Д — на коэффициенты регулятора.

На рис. 4 обозначено:  $W_y(t), W_o(t), W_{\text{гв}}(t), W_{\text{ос}}(t), W_{\text{гпа}}(t), W_\tau(t), W_k(t)$  — передаточные функции регулятора, объекта управления, ГВ, обратной связи, скорости прямолинейного горизонтального движения ПА, гидродинамического тормозного момента, блока адаптивного подбора коэффициентов регулятора соответственно;  $u_{\text{зад}}(t)$  — заранее неизвестное воздействие;  $\varepsilon(t)$  — ошибка слежения;  $u(t)$  — управляющее воздействие;  $\omega(t)$  — угловая скорость вращения ЭД;  $Q_{\text{гв}}(t)$  — тормозной момент ГВ;  $\vartheta_{\text{ПА}}(t)$  — скорость прямолинейного горизонтального движения ПА;  $y(t)$  — сигнал обратной связи;  $Q_g(t)$  — гидродинамический тормозной момент;  $\tau_0$  — температура рабочей жидкости;  $k_1, k_2, k_3$  — коэффициенты регулятора; Д — вид рабочей жидкости.

В зависимости от того, по какой величине производится управление, обобщенная структурная схема синтезируемой САУ ДРК ПА (рис. 4) преобразуется к видам, представленным на рис. 5–7. Вследствие того, что передаточная функция регулятора  $W_y(t)$

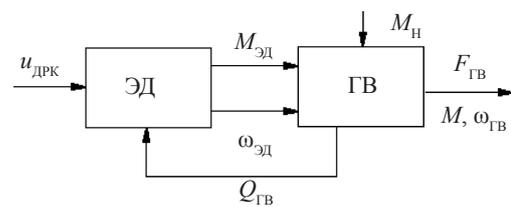


Рис. 3. Упрощенная структурная схема ДРК ПА

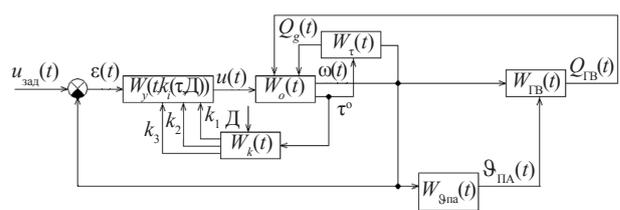


Рис. 5. Структурная схема САУ ДРК стабилизации угловой скорости вращения ГВ ПА

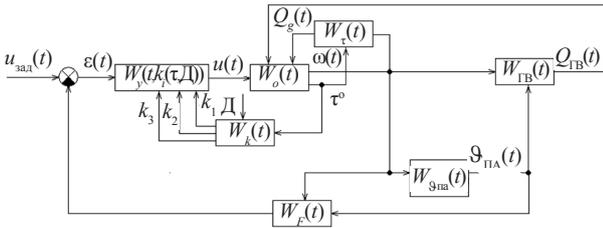


Рис. 6. Структурная схема САУ ДРК стабилизации упора ГВ ПА

зависит от температуры  $\tau$  и типа рабочей жидкости диэлектрика  $D$ , она модифицируется в  $W_y(t, k_i(\tau, D))$ , где  $k_i(\tau, D)$  — функция коэффициентов ПИД-регулятора. На рис. 6 введена обратная связь через блок  $W_F(t)$  — передаточную функцию упора ГВ.

Общий вид закона управления для структурных схем (рис. 5–7) определяется видом функции  $u(t)$ :

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

где  $W_y(t, k_i(\tau, D))$  — передаточная функция регулятора.

Описание блоков структурных схем рис. 5–7, кроме блока регулятора  $W_y(t, k_i(\tau, D))$ , соответствует уравнениям (2), представляющим собой уточненную математическую модель системы ДРК ПА при его горизонтальном прямолинейном движении [2].

$$\left\{ \begin{array}{l} m_x \frac{d\vartheta_x}{dt} = F_{ГВ} - qv^{2/3}c_x; \\ M_{дин} = M_{эд} - Q_g - Q_{ГВ}; \\ Q_g = 4\mu\pi r^2 \omega_{эд} \left( \frac{L_r}{r} + \frac{L_r}{2\delta_1} + \frac{r}{4\delta_2} \right); \\ Q_{ГВ} = \begin{cases} \frac{k_Q \rho D_{ГВ}^5}{4\pi^2} \left( \frac{\omega_{эд}}{i} \right)^2 & \text{при } J \in [-1; 1]; \\ k_q \rho D_{ГВ}^3 \vartheta_{ПА}^2 & \text{при } J^{-1} \in (-1; 1); \end{cases} \\ F_{зб} = \begin{cases} \frac{k_F \rho D_{ГВ}^4}{4\pi^2} \left( \frac{\omega_{эд}}{i} \right)^2 & \text{при } J \in [-1; 1]; \\ k_f \rho D_{ГВ}^2 \vartheta_{ПА}^2 & \text{при } J^{-1} \in (-1; 1); \end{cases} \\ J = \frac{2\pi \vartheta_{ПА}}{\omega_{эд} D_{ГВ}}, \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $M_{дин}$  — динамический момент ЭД;  $Q_g$  — гидродинамический момент сопротивления вращению ротора в жидком диэлектрике, заполняющем ЭД;  $\mu$  — динамический коэффициент вязкости жидкого диэлектрика;  $L_r, r$  — длина и радиус ротора;  $\delta_1$  — зазор между ротором и статором;  $\delta_2$  — зазор между торцевыми поверхностями ротора и крышками ЭД;  $\vartheta_{ПА}$  — проекция вектора скорости перемещения ДРК относительно воды на ось прямого хода ДРК;  $D_{ГВ}$  — диаметр ГВ;  $k_Q = f(J)$  и  $k_q = f(J^{-1})$  — безразмерные коэффициенты, характеризующие момент ГВ [4];  $\rho$  — удельная плотность воды;  $F_{ГВ}$  — движительная сила (упор) ГВ;

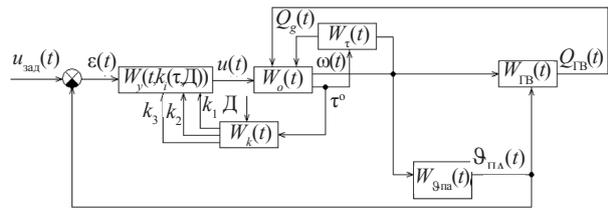


Рис. 7. Структурная схема САУ ДРК стабилизации скорости перемещения ПА при его горизонтальном прямолинейном движении

$k_F = f(J)$  и  $k_f = f(J^{-1})$  — безразмерные коэффициенты, характеризующие упор ГВ;  $J$  — относительный шаг ГВ;  $J^{-1}$  — шаг ГВ при реверсе;  $v$  — объемное водоизмещение ПА;  $m_x$  — безразмерная характеристика гидродинамического момента крена;  $q$  — скоростной напор;  $c_x$  — коэффициент продольной гидродинамической силы.

Учитывая, что во всех приведенных на рис. 5–7 структурных схемах передаточная функция регулятора  $W_y(t, k_i(\tau, D))$  — одна и та же величина, законы управления (1) для этих схем определяются функцией ошибки слежения  $\varepsilon(t)$ .

Закон управления САУ ДРК по стабилизации угловой скорости вращения ГВ ПА (схема рис. 5) может быть представлен:

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= u_{зад}(t) - \omega(t), \\ u(t) &= W_y(t, k_i(\tau, D))\varepsilon(t) = \\ &= W_y(t, k_i(\tau, D))[u_{зад}(t) - \omega(t)]. \end{aligned} \quad (3)$$

Закон управления САУ ДРК по стабилизации упора ГВ ПА (схема рис. 6) выражается зависимостью:

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= u_{зад}(t) - F_{ГВ}(t), \\ u(t) &= W_y(t, k_i(\tau, D))\varepsilon(t) = \\ &= W_y(t, k_i(\tau, D))[u_{зад}(t) - F_{ГВ}(t)]. \end{aligned} \quad (4)$$

Закон управления САУ ДРК по стабилизации скорости перемещения ПА при его горизонтальном прямолинейном движении (схема рис. 7) имеет вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= u_{зад}(t) - \vartheta_{ПА}(t), \\ u(t) &= W_y(t, k_i(\tau, D))\varepsilon(t) = \\ &= W_y(t, k_i(\tau, D))[u_{зад}(t) - \vartheta_{ПА}(t)]. \end{aligned} \quad (5)$$

Синтез регулятора  $W_y(t, k_i(\tau, D))$  выполнен с помощью пакета Simulink среды MATLAB. Разработаны Simulink-модели для синтеза нечетких регуляторов и адаптивных ПИД-регуляторов по стабилизации угловой скорости вращения ГВ ПА, по стабилизации

упора ГВ ПА, по стабилизации скорости перемещения ПА при его горизонтальном прямолинейном движении. Например, при синтезе адаптивного ПИД-регулятора САУ ДРК по стабилизации угловой скорости вращения ГВ ПА используются система уравнений уточненной математической модели (2), закон управления (3), а также разработанная Simulink-модель, в которую введен ПИД-регулятор по управляющему воздействию  $u(t)$  и обратная связь по угловой скорости вращения ГВ.

Результаты моделирования работы САУ ДРК по стабилизации угловой скорости вращения ГВ ПА с синтезированными классическим и адаптивным ПИД-регуляторами представлены на рис. 8(а–з).

На основании полученных результатов моделирования можно сделать следующие выводы. При использовании в САУ ДРК по стабилизации угловой скорости вращения ГВ ПА ПИД-регулятора с фиксированными коэффициентами  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ , настроенными на конкретное значение температуры рабочей жидкости (диэлектрика) асинхронного бароразгруженного двигателя ПА, получены переходные характеристики с ухудшенными показателями качества управления (регулятор настроен на низкую температуру, а температура рабочей жидкости максимально возможная (рис. 8, а). И наоборот, САУ ДРК ПА с адаптивными ПИД-регуляторами имеет лучшие показатели качества управления (рис. 8, в). Присутствуют перерегулирование более 20% (рис. 8, а) и увеличенное время переходного процесса в 2,5 раза (рис. 8, в). САУ является устойчивой. Перерегулирование по угловой скорости вращения ГВ отсутствует. Время переходного процесса составляет 0,9 с.

**ВЫВОДЫ.** Разработана обобщенная структурная схема следящей адаптивной САУ ДРК ПА, в которой использована синтезированная уточненная математическая модель горизонтального прямолинейного движения ПА, учитывающая потери гидродинамического тормозного момента бароразгруженного гребного электродвигателя.

На основании данной обобщенной структурной схемы следящей адаптивной САУ ДРК ПА в зависимости от того, по какой величине производится управление, предложены частные структурные схемы, используемые для синтеза законов управления САУ ДРК при горизонтальном прямолинейном движении ПА.

Получены законы управления САУ ДРК по стабилизации угловой скорости вращения ГВ ПА, по стабилизации упора ГВ ПА, по стабилизации скорости перемещения ПА при его горизонтальном прямолинейном движении, используемые в дальнейшем для синтеза нечетких регуляторов и адаптивных ПИД-регуляторов САУ ДРК при горизонтальном прямолинейном движении ПА.

Синтезированы нечеткие регуляторы и адаптивные ПИД-регуляторы для соответствующих законов управления САУ ДРК ПА и разработаны Simulink-модели.

Проведено моделирование САУ ДРК ПА с синтезированными регуляторами. Выявлено, что применение адаптивных ПИД-регуляторов по сравнению с классическими ПИД-регуляторами позволяет получать более стабильные показатели качества управления во всем диапазоне температур рабочей жидкости (диэлектрика) бароразгруженного гребного электродвигателя.

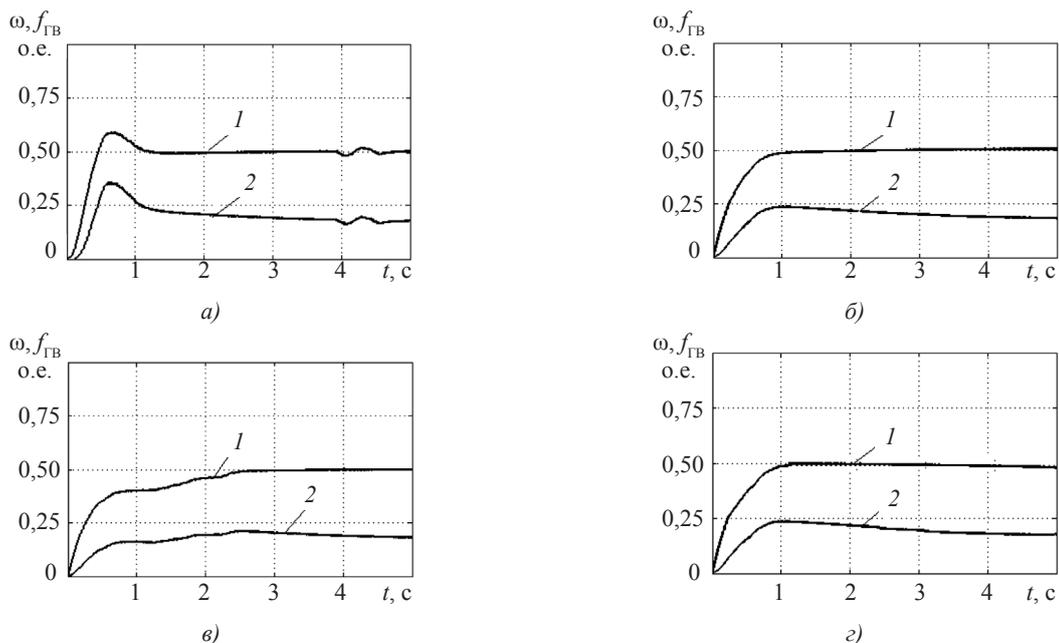


Рис. 8. Результаты моделирования работы САУ ДРК по стабилизации угловой скорости вращения ГВ ПА с синтезированными классическим и адаптивным ПИД-регуляторами: кривая 1 — угловая скорость вращения ГВ  $\omega_{\text{зД}}$ ; кривая 2 — упор ГВ  $f_{\text{ГВ}}$

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [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] **Волянский, С. М.** Проверка адекватности математической модели движительно-рулевого комплекса подводного аппарата [Текст] / С. М. Волянский // Электротехнические и компьютерные системы : научн.-техн. журнал ОНПУ. — Одесса : ОНПУ, 2011. — Вып. 03 (79). — С. 240–241.
- [3] **Гостев, В. И.** Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления [Текст] / В. И. Гостев. — К. : «Радиоаматор», 2003. — 512 с.
- [4] Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи : навч. посібник [Текст] / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, В. Б. Клепиков та ін. ; за ред. М. Г. Поповича та О. Ю. Лозинського. — К. : Либідь, 2005. — 680 с.
- [5] **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. Волянський

Надійшла до редколегії 17.02.2015

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. *Ю. П. Кондратенко*