

Фильтрация ветроволновых воздействий при управлении глубиной стабилизации автономного необитаемого подводного аппарата

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

¹ГЕРАСИМОВА Юлия Викторовна, к.т.н., доцент, julyvic@mail.ru,

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

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

¹НАО «Северо-Казахстанский университет имени Манаша Козыбаева», Казахстан, Петропавловск, ул. Пушкина, 86,

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

*автор-корреспондент.

Аннотация. Автономные самоходные подводные аппараты и роботы занимают достаточно большую нишу среди подводной техники. Работы, выполняемые аппаратами этого класса, зачастую связаны с их длительным зависанием на определенной глубине, на которой находится объект работ или исследований. Качество и точность управления в этом случае во многом зависят от точности и помехоустойчивости датчиков давления, определяющих глубину нахождения подводного аппарата. В данной работе представлен способ решения проблем, обусловленных наличием различных внешних возмущений, внутренних помех и инструментальных погрешностей измерений. Целью проведенного исследования является рассмотрение возможности использования фильтра Калмана для решения вопроса повышения помехоустойчивости. Для этого проводится разработка структуры и алгоритма калмановской фильтрации ветроволнового воздействия как случайного стационарного процесса. При исследовании были использованы положения теории автоматического управления, теории фильтрации вероятностных сигналов, методы компьютерного моделирования.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, ветроволновое воздействие, фильтр Калмана, программная среда MatLab.

Введение

Все известные подводные аппараты могут быть подразделены на несколько классификационных групп, среди которых особое место занимают автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) [1]. Основное назначение таких подводных аппаратов – разведка полезных ископаемых в районе морского шельфа, исследование морских течений (измерение скорости течений, их направления, турбулентности), измерение физических и химических параметров воды, измерение глубоководных рассеивающихся слоев и т.д.

Одним из важных параметров систем управления движением АНПА является качество управления глубиной погружения, которое во многом зависит от качества сигнала, поступающего от датчика давления, пропорционального глубине погружения подводного аппарата [2].

Проблема точного измерения глубины погружения АНПА – это в основном проблема выделения сигнала датчика давления на фоне внешних

помех и инструментальных шумов. Ветровые волнения и морские течения являются основным источником внешних помех, а к инструментальным шумам можно отнести стационарные шумы, создаваемые работой исполнительных механизмов [3].

В данном случае, учитывая большую инерционность объекта управления, можно составить модель ветрового волнения в виде суммы основной гармоники ветровой волны на заданной глубине и белого шума определенной интенсивности. Задача выделения полезного сигнала в этом случае относится к классу задач линейной фильтрации по Калману [4, 5]. Необходимым условием для осуществления такой фильтрации является наличие информации об интенсивности белого шума на входе и выходе объекта управления. Применение бортовой компьютерной системы, построенной на современных микроконтроллерах, и большие постоянные времени объекта управления позволят выделить и измерить и все шумы, и помехи на

фоне низкочастотных автоколебательных процессов в системе управления АНПА.

Задача исследования заключается в разработке структуры и алгоритма калмановской фильтрации ветроволнового воздействия как случайного стационарного процесса, позволяющих получить оптимальную оценку переменных состояния системы управления глубиной стабилизации АНПА.

Методы исследования

Решение поставленной задачи основывалось на использовании теории автоматического управления, теории фильтрации вероятностных сигналов, применении системы компьютерной математики.

В общем случае гидродинамика вертикального движения АНПА в режиме стабилизации глубины на заданном уровне описывается уравнением [6]

$$M \frac{d^2 h}{dt^2} + c \frac{dh}{dt} - k_{\text{изв}} h = q(t), \quad (1)$$

где M – масса АНПА с учетом присоединенной массы жидкости, кг;

h – текущая глубина нахождения АНПА, м;

c – гидродинамический коэффициент, обусловленный вязкостью воды, $\frac{\text{Н}}{\text{м/с}}$;

$k_{\text{обж}}$ – коэффициент обжатия корпуса АНПА, Н/м;

$q(t)$ – изменение плавучести АНПА под действием силового управляющего воздействия, Н.

Уравнение (1) соответствует передаточной функции объекта управления (АНПА) [6, 7]

$$W(s) = \frac{1}{Ms^2 + cs - k_{\text{обж}}} = \frac{\frac{1}{k_{\text{обж}}}}{\frac{M}{k_{\text{обж}}}s^2 + \frac{c}{k_{\text{обж}}}s - 1}, \quad (2)$$

где s – оператор Лапласа.

Уравнения состояния для АНПА как объекта управления с учетом уравнения (1) и помех имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = -\frac{c}{M}x_1 + \frac{k_{\text{обж}}}{M}x_2 + \frac{1}{M}q + \frac{1}{M}w \\ \frac{dx_2}{dt} = x_1 + 0 \cdot x_2 + 0 \cdot q + w \\ h = 0 \cdot x_1 + x_2 + v \end{cases}, \quad (3)$$

где w – внешняя помеха, В/м;

v – инструментальная ошибка, дБ;

x_1, x_2 – переменные состояния.

Так как, в данном случае, не все переменные состояния доступны для измерения, можно построить оценку вектора состояния $\hat{x}$ и выходного вектора $\hat{h}$, которые удовлетворяли бы определенным требованиям. То есть необходимо выполнить синтез наблюдателя для определения вектора переменных состояния объекта, который мини-

мизирует ошибку оценивания. Соответствующие оценки можно рассчитать с помощью фильтра, называемого фильтром Калмана

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x} + Bq + L(h_v - c\hat{x} - Dq), \quad (4)$$

где $\hat{x}$ – вектор состояния;

q – вектор управления;

h_v – вектор измерений (вектор выходной величины);

A – матрица состояния объекта;

B – матрица управления (входа);

C – матрица выхода по состоянию;

D – матрица выхода по управлению;

L – матрица коэффициентов обратных связей фильтра Калмана.

Матрица коэффициентов обратных связей фильтра Калмана L (4) является решением матричного алгебраического уравнения Риккати

$$L(t) = P(t)C^T(t)R^{-1}(t), \quad (5)$$

где $P(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} M((x - \hat{x})(x - \hat{x})^T)$ – корреляционная матрица, представляющая установившуюся ошибку оценивания;

$R(t)$ – интенсивность шума v .

На рисунке 1 представлена структурная схема, где АНПА представляет собой объект управления, описываемый передаточной функцией (2). В состав схемы также включен оптимальный линейный фильтр, с помощью которого происходит несмещенная оценка с минимальной среднеквадратичной ошибкой оценивания. Поскольку в данном случае рассматривается исключительно задача фильтрации, принято $q = 0$, т.е. управляющее воздействие отсутствует.

Наиболее просто и понятно описанную технологию можно реализовать в среде MatLab [9, 10].

Ниже представлен синтез фильтра Калмана, выполненный на языке программирования системы MatLab в ее рабочем окне. Синтез фильтра осуществлен для объекта (АНПА) со следующими параметрами: $M = 2000$ кг, $c = 47 \frac{\text{Н}}{\text{м/с}}$, $k_{\text{обж}} = 0,1$ Н/м, $Q = 1$ (интенсивность помех w), $R = 0,01$ (интенсивность инструментального шума v). В качестве управляющего воздействия взят автоколебательный процесс.

```
>> sys=ss(tf(1,[2000 47-0.1])); % Модель объекта в
пространстве состояний
>> [A,B,C,D]=ssdata(sys); Возвращает значение
четверки матриц
>> sys=ss(A,[B B],C,0,'inputname',{'u'
'w'},'outputname','y'); % Разделение входного си-
лового управляющего сигнала q и возмущения w.
Назначение имен
>> Q=1;
>> R=0.01;
>> [kest,L,P]=kalman(sys,Q,R) % Синтез фильтра
Калмана, рассчитывается матрица коэффициен-
```

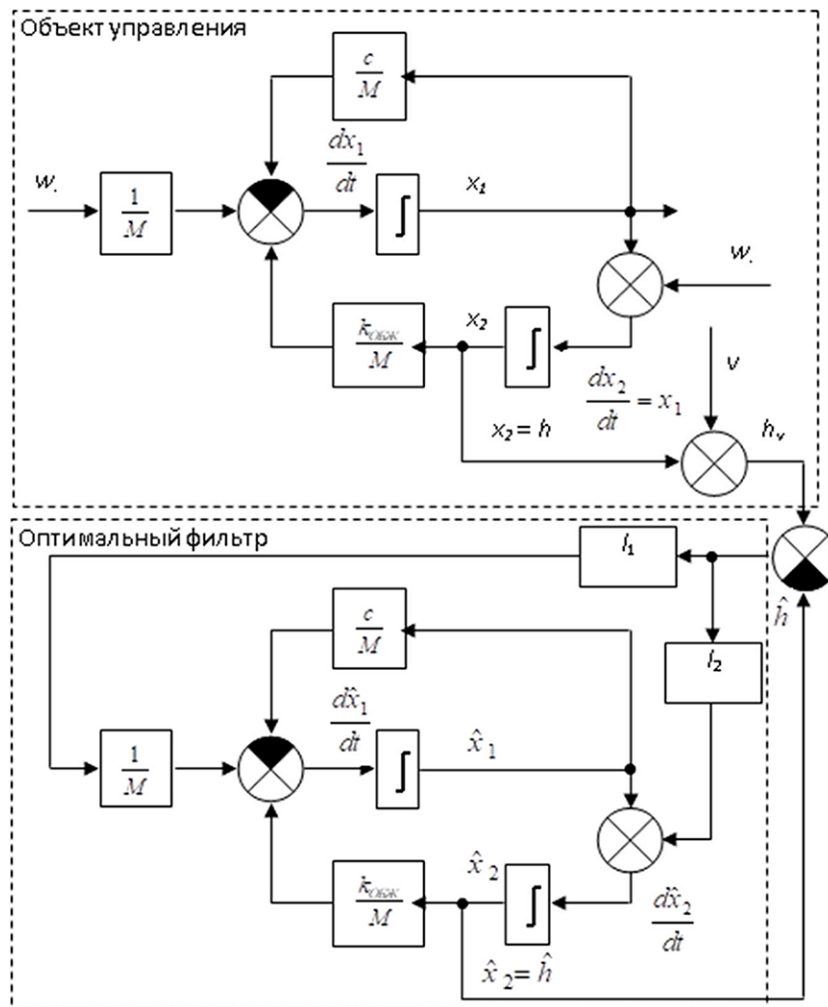


Рисунок 1 – Структурная схема объекта управления и оптимального фильтра

тов обратных связей наблюдателя **L** и ковариационная матрица **P** ошибок оценивания

L =

1.5885

0.3114

P =

0.8098 0.0621

0.0621 0.0122

>> kest=kest(1,:); % Оставляет только один выход у фильтра Калмана, который является оценкой $h_e = Cx$ выхода объекта управления

% Далее необходимо сформировать модель объекта со всеми необходимыми входами и выходами:

>> a = A;

>> b = [B B 0*B];

>> c = [C;C];

>> d = [0 0 0; 0 0 1];

>> sys1 = ss(a,b,c,d,'inputname',{'u' 'w' 'v'},'outputname',{'y' 'yv'});

>> sys2=parallel(sys1,kest,1,1,[],[]); % Параллельное соединение объекта и фильтра

>> SimModel = feedback(sys2,1,4,2,1); % Подключение объекта к фильтру

>> SimModel = SimModel([1 3],[1 2 3]); % Указыва-

ет, какие входы-выходы необходимо исключить (2-я строка или he), а какие оставить

>> SimModel.inputname; % Назначение входов объекта

>> SimModel.outputname; % Назначение выходов объекта

>> t=0:0.001:5000; % Определение периода дискретности вычислений

q=sin(0.02*t);

w=randn(size(t))*sqrt(Q)+sin(0.64*t); % Задание ошибки измерений в виде смеси «белого» шума и основной гармоники периодического изменения давления на глубине стабилизации АНПА (объекта управления)

v=randn(size(t))*sqrt(R)+0.2*sin(0.64*t); % Задание возмущения в виде смеси «белого» шума и основной гармоники силового воздействия на корпус АНПА, вызванного периодическими колебаниями частиц воды

in=[q; w; v]; % Общий вход

clf; % Очистка графического окна

out = lsim(SimModel,in,t); % Реакция модели построенной системы SimModel на входное воздействие in' (транспонированный вектор in)

h = out(:,1); % true response (истинное значение

```

сигнала или реакции)
he = out(:,2); % filtered response (отфильтрованный
сигнал или оценка истинного сигнала)
hv = h + v'; % measured response (измеренный
сигнал)
clf; % Очистка графического окна
% Далее производится разбивка графического
окна на четыре подокна по вертикали, куда дол-
жен выводиться очередной график, вводятся над-
писи и выводятся графики сигналов (рисунок 2)
>> subplot(411), plot(t,q,'-k'), ylabel('Input q'),
title('Kalman filter response')
>> subplot(412), plot(t,hv,'-k'), ylabel('Output hv')
>> subplot(413), plot(t,h,'-k'), ylabel('Output h')
>> subplot(414), plot(t,he,'-k'), ylabel('Output he')

```

Результаты

В результате синтеза фильтра Калмана в программной среде MatLab были получены графики входных и выходных сигналов объекта управления (рисунок 2).

Первый график (рисунок 2, а). Входной сигнал, имитирующий автоколебательный процесс (параметры взяты из предыдущих модельных экспериментов как среднестатистические данные).

Второй график (рисунок 2, б). Измеренный сигнал, спектр которого включает гармонику автоколебательного процесса, измерительные шумы (основная гармоника периодического изменения давления на глубине стабилизации аппарата, вызванного ветроволновым волнением и воздействующего на датчик давления) и «белый»

шум, интенсивность которого измеряется в реальных условиях подводного плавания.

Третий график (рисунок 2, в). Требуемый выходной или идеальный сигнал без помех.

Четвертый график (рисунок 2, г). Оценка требуемого выходного сигнала или сигнал, прошедший калмановскую фильтрацию.

Анализируя четвертый график (рисунок 2, г), необходимо отметить, что оценка сигнала не имеет высокочастотных помех, но включает вынужденную составляющую на фоне автоколебательного процесса изменения текущей глубины АНПА, вызванную силовым воздействием частиц воды, перемещающихся относительно корпуса АНПА.

Таким образом, можно считать, что задача устранения влияния ветроволнового возмущения как случайного стационарного процесса успешно решается с помощью фильтра Калмана.

Заключение

В результате проведенной исследовательской работы можно сделать вывод, что применение калмановской фильтрации является эффективным средством для оценки переменных состояния системы управления глубиной стабилизации АНПА как объекта управления в условиях воздействия различных помех и шумов на его выходной сигнал. Правильная оценка переменных состояния позволит повысить качество управления подводным аппаратом, обеспечив заданную глубину стабилизации.

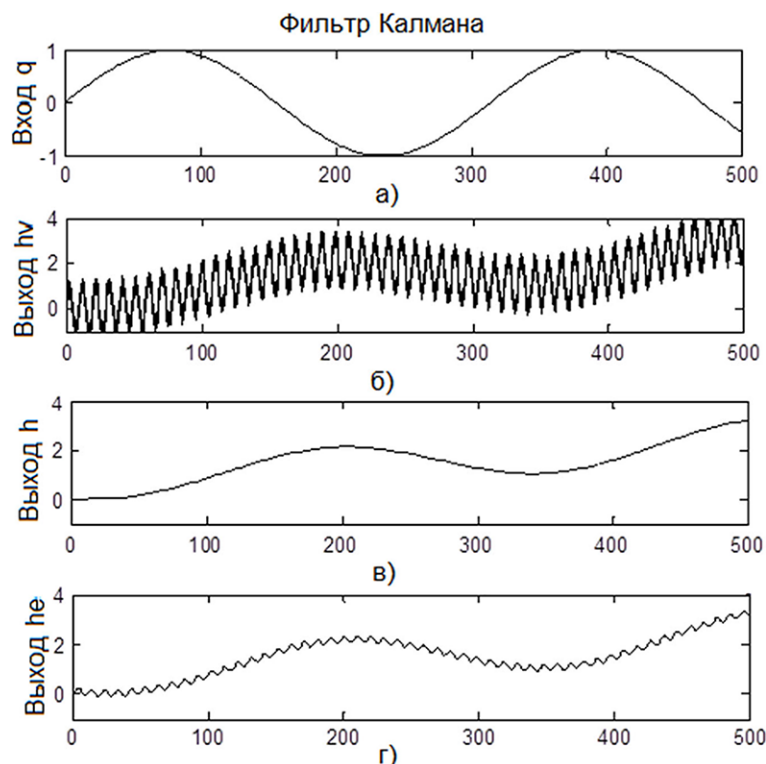


Рисунок 2 – Графики входных и выходных сигналов объекта управления

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Войтов Д.В. Автономные необитаемые подводные аппараты. – Москва: МОРКНИГА, 2015. – 332 с.
2. Шостак В.П. Подводные аппараты-роботы и их манипуляторы. – Москва: ГЕОС, 2011. – 134 с.
3. Агеев М.Д. Автономные подводные роботы: системы и технологии / М.Д. Агеев, Л.В. Киселев. – Москва: Наука, 2005. – 298 с.
4. Шахтарин Б.И. Фильтры Винера и Калмана. Учебное пособие для вузов. – Москва: Горячая линия – Телеком, 2016. – 396 с.
5. Шпекторов А.Г., Фам В.Т. Анализ применения микромеханических измерительных систем для задач управления морскими подвижными объектами // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 5. С. 16-20.
6. Криволапова М.О., Ивель В.П., Кабанов А.А. Математическое моделирование автономного управляемого необитаемого подводного аппарата в условиях гидродинамической неустойчивости // Республиканский научно-технический журнал «Университет еңбектері – Труды университета». Караганда, 2022. – № 1. – С. 270-278.
7. Ивель В.П., Герасимова Ю.В. Адаптивная система вертикального позиционирования автономного подводного аппарата // Международный научный журнал «Наука и мир» ISSN 2308-4804. Волгоград, 2014. – № 2 (6), Том 1. – С. 161-164.
8. Охорзин В.А., Сафонов К.В. Теория управления: Учебник. – СПб: Лань, 2014. – 224 с.
9. Гилат А. MATLAB. Теория и практика. – Москва: ДМК Пресс, 2016. – 417 с.
10. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. – Москва: ДМК Пресс, 2019. – 768 с.

Автономды қоныстанбаған су асты аппаратын тұрақтандыру тереңдігін басқару кезінде жел толқындарының әсерін сүзу

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

¹**ГЕРАСИМОВА Юлия Викторовна**, т.ғ.к., доцент, julyvic@mail.ru,

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

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

¹«Манаш Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті» КеАҚ, Қазақстан, Петропавл, Пушкин көшесі, 86,

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

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Автономды өздігінен жүретін су асты қайықтары мен роботтар су астындағы жабдықтар арасында үлкен орын алады. Осы санаттағы аппараттарымен орындалатын жұмыстар көбінесе олардың жұмыс немесе зерттеу нысаны орналасқан белгілі бір тереңдікте ұзақ уақыт қатып қалуымен байланысты. Бұл жағдайда басқарудың сапасы мен дәлдігі көбінесе суасты қайықтарының тереңдігін анықтайтын қысым датчиктерінің дәлдігі мен шуға төзімділігіне байланысты. Бұл жұмыс әр түрлі сыртқы бұзылулардың, ішкі кедергілердің және аспаптық өлшеу қателіктерінің болуына байланысты мәселелерді шешу әдісін ұсынады. Зерттеудің мақсаты-шуылға төзімділікті арттыру мәселесін шешу үшін Қалман сүзгісін пайдалану мүмкіндігін қарастыру. Ол үшін кездейсоқ стационарлық процесс ретінде жел толқынының әсерін Қалман фильтрациясының құрылымы мен алгоритмі жасалады. Зерттеу барысында автоматты басқару теориясының ережелері, ықтималдық сигналдарын сүзу теориясы, компьютерлік модельдеу әдістері қолданылды.

Кілт сөздер: автономды қоныстанбаған су асты көлігі, жел толқыны, Калман сүзгісі, MatLab бағдарламалық ортасы.

Filtering of Wind-wave Effects in Controlling the Depth of Stabilization of an Autonomous Unmanned Underwater Vehicle

^{1*}**KRIVOLAPOVA Makhabbat**, Doctoral Student, makha12@mail.ru,

¹**GERASSIMOVA Yuliya**, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, julyvic@mail.ru,

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

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

¹NPLC «Manash Kozybayev North Kazakhstan University», Kazakhstan, Petropavl, Pushkin Street, 86,

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

*corresponding author.

Abstract. Autonomous underwater vehicles (AUVs) and robots play an essential role in underwater technology. The tasks that these machines are required to do often involve submerging to a certain depth, where the object of work or research is located. The success of the mission and the accuracy of control at that depth largely relies upon the precision and immunity to interference of the pressure sensors, which are used to measure the depth of the underwater device. This work presents a method for addressing issues caused by external disturbances, internal interference and inaccuracies in the instrumentation used for measurement. The research was conducted to see if the Kalman filter could be used to

make systems more resistant to noise. To do this, the structure and algorithm of Kalman filtering of wind wave impact as a random stationary process was developed. The theories of automatic control, the theory of filtering of probabilistic signals, and the methods of computer modeling were used in the research.

Keywords: *autonomous unmanned underwater vehicle, wind-wave effect, Kalman filter, MatLab software environment.*

REFERENCES

1. Voitov D.V. Autonomous uninhabited underwater vehicles. – Moscow: Morkniga, 2015. – 332 p.
2. Shostak V.P. Underwater robotic vehicles and their manipulators. – Moscow: GEOS, 2011. – 134 p.
3. Ageev M.D. Autonomous underwater robots: systems and technologies / M.D. Ageev, L.V. Kiselev. – Moscow: Nauka, 2005. – 298 p.
4. Shakhtarin B.I. Wiener and Kalman filters. Textbook for universities. – Moscow: Hotline – Telecom, 2016. – 396 p.
5. Shpektorov A.G., Fam V.T. Analysis of the use of micromechanical measuring systems for control tasks of marine moving objects. Izvestia of Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI». 2017. No. 5. Pp. 16-20.
6. Krivolapova M.O., Ivel V.P., Kabanov A.A. Mathematical modeling of an autonomous uninhabited underwater vehicle in the conditions of hydrodynamic instability // Republican scientific and technical journal «University Enbekteri – Proceedings of the University». Karaganda, 2022. – No. 1. – Pp. 270-278.
7. Ivel V.P., Gerasimova Yu.V. Adaptive system of vertical positioning of an autonomous underwater vehicle // International scientific journal «Science and Peace» ISSN 2308-4804. Volgograd, 2014. – No. 2 (6), Volume 1. – Pp. 161-164.
8. Okhorzin V.A., Safonov K.V. Management Theory: Textbook. – Saint Petersburg: Lan, 2014. – 224 p.
9. Gilat A. MATLAB. Theory and practice. – Moscow: DMK Press, 2016. – 417 p.
10. Dyakonov V.P. MATLAB. Full tutorial. – Moscow: DMK Press, 2019. – 768 p.