

Математическое моделирование автономного управляемого необитаемого подводного аппарата в условиях гидродинамической неустойчивости

¹*КРИВОЛАПОВА Махаббат Ораловна, докторант, takha12@mail.ru,

¹ИВЕЛЬ Виктор Петрович, д.т.н., профессор, ivelvic@mail.ru,

²КАБАНОВ Алексей Александрович, к.т.н., зав. кафедрой, kabanovaleksey@gmail.com,

¹Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, Казахстан, 150000, Петропавловск, ул. Пушкина, 86,

²Севастопольский государственный университет, Россия, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Данная работа раскрывает проблемы применения автономных управляемых необитаемых аппаратов в условиях гидродинамической неустойчивости. В результате произведена разработка математической модели и структурной схемы модели системы управления АНПА с учетом влияния гидродинамической неустойчивости и создана модель системы управления в пакете Simulink системы MATLAB, произведено моделирование созданной системы. Данная работа представляет теоретический и практический интерес для разработчиков систем управления автономными необитаемыми подводными аппаратами и разработчиков сопровождающего АНПА программного обеспечения. Разработанные математическая и структурная модели прошли исследование в программной среде MATLAB в пакете Simulink, моделирование подтвердило работоспособность модели.

Ключевые слова: автономный управляемый подводный аппарат, АНПА, математическая модель, структурная модель, моделирование Simulink, система управления, гидродинамическая неустойчивость.

Введение

Современный технологический прорыв начала 2000 годов в области электроники, робототехники и систем управления создал большой задел для использования автономных аппаратов при решении задач различных сфер жизнедеятельности человека.

Одним из вариантов применения автономных управляемых необитаемых аппаратов – подводные морские необитаемые аппараты (АНПА – автономные необитаемые подводные аппараты). На данный момент эти аппараты эффективно используются при научно-исследовательских работах, аварийных спасательных работах на море, при выполнении поисковых задач и иных типах сложных работ.

Испытания АНПА в реальных условиях показывают, что существуют трудности удержания стабильного курса, глубины и общей управляемости ввиду воздействия различных эффектов гидродинамической устойчивости. Чаще всего это выражается в «рысканье» аппарата по курсу с одновременным изменением величин большинства физических параметров движения, что сказывается как на эффективности работы аппарата, так

и на способности аппарата к стабильному безаварийному управлению.

Анализ параметров движения и окружающей среды выявляет причинно-следственную связь между различными видами гидродинамической неустойчивости, возникающих сил и моментов с курсовыми углами, креном и дифферентом АНПА [1].

Решение задачи управления необитаемым подводным аппаратом в условиях отсутствия гидродинамической стабильности – одна из базовых и наиболее значимых задач системы управления АНПА. Для решения этой задачи будем использовать программную среду Simulink, где создадим модель и проведем моделирование системы управления АНПА.

Данная работа посвящена исследованию проблем управления АНПА в условиях гидродинамической неустойчивости.

Методы

Базовой моделью для проведения исследования динамической устойчивости будет служить упрощенная математическая модель научной школы МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В этой модели основными критериями устойчивости управления АНПА являются: стабильное поддержание заданных параметров движения независимо от состояния внешней среды, постоянная безаварийная управляемость АНПА на всех рабочих глубинах и курсах [2].

Метод используемого моделирования для исследования зависимости изменения курсового угла атаки от приложенных сил и моментов гидродинамической неустойчивости: метод конечного объема для объемного тела, помещенного в жидкостную среду и перемещающегося с заданной скоростью [3].

Создаваемая модель управления АНПА использует три системы координат (СК), связанных с подводным аппаратом:

- неподвижная система координат Земли $OXYZ$;

- система координат, связанная с направлением перемещения аппарата $Axyz$ (скоростная система координат);

- система координат, привязанная к корпусу АНПА с нулем в центре масс $Ax_1y_1z_1$.

Используемые угловые параметры при описании модели: курсовой угол φ ; курсовой крен θ , дифферента АНПА ψ , угол атаки α , угол дрейфа β , углы траектории χ, Φ, ϑ .

Используемые силы и моменты: остаточная плавучесть P , продольный и поперечный восстанавливающие моменты устойчивости, соответственно M_Φ и M_θ , сила сопротивления воды R , момент сопротивления воды M_R [4].

Формулы, используемые при написании модели системы управления АНПА для вычисления моментов, обеспечивающих вертикальную устойчивость:

$$M_\Phi = Y \cdot V \cdot h_o \cdot \sin(\psi), \quad (1)$$

$$M_\theta = Y \cdot V \cdot h_o \cdot \sin(\theta), \quad (2)$$

где Y – удельный вес жидкости, Н/м³;

V – водоизмещение АНПА, кг;

h_o – высота между центром масс и метацентром, м.

Проекция гидродинамической силы и момента на оси скоростной системы координат будем вычислять по формулам 3-14 [5]:

$$m_x \dot{\nu} = -R_x(\nu, \alpha) + P \sin \vartheta + (T_{z1} - F_x) \cos \alpha - (T_{y1} - F_y) \sin \alpha, \quad (3)$$

$$m_x \nu \dot{\chi} = R_y(\nu, \alpha, \dot{\psi}) + P \cos \vartheta + (T_{y1} - F_y) \cos \alpha + (T_{z1} - F_z) \sin \alpha, \quad (4)$$

$$J_{zz} \ddot{\psi} = M_0 \sin \psi + M_z(\nu, \alpha, \dot{\psi}) + M_{z1}, \quad (5)$$

$$\dot{X} = \nu \cos \vartheta, \dot{Y} = -\nu \sin \vartheta, \psi = \vartheta - \alpha. \quad (6)$$

$$m_x \dot{\nu} = -R_x(\nu, \beta) + (T_{z1} - F_x) \cos \beta - (T_{z1} - F_z) \sin \beta, \quad (7)$$

$$m_x \nu \dot{\chi} = R_z(\nu, \beta, \dot{\varphi}) + (T_{z1} - F_z) \cos \beta + (T_{z1} - F_x) \sin \beta, \quad (8)$$

$$J_{yy} \ddot{\varphi} = M_y(\nu, \beta, \dot{\varphi}) + M_{y1}, \quad (9)$$

$$\dot{X} = \nu \cos \chi, \dot{Z} = \nu \sin \chi, \varphi = \chi + \beta. \quad (10)$$

$$m_z \dot{\nu} = -R_z(\nu, \zeta) + P \sin \chi + (T_{z1} - F_z) \cos \zeta - (T_{y1} - F_y) \sin \zeta, \quad (11)$$

$$m_y \nu \dot{\chi} = R_y(\nu, \zeta, \dot{\theta}) + P \cos \chi + (T_{y1} - F_y) \cos \zeta + (T_{z1} - F_z) \sin \zeta, \quad (12)$$

$$J_{xx} \ddot{\theta} = M_0 \sin \theta + M_x(\nu, \zeta, \dot{\theta}) + M_{x1}, \quad (13)$$

$$\dot{Z} = \nu \cos \chi, \dot{Y} = -\nu \sin \chi, \theta = \chi - \zeta, \quad (14)$$

где $OXYZ$ – неподвижная система координат Земли;

$Ax_1y_1z_1$ – система координат, привязанная к корпусу АНПА с нулем в центре масс;

$Axyz$ – система координат, связанная с направлением перемещения аппарата;

m_x, m_y, m_z – массы плавательного аппарата, учитывающие присоединенную окружающую корпус воду, кг;

J_{xx}, J_{yy}, J_{zz} – моменты инерции АНПА, учитывающие существующие инерционные моменты обтекающей воды, кг·м²;

T_{x1}, T_{y1}, T_{z1} – силы, управляющие плавательным аппаратом в системе координат $Ax_1y_1z_1$, Н;

M_{x1}, M_{y1}, M_{z1} – моменты плавательного аппарата в системе координат $Ax_1y_1z_1$, Н·м;

R_x, R_y, R_z – гидродинамические силы, Н;

ϑ – угол подъема траектории плавательного аппарата, град.;

P – остаточная плавучесть, %;

χ – угол поворота траектории плавательного аппарата, град.;

α – угол наклона траектории плавательного аппарата, град.;

F_x, F_y, F_z – осевые силы, возникающие от натяжения связного кабеля в в системе координат $Axyz$, Н;

φ – курсовой угол плавательного аппарата, град.;

ψ – угол дифферента плавательного аппарата, град.;

M_x, M_y, M_z – гидродинамические моменты, Н·м;

θ – крен аппарата плавательного аппарата, град.;

M_0 – момент вертикальной устойчивости, Н·м;

α – угол атаки плавательного аппарата, град.;

β – угол сноса (дрейфа) плавательного аппарата, град.;

ζ – угол скольжения плавательного аппарата, град.;

Моделирование траектории движения автономного необитаемого плавательного аппарата будет проводиться в системе координат, связанной с корпусом АНПА с нулем в центре масс [6].

Среда моделирования – вязкая жидкость, не поддающаяся сжиманию.

На рисунке 2 отображены результаты моделирования изменения угла курса ($\alpha_{\text{курс}}$) при измене-

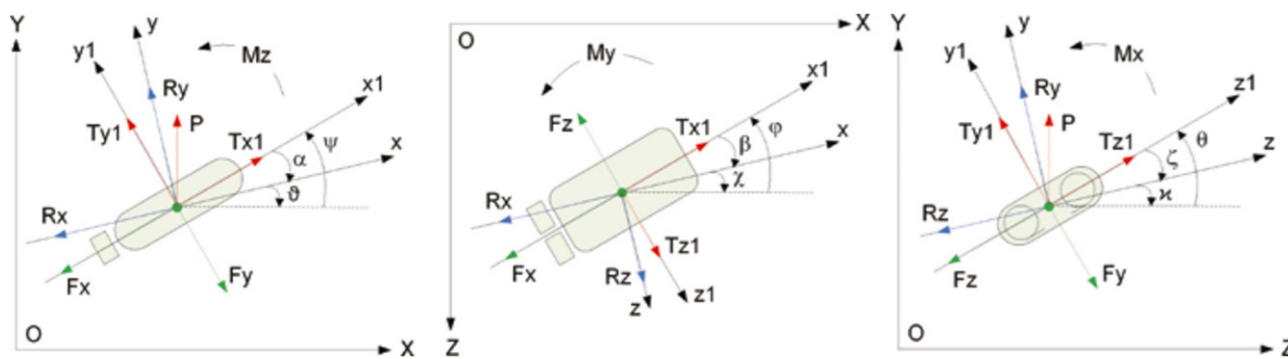


Рисунок 1 – Схема воздействия сил для модели АНПА

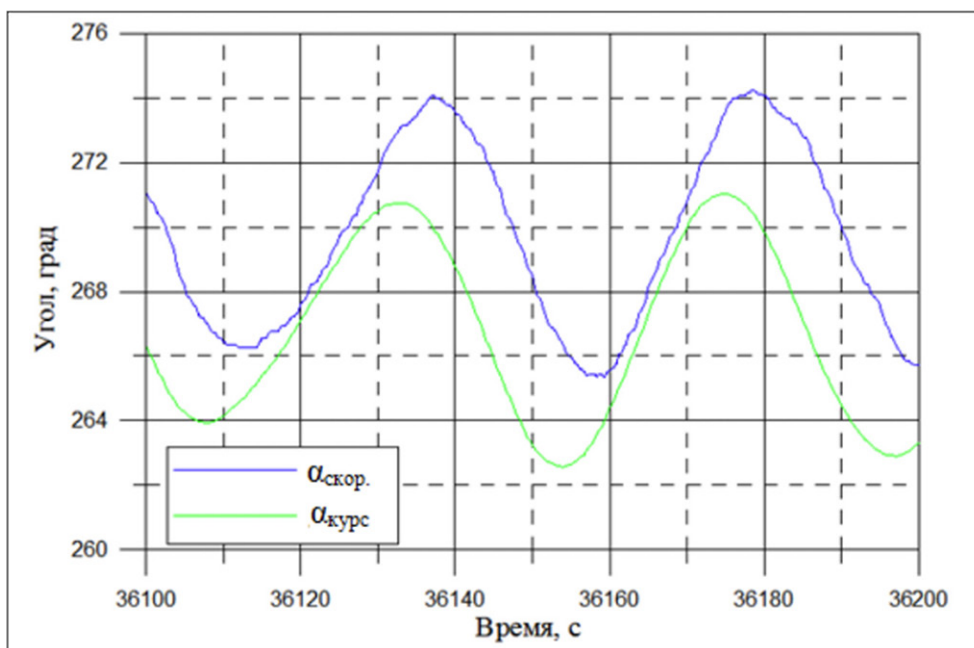


Рисунок 2 – График моделирования зависимости углов α от времени

нии угла направления движения плавательного аппарата ($\alpha_{\text{скор}}$) в жидкостной несжимаемой среде. Так, изменение курсового угла $\alpha_{\text{курс}}$ (как увеличение, так и уменьшение) вызовет опережение по фазе (из-за инерции жидкостной среды), пропорциональное изменению угла скорости $\alpha_{\text{скор}}$. Из чего следует, что траектория движения аппарата (без автоматической стабилизации курса системой управления) будет непредсказуема и управление плавательным аппаратом будет неточным.

Математическое уравнение движения подводного аппарата в условиях неустойчивости окружающей среды описывается формулой:

$$\frac{M d^2 h}{dt^2} + k_1 \left| \frac{dh}{dt} \right| \frac{dh}{dt} + k_2 \frac{dh}{dt} - k_{\text{обж}} \cdot h - \Delta q + q_0, \quad (15)$$

где M – суммарная масса (масса плавательного аппарата + масса обтекающей присоединенной воды), кг;

Δq – изменение плавучести плавательного аппарата в результате регулирующих траекто-

рию сил, %;

q_0 – начальная положительная плавучесть, %;

$k_{\text{обж}}$ – коэффициент уменьшения объема плавательного аппарата, погруженного в воду;

h – глубина плавательного аппарата, м.

k_1 и k_2 – коэффициенты сопротивления жидкостной среды:

$$k_1 = f_1(S, v, c_k, \rho), \quad (16)$$

$$k_2 = f_2(S, \rho, c_k, v), \quad (17)$$

где v – значение вектора скорости плавательного аппарата, м/сек;

c_k – коэффициент препятствия движению плавательного аппарата;

ρ – плотность воды, кг·м⁻³;

S – площадь перпендикулярной вектору скорости проекции корпуса плавательного аппарата [7], м².

На основе анализа математического уравнения (15) движения подводного аппарата в усло-

виях неустойчивости окружающей среды составляется структурная схема осевого управления, показанная на рисунке 3. На рисунке значения коэффициентов соответствуют основополагающей формуле, математические операнды и операции заменены на соединения и соответствующие опе-

рациям блоки. Здесь можно использовать блок Abs из библиотеки Simulink, однако при построении структурной схемы (рисунок 3) использовались принципы классической теории управления и, на наш взгляд, было бы не совсем правильно включать в такую структуру блоки из Simulink.

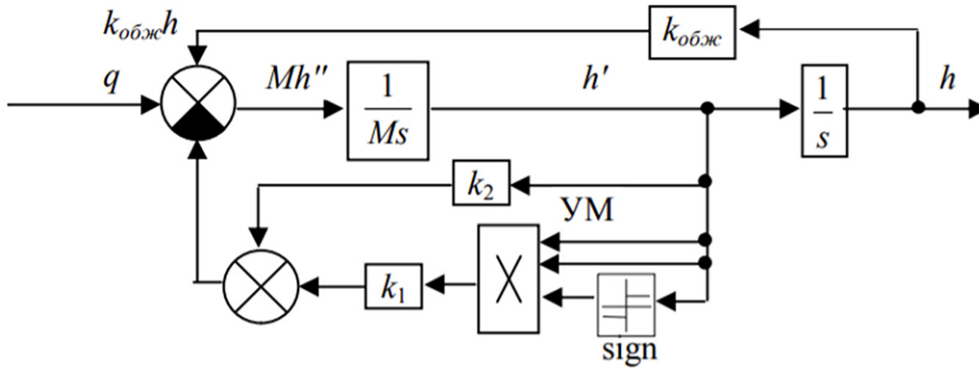


Рисунок 3 – Схема осевого канала системы управления ПА

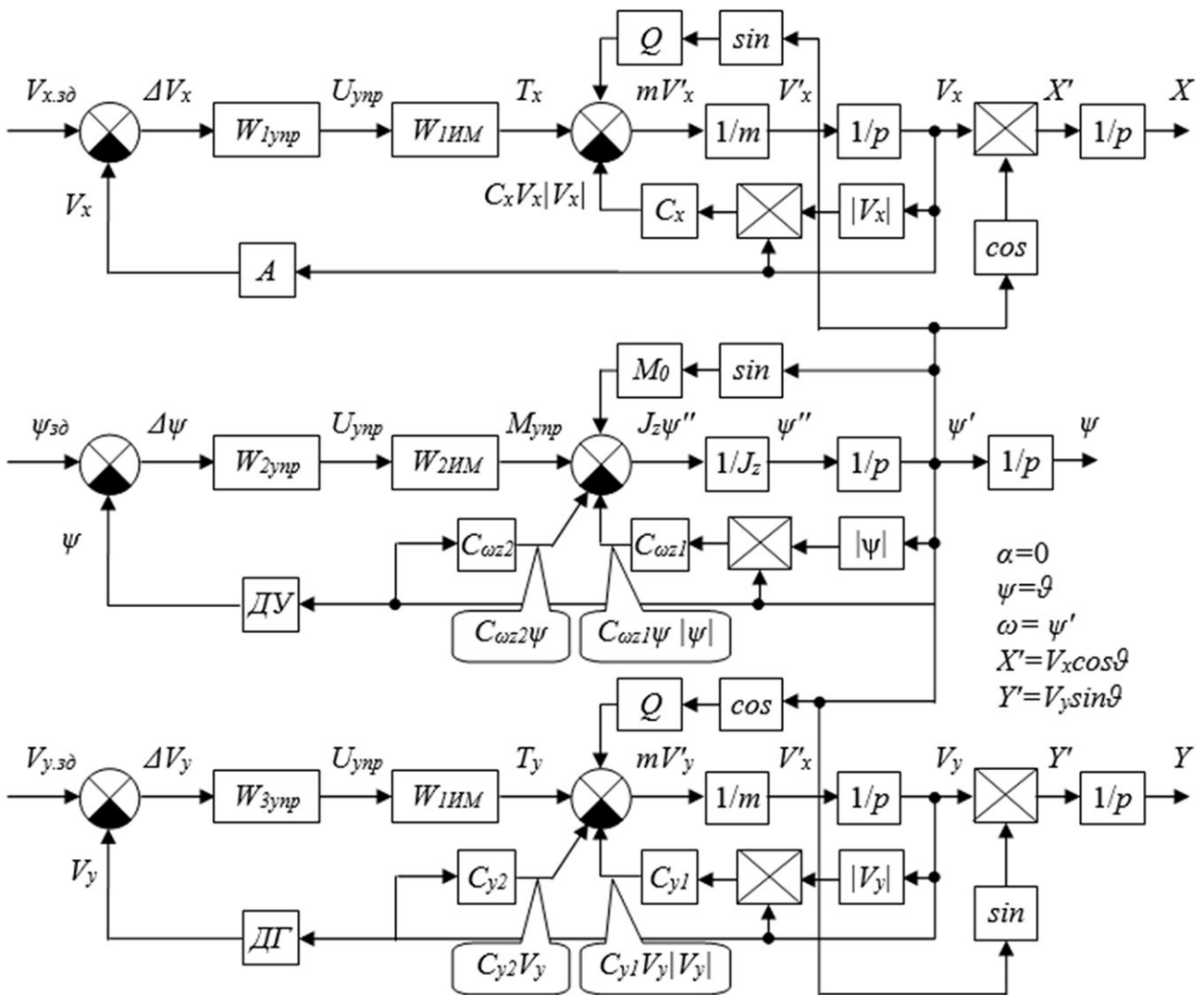


Рисунок 4 – Структурная схема модели системы управления АНПА с учетом влияния гидродинамической неустойчивости

Созданная математическая модель будет служить базой для составления структурной схемы канала системы управления.

Составленная общая структурная схема модели системы управления АНПА с учетом влияния неустойчивости внешней среды представлена на рисунке 4. Помимо задающей информации, поступающей от оператора: $V_{x,зА} - X$ – компонента заданной курсовой скорости, м/сек; $V_{y,зА} - Y$ – компонента заданной курсовой скорости, м/сек; $\psi_{зА}$ – заданный дифферент, град., в управлении участвует информация от датчиков:

- А – акселерометр;
- ДУ – датчик угла поворота ПА;
- ДГ – датчик глубины.

На выходе мы имеем скорректированные данные необходимых скорости и дифферента, с учетом влияния внешней среды [8].

Учитывая особенности, присущие АНПА в среде с гидродинамической неустойчивостью, имеет смысл разделить управление подводным

аппаратом на три канала: два канала управления скоростями V_x и V_y по осям X и Y и один канал управления дифферентом. Данные каналы или управляющие контуры представим функциями $W_{1упр}$ $W_{2упр}$ $W_{3упр}$.

Учитывая, что плавательный аппарат имеет ненулевую остаточную плавучесть [4], данные каналы взаимосвязаны через интерканальные связи, показанные на рисунке 4.

Данные скоростей и дифферента, полученные от оператора, суммируются с данными датчиков, полученный результат проходит в схему выработки итоговой скорости/дифферента, учитывающую вязкостную среду, векторы, силы и моменты, воздействующие на корпус плавательного аппарата в текущий момент. В результате на выходе вырабатываются скорректированные сигналы управления, которые позволяют контролируемо управлять аппаратом в условиях турбулентностей и неоднородностей среды [9].

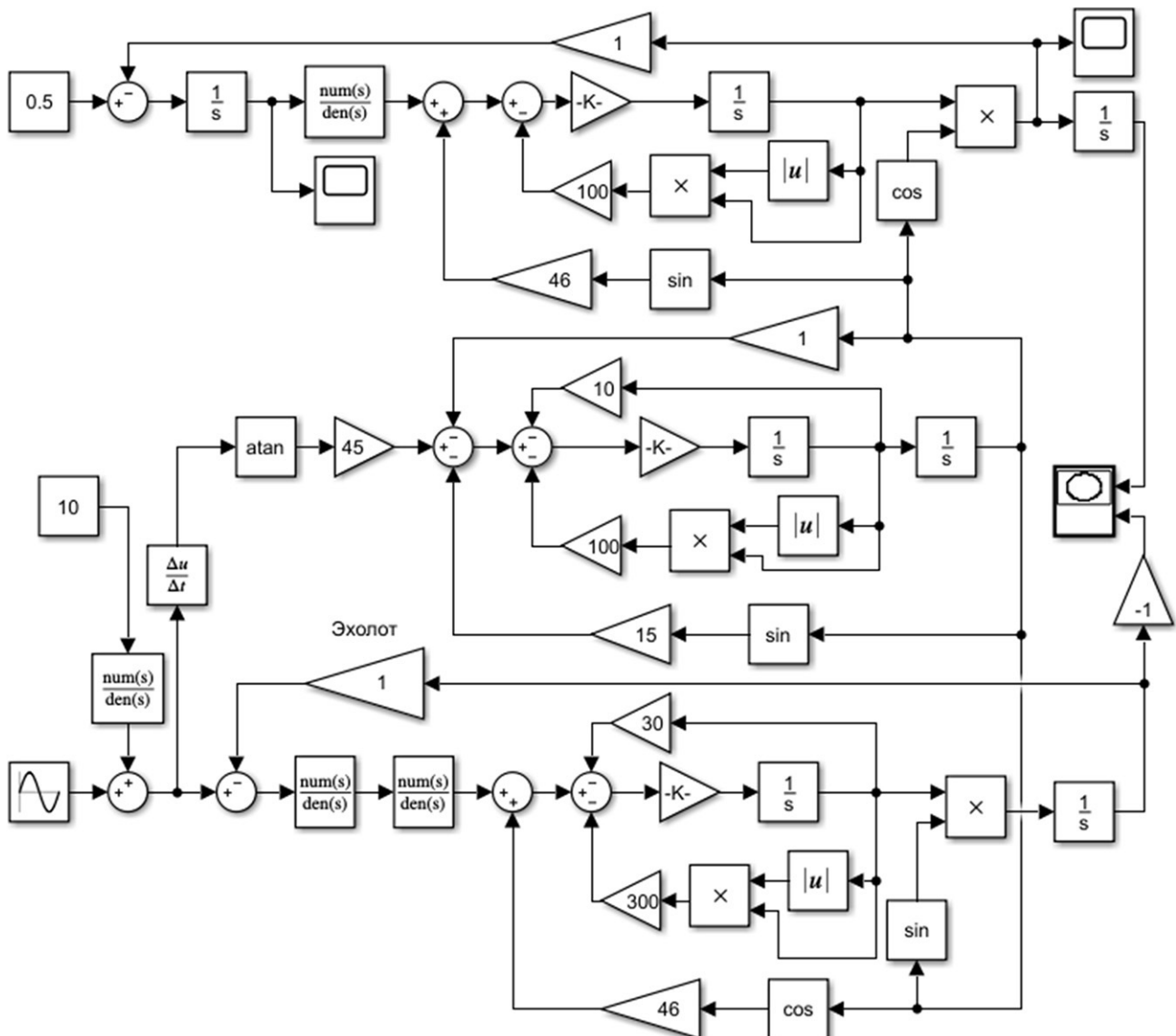


Рисунок 5 – Модель системы управления АНПА в условиях гидродинамической неустойчивости

Результаты

В результате произведенных вычислений и разработки была получена модель, показанная на рисунке 5.

Система состоит из трех каналов: модель в проекции на ось OX , модель в проекции на ось OY и модель с учетом вращения.

Как и в случае с математической моделью, модель в программе Simulink была составлена на основе структурной модели системы управления (рисунок 4) и с технической точки зрения полностью ей соответствует. На модели в системе Simulink операционные модули, соответствующие математическим операциям в формуле, заменены на блоки с соответствующей функцией. Значения функций соответствуют расчетным значениям формул. Связи между блоками и модулями повторяют связи структурной схемы [10].

При моделировании системы управления в Simulink моделируется канал управления скоростью в горизонтальной плоскости, остальные каналы имеют постоянные значения переменных управления для более простого и наглядного фиксирования результатов моделирования (рисунок 6).

Генератор, выполняющий роль командного канала, задает необходимую траекторию движения по оси X , а результаты симуляции движения выводятся на экран scope, где по оси X отображается итоговый сигнал управления по X – скоростному каналу, а по оси Y – по Y каналу скорости. В результате симуляции на графике (рисунок 6) видно, что при изменении параметра только одного вектора скорости – управление движением – происходит по обоим скоростным каналам (как по оси X , так и по оси Y), компенсируя неточности движения, вызванные гидродинамической неустойчивостью и жидкостной средой [11].

Заключение

В работе были рассмотрены вопросы управления АНПА в условиях неустойчивой гидродинамики. По результатам работы были разработаны математическая модель и структурная схема системы управления. Анализ созданной системы в программе Simulink путем моделирования показал, что отклонений от траектории в базовой системе координат нет даже при условиях сильных сторонних воздействий.

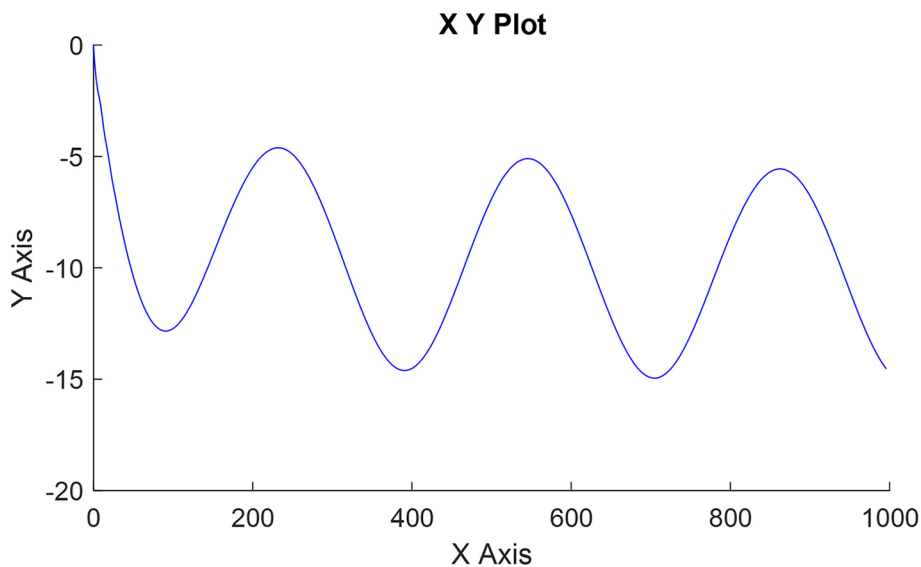


Рисунок 6 – Моделирование системы управления в Simulink

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочаров Л. Необитаемые подводные аппараты: состояние и общие тенденции развития / Л. Бочаров // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2009. № 7. – 91 с.
2. Гостилевич С.О. Разработка и исследование системы управления движением подводного аппарата в вертикальной плоскости. Математическая модель подводного аппарата / С.О. Гостилевич; МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация: Политехнический молодежный журнал. 2018. № 2. – 9 с.
3. Menter F.R. Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications / F.R. Menter. – USA: AIAA Journal, 1994 / т. 32. – С. 1598-1605.
4. Щур Н.А. Гидродинамическая неустойчивость автономного подводного аппарата / Н.А. Щур, Д.А. Вохминце. – Санкт-Петербург: ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Extreme Robotics, 2018. – С. 125-127.
5. Васильев И.А. Возникновение сил сопротивления движению подводных роботов и других объектов морского базирования при работе подруливающих устройств / И.А. Васильев. – Санкт-Петербург: ГНЦ РФ «Центральный научно-исследователь-

- ский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» // журнал Робототехника и техническая кибернетика. 2017, no. 14. – 38 с.
- Алилуев С.В. Методики и алгоритмы контроля и диагностики привода системы управления автономного подвижного аппарата / С.В. Алилуев, А.А. Большаков, А.Н. Попов, Д.П. Тетерин. – Москва: Новые технологии // журнал Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. № 4. – С. 264-269.
 - Агеев М.Д. Автономные подводные роботы: системы и технологии / М.Д. Агеев, Л.В. Киселев. – Москва: Наука, 2005. – 298 с.
 - Бодянский Е.В. Адаптивные модели в системах управления техническими объектами / Е.В. Бодянский, О.Г. Руденко. – Киев: УМК ВО, 1988. – 212 с.
 - Гурман Д.А. Моделирование системы управления движением объекта при случайных воздействиях / Д.А. Гурман. – Ульяновск: УГТУ 2009. С. 193-200.
 - Половкин В.В. Управляемое движение подводного аппарата: учебное пособие / В.В. Половкин, В.Т. Грумондз. – Москва: МАИ, 2005. – 100 с.
 - Васильев С.Н. Метод редукции и качественный анализ динамических систем / С.Н. Васильев. – Москва: РАН // Теория и системы управления. 2006. № 1. С. 21-29; № 2. С. 5-17.

Гидродинамикалық тұрақсыздық жағдайында автономды басқарылатын адамсыз су асты аппаратын математикалық модельдеу

¹*КРИВОЛАПОВА Махаббат Оралқызы, докторант, makha12@mail.ru,

¹ИВЕЛЬ Виктор Петрович, т.ғ.д., профессор, ivelvic@mail.ru,

²КАБАНОВ Алексей Александрович, т.ғ.к., кафедра меңгерушісі, kabanovaleksey@gmail.com,

¹М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті, Қазақстан, 150000, Петропавл, Пушкин көшесі, 86,

²Севастополь мемлекеттік университеті, Ресей, 299053, Севастополь, Университетская көшесі, 33,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Жұмыс гидродинамикалық тұрақсыздық жағдайында автономды басқарылатын тұрғын емес құрылғыларды қолдану проблемаларын ашып көрсетеді. Нәтижесінде, назарға гидродинамикалық тұрақсыздық әсерін ескере отырып, математикалық моделі және АТСА бақылау жүйесінің моделін құрылымдық схемасын және Simulink бағдарламалық қамтамасыз бақылау жүйесінің моделі құрылды, құрылған жүйе үлгіленген болды. Бұл жұмыс ілеспе телефон АТСА автономды тұрғын емес су асты құрылғылар мен әзірлеушілер үшін басқару жүйелерін әзірлеушілер үшін теориялық және практикалық қызығушылық болып табылады. Әзірленген математикалық және құрылымдық модельдер Simulink пакетіндегі MATLAB бағдарламалық ортасында зерттелді, модельдеу модельдің жұмыс қабілеттілігін растады.

Кілт сөздер: автономды басқарылмайтын су асты аппараты, математикалық модель, құрылымдық модель, Simulink модельдеу, басқару жүйесі, гидродинамикалық тұрақсыздық.

Mathematical Modeling of an Autonomous Uninhabited Underwater Vehicle in the Conditions of Hydrodynamic Instability

¹*KRIVOLAPOVA Makhabbat, doctoral student, makha12@mail.ru,

¹IVEL Victor, Dr. of Tech. Sci., Professor, ivelvic@mail.ru,

²KABANOV Aleksey, Cand. of Tech. Sci., Head of Department, kabanovaleksey@gmail.com,

¹M. Kozybayev North Kazakhstan University, Kazakhstan, 150000, Petropavl, Pushkin Street, 86,

²Sevastopol State University, Russia, 299053, Sevastopol, Universitetskaya Street, 33,

*corresponding author.

Abstract. This work reveals the problems of using autonomous controlled unmanned vehicles in conditions of hydrodynamic instability. As a result, the development of: a mathematical model and a structural diagram of the model of the AUUV control system, taking into account the influence of hydrodynamic instability, and a model of a control system in the Simulink software environment, simulation of the created system. This work is of theoretical and practical interest for the developers of control systems for autonomous unmanned underwater vehicles and the developers of the accompanying software for the AUUV. The developed mathematical and structural models were tested in the Simulink software environment, modeling confirmed the performance of the model.

Keywords: autonomous unguided underwater vehicle, AUV, mathematical model, structural model, Simulink simulation, control system, hydrodynamic instability.

REFERENCES

1. Bocharov L. «Neobitaemye podvodnye apparaty: sostoyanie i obshchie tendencii razvitiya» / L. Bocharov // Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes. 2009, no. 7. – 91 p.
2. Gostilovich S.O. Razrabotka i issledovaniye sistemy upravleniya dvizheniyem podvodnogo apparata v vertikal'noy ploskosti. Matematicheskaya model' podvodnogo apparata / S.O. Gostilovich; MGTU im. N.E. Baumana, Moscow, Rossiyskaya Federatsiya: Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal. 2018, no. 2. – 9 p.
3. Menter F.R. Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications / F.R. Menter. – USA: AIAA Journal, 1994 / t. 32. – pp. 1598-1605.
4. SHCHur N.A. Gidrodinamicheskaya neustojchivost' avtonomnogo podvodnogo apparata / N.A. SHCHur, D.A. Vohmince. – Saint Petersburg: GNC RF CNII RTK, Extreme Robotics, 2018. – pp. 125-127.
5. Vasil'ev I.A. Vozniknovenie sil soprotivleniya dvizheniyu podvodnyh robotov i drugih ob"ektov morskogo bazirovaniya pri rabote podrulivayushchih ustrojstv / I.A.Vasil'ev. – Saint Petersburg: GNC RF «Central'nyj nauchno-issledovatel'skiy i opytно-konstruktorskij institut robototekhniki i tekhnicheskoy kibernetiki» // zhurnal Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika. 2017. № 14. – 38 p.
6. Aliluev S.V. Metodiki i algoritmy kontrolya i diagnostiki privoda sistemy upravleniya avtonomnogo podvizhnogo apparata / S.V. Aliluev, A.A. Bol'shakov, A.N. Popov, D.P. Teterin. – Moscow: Novye tekhnologii // zhurnal Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2017, no. 4. – pp. 264-269.
7. Ageev M.D. Avtonomnye podvodnye roboty: sistemy i tekhnologii / M.D. Ageev, L.V. Kiselev. – Moscow: Nauka, 2005. – 298 p.
8. Bodyanskij E.V. Adaptivnye modeli v sistemah upravleniya tekhnicheskimi ob"ektami / E.V. Bodyanskij, O.G. Rudenko. – Kiev: UMK VO, 1988. – 212 p.
9. Gurman D.A. Modelirovanie sistemy upravleniya dvizheniem ob"ekta pri sluchajnyh vozdeystviyah / D.A.Gurman. – Ul'yanovsk: UGTU 2009. pp. 193-200.
10. Polovkin V.V. Upravlyaemoe dvizhenie podvodnogo apparata: uchebnoe posobie / V.V. Polovkin, V.T. Grumonzd. – Moscow: MAI, 2005. – 100 p.
11. Vasil'ev S.N. Metod redukcii i kachestvennyj analiz dinamicheskikh sistem / S.N. Vasil'ev. – Moscow: RAN // Teoriya i sistemy upravleniya. 2006, no. 1, pp. 21-29; no. 2, pp. 5-17.