DOI 10.54596/2309-6977-2021-4-126-135
УДК 621.039.5
МРНТИ 44.33.31

УСТРАНЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕТРОВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ДВИЖЕНИЕ ПОДВОДНОГО АППАРАТА С ПОМОЩЬЮ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Герасимова Ю.В.[1*], Ивель В.П.[2], Криволапова М.О.[3], Зыкова Н.В.[4], Кабанов А.А.[5]

[*]НАО «Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева», Петропавловск, Республика Казахстан

[5]Севастопольский государственный университет, Севастополь, Российская Федерация

[*]E-mail: julyvic@mail.ru

Аннотация

Статья посвящена проблеме влияния ветроволновых возмущений на качество управления необитаемым подводным аппаратом. Проблема является актуальной, так как в результате такого воздействия происходит увеличение затрат электроэнергии на работу двигателя, который осуществляет откачку и закачку воды в балластную камеру подводного аппарата для поддержания его на заданной глубине, что в целом сказывается на сокращении времени пребывания аппарата под водой. В ходе исследования была проведена оценка влияния ветроволнового возмущения в зависимости от его балльности, и предложено средство для устранения чрезмерных затрат электроэнергии в виде низкочастотной фильтрации.

Ключевые слова: необитаемый подводный аппарат, ветроволновое возмущение, система автоматического управления, переходный процесс, автоколебательный процесс, электродвигатель, Simulink-модель.

ЖЕЛ ТОЛҚЫНЫНЫҢ БҰЗЫЛУЫНЫҢ ӘСЕРІН ЖОЮ ТӨМЕН ЖИІЛІКТІ СҮЗУ АРҚЫЛЫ СУАСТЫ ҚАЙЫҒЫНЫҢ ҚОЗҒАЛЫСЫНА

Герасимова Ю.В.[1*], Ивель В.П.[2], Криволапова М.О.[3], Зыкова Н.В.[4], Кабанов А.А.[5]

[*]КЕАҚ «М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті», Петропавл, Қазақстан Республикасы

[5]Севастополь мемлекеттік университеті, Севастополь, Ресей Федерациясы

[*]E-mail: julyvic@mail.ru

Аңдатпа

Мақала жел толқынының бұзылуының адам тұрмайтын суасты көлігін басқару сапасына әсері мәселесіне арналған. Мәселе өзекті болып табылады, өйткені мұндай әсердің нәтижесінде су асты аппаратының балласт камерасына суды белгілі бір тереңдікте ұстап тұру үшін айдауды және айдауды жүзеге асыратын қозғалтқыштың жұмысына электр энергиясының шығындары артады, бұл тұтастай алғанда аппараттың су астында болу уақытын қысқартуға әсер етеді. Зерттеу жел толқынының бұзылуының әсерін оның баллына қарай бағалады және төмен жиілікті сүзу түріндегі электр энергиясының шамадан тыс шығындарын жою құралы ұсынылды.

Түйінді сөздер: адам тұрмайтын суасты көлігі, жел толқыны, автоматты басқару жүйесі, өтпелі процесс, автоматты тербеліс процесі, электр қозғалтқышы, Simulink моделі.

ELIMINATION OF THE INFLUENCE OF WIND-WAVE DISTURBANCES ON THE MOVEMENT OF THE UNDERWATER VEHICLE USING LOW-FREQUENCY FILTERING

Gerassimova Y.[1*], Ivel V.[2], Krivolapova M.[3], Zykova N.[4], Kabanov A.[5]

[*]Non-profit limited company "M. Kozybayev North Kazakhstan University", Petropavlovsk, Republic of Kazakhstan

[5]Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation*

[*]E-mail: julyvic@mail.ru

Abstract

The article is devoted to the problem of the influence of wind-wave disturbances on the quality of control of an uninhabited underwater vehicle. The problem is urgent, since as a result of such an impact, there is an increase in the cost of electricity for the operation of the engine, which pumps and pumps water into the ballast chamber of the underwater vehicle to maintain it at a given depth, which generally affects the reduction of the time the device stays underwater. In the course of the study, the influence of the wind wave disturbance was assessed depending on its score, and a means was proposed to eliminate excessive energy costs in the form of low-frequency filtration.

Keywords: uninhabited underwater vehicle, wind wave disturbance, automatic control system, transient process, self-oscillating process, electric motor, Simulink model.

Введение

В данной статье рассматривается вопрос устранения влияния ветроволновых возмущений на движение необитаемого подводного аппарата [1]. Назначением таких подводных аппаратов является исследование шельфа морского дна, осуществляемого для различных целей, например, для прокладки кабельных линий. Управление данным подводным аппаратом происходит с помощью специальной системы автоматического управления, задача которой состоит в погружении аппарата на заданную глубину, в расположении его в определенном месте и в стабилизации в этом положении. Волновое воздействие будет оказывать существенное влияние на качество управления процессом, что приводит к необходимости минимизировать такое влияние. Для решения поставленной задачи на первом этапе исследования было осуществлено математическое моделирование ветроволновых возмущений с использованием прикладного пакета моделирования Simulink программы MatLab. С помощью полученных моделей была проведена оценка влияния ветроволновых возмещений различной амплитуды на стабилизацию подводного аппарата на заданной глубине. Для повышения качества управления и снижения затрат электроэнергии в статье был предложен метод низкочастотной фильтрации.

Методы исследования

Решение поставленной задачи в области управления подводными аппаратами, основывалось на использовании теоретических и экспериментальных методов. К теоретическим методам относятся основные положений теории автоматического управления, используемые для описания работы системы управления подводным аппаратом с помощью математических моделей, а также положения теории фильтрации сигналов. При выполнении экспериментальной части исследования была использована система компьютерного моделирования MatLab.

Результаты исследования

К результатам исследования можно отнести полученные графики переходных процессов, возникающих в системе управления подводным аппаратам при ветроволновом воздействии, а также графики переходных процессов после осуществления низкочастотной фильтрации.

Дискуссия

Морское волнение, которое может оказать воздействие на процесс плавания подводного аппарат (ПА), включает два типа волн: ветровые волны и внутренние волны различного происхождения [2].

Наибольшее распространение получили два варианта математической модели ветровых волн: модель волны как гармоническое возмущающее воздействие и модель как случайный вероятностный процесс.

Если рассматривать первый вариант ветроволновой модели, то в ее основе лежит представление о волновом процессе как о синусоидальном силовом воздействии, которое оказывают вертикально перемещающиеся частицы воды на корпус ПА, и синусоидальном воздействии давления на датчик давления. Амплитуда волнового воздействия на ПА при этом является функцией заданной глубины стабилизации [3].

Система уравнений (1) представляет формализацию этой – скорости вертикального перемещения частиц жидкости относительно неподвижной системы координат [4].

$$\begin{cases} M_{ПА}\dfrac{dv}{dt} + M_{ПР}\left(\dfrac{dv}{dt} - \dfrac{dv_B}{dt}\right) + k_1(v^2 - v_B^2) - k_{обж}h - q(t) + q_0 = 0; \\ v_B = A_B \cdot \omega_B \cdot \cos\omega_B t, \end{cases} \quad (1)$$

где $M_{ПА}$ – масса аппарата, кг;

$M_{ПР}$ – присоединенная масса, кг;

v – скорость вертикального движения ПА, м/с;

A_B, ω_B, v_B – амплитуда (м), частота (рад/с) и скорость движения частиц воды относительно неподвижной системы координат (м/с);

$(v^2 - v_B^2)$ – скорость движения частиц воды относительно корпуса ПА, м/с;

$\left(\dfrac{dv}{dt} - \dfrac{dv_B}{dt}\right)$ – ускорение движения частиц воды относительно корпуса ПА, м/с^2.

Режимы погружения и стабилизации ПА имеют разную природу. Так погружение аппарата соответствует турбулентному режиму, а стабилизация – ламинарному режиму. В связи с чем, на основе уравнения (1) была составлена система уравнений (2).

Экспериментальные данные, приведенные в источниках [1, 3], позволяют утверждать, что турбулентный режим возникает при скорости обтекания жидкостью корпуса аппарата больше 0,5 м/с.

$$\begin{cases} M_{ПР}\dfrac{dv_B}{dt} + k_1 v_B^2 + k_{обж}h + q(t) - q_0 - k_1 v^2 = M\dfrac{dv}{dt}, \ при \ v_B \geq 0{,}5 м/с; \\ M_{ПР}\dfrac{dv_B}{dt} + k_2 v_B + k_{обж}h + q(t) - q_0 - k_2 v = M\dfrac{dv}{dt}, \ при \ v_B \leq 0{,}5 м/с; \\ v_B = A_B \cdot \omega_B \cdot \cos\omega_B t. \end{cases} \quad (2)$$

Структурная схема, соответствующая первому уравнению из (2), представлена на рисунке 1.

При определении модели ветроволнового возмущения необходимо учитывать, что амплитуда волнового возмущения по данным источника [5] с ростом глубины изменяется по экспоненциальному закону.

$$A_B = A_П e^{-k_B h_0}, \quad (3)$$

где A_B – амплитуда волны на глубине стабилизации ПА, м;

$A_П$ – амплитуда волны на поверхности моря, м;

h_0 – глубина стабилизации ПА, м;

$k_B = \frac{2\pi}{\lambda_B}$ – волновое число, здесь λ_B – длина волны.

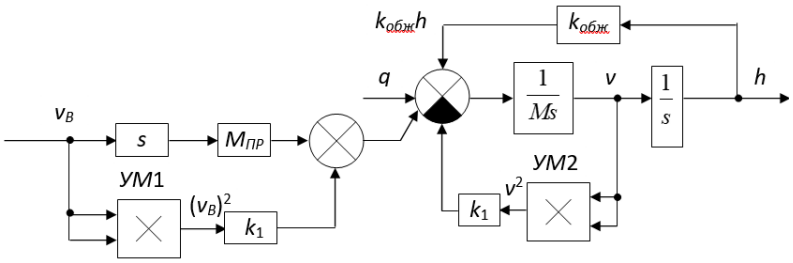

Рисунок 1. Структурная схема объекта управления при ветроволновом возмущении

Период волны связан с длиной волны соотношением $\tau = 0{,}8\sqrt{\lambda_B}$, частота вычисляется по формуле $\omega = 2\pi/\tau$, а амплитуда скорости вертикальных колебаний частиц воды $A_{Bv} = A_B \cdot \omega$.

Имеются экспериментальные данные [6] о максимальных значениях элементов ветровых волн для глубокого моря ($H/\lambda > 1/2$, где H – глубина моря в исследуемом районе) при разной бальности морского волнения. По этим данным составлена таблица 1, для заданной глубины стабилизации $h_0 = 20$ м.

Таблица 1. Параметры ветроволнового воздействия на ПА на глубине стабилизации в зависимости балльности ветровых волн на поверхности

Баллы	$A_{П(м)}$	λ_B	$20k_B$	e^{-20k_B}	$A_П e^{-20k_B}$	τ(с)	ω(рад/с)	A_{Bv}
IV	0,55	13	9,6	0	0	2,88	2,18	0
V	1,1	30	4,2	0,015	0,0165	4,38	1,43	0,023
VI	1,5	45	2,6	0,074	0,111	5,37	1,17	0,129
VII	2,3	72	1,74	0,176	0,405	6,78	0,92	0,373
VIII	3,2	108	1,16	0,314	1,005	8,31	0,75	0,75
IX	4,2	149	0,84	0,432	1,81	9,77	0,64	1,16
X	5,35	197	0,64	0,53	2,84	11,23	0,56	1,59
XI	7	272	0,46	0,63	4,41	13,2	0,476	2,1
XII	8,4	336	0,38	0,68	5,7	14,66	0,43	2,45

Полученные уравнения (2), структура объекта управления с учетом ветроволнового возмущения (рисунок 1) и содержание таблицы 1 позволяют составить Simulink-модель для исследования влияния ветроволнового волнения на процесс стабилизации ПА на заданной глубине (рисунок 2).

На рисунке 2 обозначение *vw* соответствует скорости v_B. Усилители Gain3 и Gain4, и постоянная g1 являются технологическими блоками и предназначены для масштабирования измеряемых процессов.

Коэффициент усиления усилителя Gain1 300 соответствует параметру $M_{ПР}$ на рисунке 1 (присоединенная масса жидкости ПА).

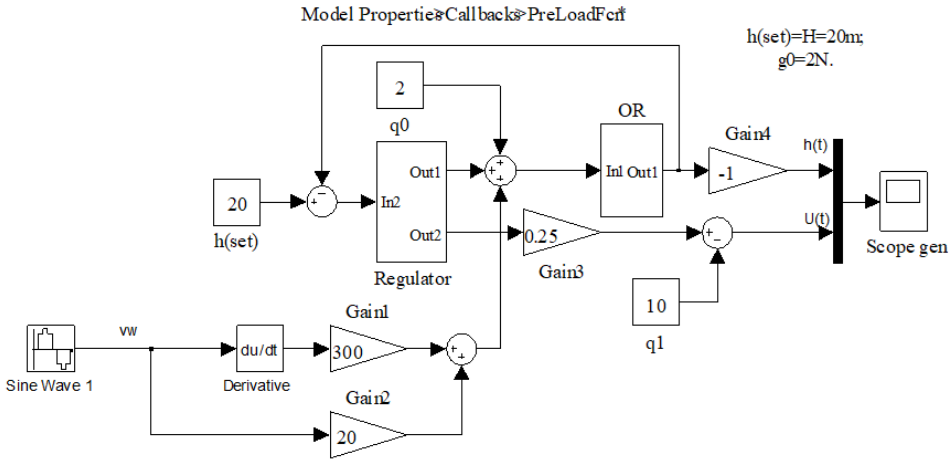

Рисунок 2. Simulink-модель системы управления при воздействии ветровых волн (при v_B<0,5 м/с)

На рисунке 3 показана структура модели объекта управления, соответствующая ламинарному режиму обтекания жидкостью корпуса аппарата.

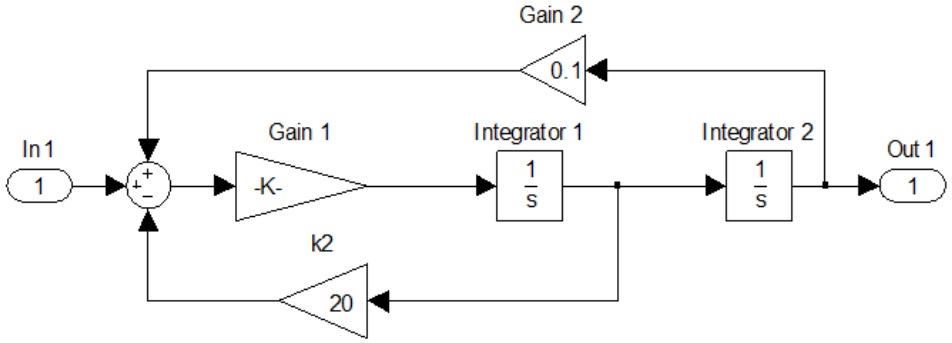

Рисунок 3. Simulink-модель объекта управления при воздействии ветровых волн (при vB<0,5 м/с)

По данным таблицы 1, при соблюдении условия v_B<0,5 м/с, было проведено три модельных эксперимента по следующим данным: без воздействия ветровых волн; A_{Bv} = 0,129 м, ω = 1,17 рад/с; A_{Bv} = 0,373 м, ω = 0,92 рад/с.

Результаты представлены на рисунках 4 *а*, *б* и *в*.

Проведенные эксперименты с использованием пакета Simulink показали, что при волнении в V баллов на глубине 20 м установившийся автоколебательный процесс

(рисунок 4, *а*) в системе своих параметров не меняет. При волнении в шесть баллов амплитуда колебаний увеличивается примерно на четверть (рисунок 4, *б*), при этом расход энергии увеличивается в два раза (количество управляющих импульсов $U_{упр}$, поступающих на электродвигатель водяного насоса, увеличилось в два раза). При волнении в семь баллов (рисунок 4, *в*) наступает переходной режим, т.е. режим пограничный между автоколебательным процессом и режимов вынужденных колебаний. Сами автоколебания уменьшаются и по амплитуде, и по частоте, а на фоне автоколебательного процесса просматриваются вынужденные колебания с частотой ветровой волны.

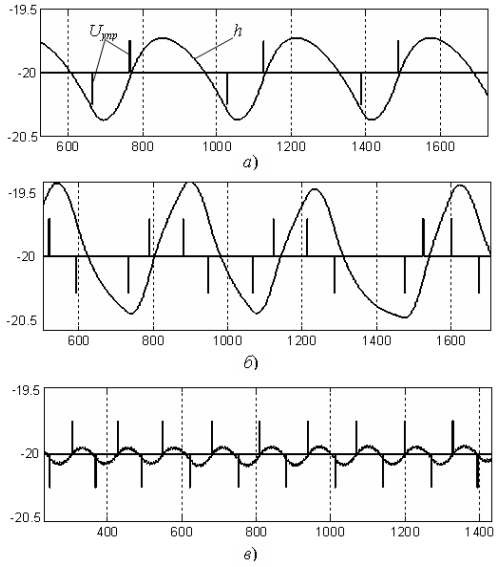

Рисунок 4. Переходные процессы на выходе системы управления при глубине 20 м: без воздействия волны (а); параметры волны: A_{Bv} = 0,129 м, ω= 1,17 рад/с (б); A_{Bv} = 0,373 м, ω = 0,92 рад/с (в)

На рисунках 5 и 6 представлены Simulink-модели системы и объекта управления при турбулентном режиме обтекания жидкостью корпуса аппарата.

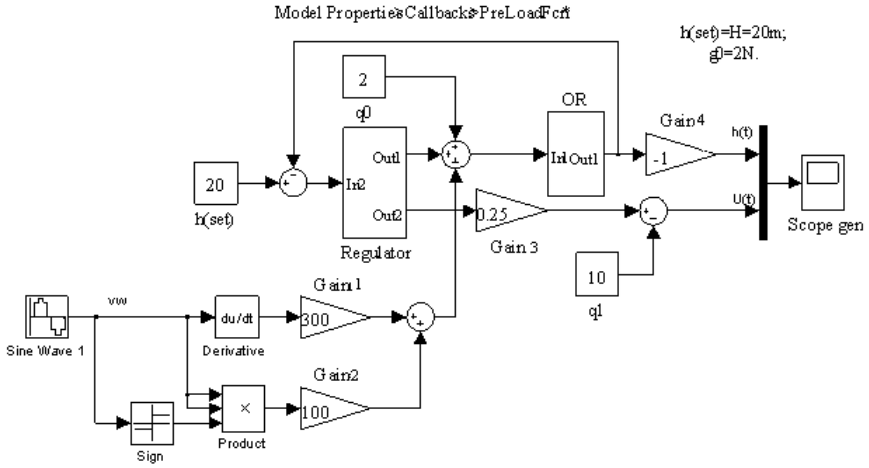

Рисунок 5. Simulink-модель системы управления при воздействии ветровых волн (при v_B>0,5 м/с)

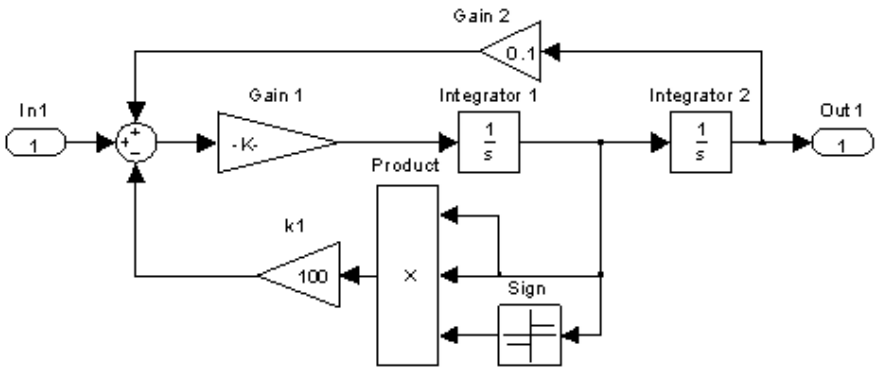

Рисунок 6. Simulink-модель объекта управления при воздействии ветровых волн (при v_B>0,5 м/с)

По данным таблицы 1, при соблюдении условия v_B>0,5 м/с, было проведено три модельных эксперимента по следующим данным: A_{Bv} = 0,75 м, ω = 0,75 рад/с (*а*); A_{Bv} = 1,59 м, ω = 0,56 рад/с; A_{Bv} = 2,1 м, ω = 0,476 рад/с.

Результаты представлены на рисунке 7 *а*, *б* и *в*.

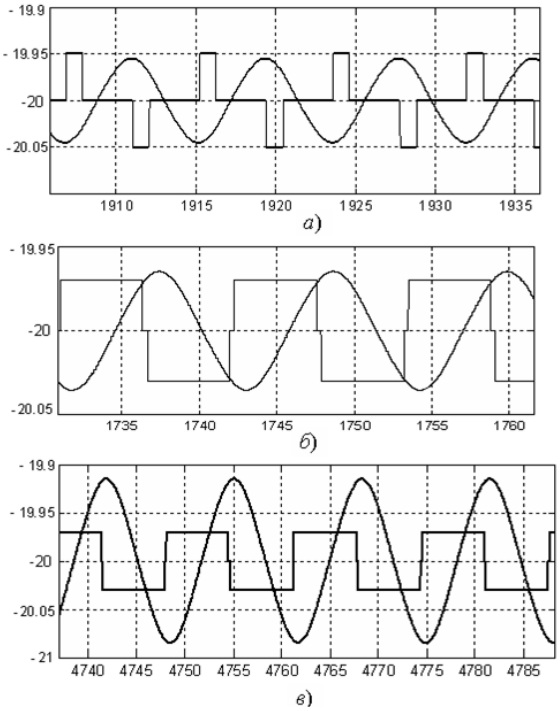

Рисунок 7. Переходные процессы на выходе системы управления при глубине 20 м: параметры волны: A_{Bv} = 0,75 м, ω= 0,75 рад/с (а); A_{Bv} = 1,59 м, ω= 0,56 рад/с (б); A_{Bv} = 2,1 м, ω = 0,476 рад/с (в)

Проведенные эксперименты показали, что при волнении в VIII баллов на глубине 20 м происходит захват автоколебаний системы. Небольшая амплитуда скорости волновых движений на этой глубине способствуют возникновению скользящего режима, при котором амплитуда вынужденных колебаний ПА по глубине крайне мала (A_h ≤0,05 м).

При этом расход электроэнергии значительно возрастает за счет резкого увеличения частоты вынужденных колебаний ПА. Волнение в десять баллов приводит к значительному увеличению вынужденных колебаний ПА по глубине (A_h ≈3 м). Это происходит в результате выхода системы из скользящего режима и перехода ее в следящий режим, т.е. режим при котором амплитуда и частота вынужденных колебаний аппарата прямо пропорциональны амплитуде и частоте скорости колебательных движений частиц жидкости относительно корпуса аппарата. Управляющие импульсы напряжения питания, поступающие на электродвигатель водяного насоса, имеют скважность порядка 0,9, т.е. электродвигатель работает практически в непрерывном режиме. И, наконец, при ветровой волне в одиннадцать баллов амплитуда вынужденных колебаний ПА достигает значения 9,8 м. Скважность работы электродвигателя принимает значение 0,95. Такой неэкономичный режим работы системы приведет к тому, что запаса электроэнергии аккумуляторных батарей хватит максимум на четыре-пять часов автономной работы.

Следует отметить, что, несмотря на то, что с увеличением глубины стабилизации ПА влияние ветроволнового волнения уменьшается по экспоненциальному закону, на глубине 100 метров при волнении на поверхности моря в X-XII баллов, влияние ветроволновых возмущений сказывается на параметрах установившегося процесса и на энергетических характеристиках силовой части системы управления.

Уменьшить затраты электроэнергии в данной ситуации возможно с помощью низкочастотной фильтрации.

Смысл предложенного метода заключается в том, что перед регулятором (на рисунке 7 обозначен как Regulator) устанавливается фильтр низкой частоты первого порядка (Transfer Fcn1) с постоянного времени примерно в три раза большей, чем период самой длинной волны. Если предположить, что аппарат плавает в условиях шторма на поверхности моря в одиннадцать баллов, то постоянную времени инерционного звена следует выбрать T =50 с.

На рисунках 8 и 9 представлены Simulink-модель с такой низкочастотной коррекцией и результаты моделирования соответственно.

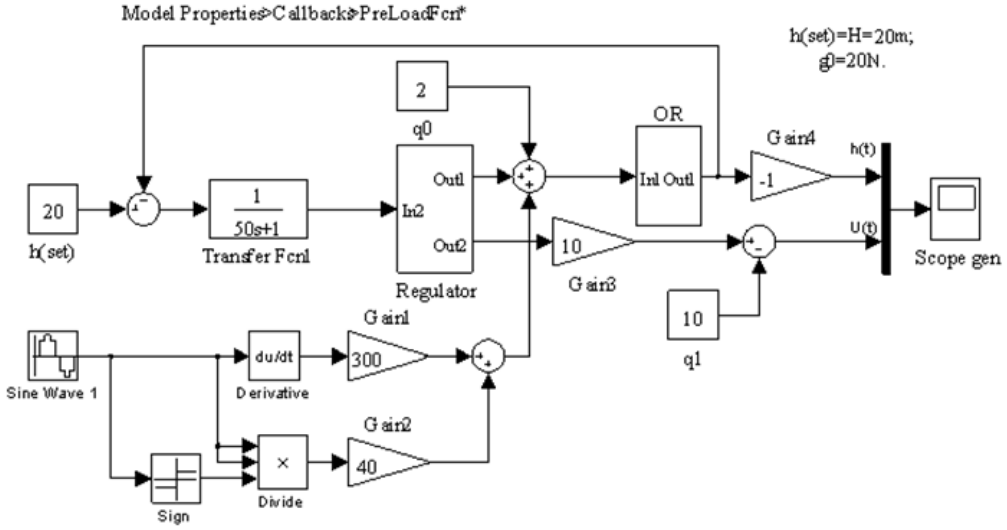

Рисунок 8. Simulink-модель системы управления с низкочастотной коррекцией

Результаты моделирования (рисунок 9) можно охарактеризовать следующим образом. Синусоидальный процесс изменения глубины стабилизации аппарата во времени представляет собой смесь двух гармоник: первая отражает автоколебания, вызванные управляющим воздействием системы управления, вторая характеризует силовое воздействие на корпус аппарата. Однако вторая гармоника более высокой частоты на вход устройства управления или регулятор не попадает, поскольку не проходит низкочастотный фильтр на входе регулятора. Таким образом, регулятор как бы "не видит" вынужденных колебаний наложенных на низкочастотную гармонику и реагирует только на автоколебательный процесс.

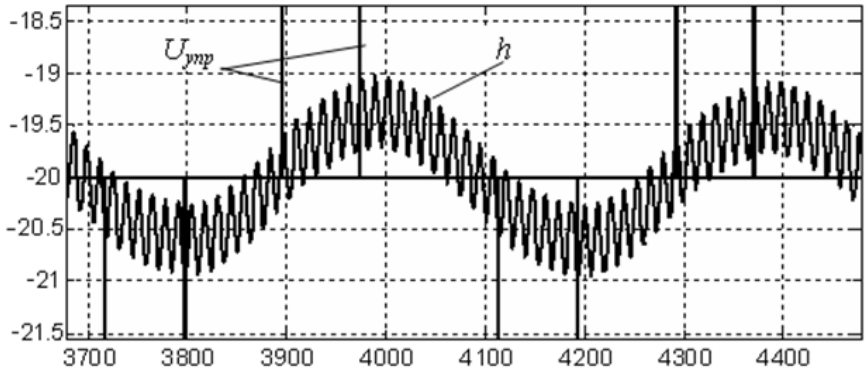

Рисунок 9. Выходной процесс в системе с низкочастотной коррекцией

Для подтверждения справедливости этих выводов можно обратиться к рисунку 4, *а*, где изображен автоколебательный процесс без воздействия ветроволнового воздействия. Можно заметить, что энергетические характеристики процесса (рисунок 9) несколько хуже, чем для процесса на рисунке 4, *а* (на один период во втором процессе приходится в два раза больше силовых управляющих импульсов), но период автоколебаний сохраняется и срыва автоколебательного процесса не происходит.

Заключение

Итак, в результате исследования было установлено негативное влияние ветроволнового возмущения на качество управления подводным аппаратом и на расход электроэнергии. Добавление фильтра низкой частоты в структуру системы управления подводным аппаратом позволило устранить последствия ветроволновых воздействий.

Следует также отметить тот факт, что установленный фильтр является двухканальным фильтром, т.е. он устраняет не только влияние силового воздействия ветровых волн на систему управления, но также не пропускает высокочастотные колебания давления жидкости, воспринимаемые датчиком давления, к системе управления. Вследствие этого нет необходимости в исследовании второго канала воздействия ветроволновых возмущений на систему управления ПА.

Литература:

1. Агеев М.Д., Киселев Ю.В. и др. Автономные подводные роботы: системы и технологии. – М.: Наука, 2005. – 398 с.
2. Кувшинов Г.Е., Наумов Л.А. Системы управления глубиной погружения буксируемых объектов: монография. – Владивосток: Дальнаука, 2005. – 285 с.
3. Ястребов В.С., Филатов А.М. Системы управления движением робота. – М.: Машиностроение, 1979. – 176 с.

4. 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.
5. О параметрических соотношениях гидродинамики и устойчивости движения автономного подводного робота / Киселев Л.В., Медведев А.В. // Подводные исследования и робототехника. – 2013. - № 1(15). - 17-22 с.
6. Гидродинамический расчет самоходных подводных аппаратов / Слижевский Н.Б., Король Ю.М., Соколик М.Г. // Учебное пособие. – Николаев: УГМТУ, 2000. - 93 с.

References:

1. Ageev M.D., Kiselev Yu.V. i dr. Avtonomnye podvodnye roboty: sistemy i tekhnologii. – M.: Nauka, 2005. – 398 s.
2. Kuvshinov G.E., Naumov L.A. Sistemy upravleniya glubinoj pogruzheniya buksiruemyh ob"ektov: monografiya. – Vladivostok: Dal'nauka, 2005. – 285 s.
3. Yastrebov V.S., Filatov A.M. Sistemy upravleniya dvizheniem robota. – M.: Mashinostroenie, 1979. – 176 s.
4. Ivel' V.P., Gerasimova Yu.V. Adaptivnaya sistema vertikal'nogo pozicionirovaniya avtonomnogo podvodnogo apparata // Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal «Nauka i mir» ISSN 2308-4804. Volgograd, 2014. – №2(6), Tom 1. – s. 161–164.
5. O parametricheskih sootnosheniyah gidrodinamiki i ustojchivosti dvizheniya avtonomnogo podvodnogo robota / Kiselev L.V., Medvedev A.V. // Podvodnye issledovaniya i robototekhnika. – 2013. - № 1(15). - 17-22 s.
6. Gidrodinamicheskij raschet samohodnyh podvodnyh apparatov / Slizhevskij N.B., Korol' Yu.M., Sokolik M.G. // Uchebnoe posobie. – Nikolaev: UGMTU, 2000. - 93 s.