

УДК 629.58

УПРАВЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЕМ КРЕНА НА ТРЕБУЕМЫЙ УГОЛ ВПЛОТЬ ДО ПОЛОЖЕНИЯ «ОВЕРКИЛЬ» АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Л.А. Мартынова

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
Россия, 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая посадская, 30
E-mail: martynowa999@bk.ru

И.В. Пашкевич

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
Россия, 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая посадская, 30
E-mail: iv@bk.ru

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, крен корпуса, устойчивое состояние, силы и моменты.

Аннотация: Рассмотрена задача создания управляемого крена автономного необитаемого подводного аппарата с дорогостоящим оборудованием на борту, предназначенным для поиска объектов на морском дне и в придонном слое. Для исключения размещения аналогичного поискового оборудования в верхней части корпуса НПА предложено управлять изменением крена аппарата с тем, чтобы исследовательское оборудование оказалось направленным на обследуемую поверхность препятствия или льда. Проанализированы силы и моменты, обеспечивающие крен аппарата и устойчивое его положение в состоянии с креном путем использования дополнительного груза. Приведены математические зависимости для определения массы и положения груза, позволяющие сохранять аппарату устойчивое состояние в условиях крена. Приведены результаты численных экспериментов, направленные на оценку возможности нахождения аппарата с креном в устойчивом состоянии. Получены зависимости положения и массы дополнительного груза от крена аппарата.

1. Введение

Современные необитаемые подводные аппараты (НПА) оснащаются многообразными средствами мониторинга окружающей среды [1, 2] и, прежде всего, донного пространства: гидроакустическим лагом, гидролокатором бокового обзора, многолучевым эхолотом, профилографом, цветными черно-белыми видеокамеры и т.п. Однако существует ряд задач, связанных с обследованием верхней полусферы над НПА: анализ рельефа подледного слоя, поиск полыньи для проведения сеанса связи и обсервации, оценка толщины льда и возможность его пробития корпусом НПА, проведение подледного сеанса связи путем прикрепления специальной антенны к нижней поверхности льда, оценка скорости движения льда, оценка волнения моря для безопасного всплытия, обнаружения судов в приповерхностном слое в зоне интенсивного судоходства. Ряд задач связан с обследованием вертикальных поверхностей препятствий, шхер, прибрежных и портовых зон, для чего требуется

размещение поискового оборудования под углом 90° относительно корпуса НПА. Оборудование НПА с подкильной зоной обзора не позволяет решать такие задачи из-за недостаточно широкого сектора обзора – значительно меньшего 180° и затенения корпусом. Для этих целей создаются или специализированные НПА, или НПА общего назначения оснащаются комплектом оборудования с требуемой зоной обзора, или дополнительный комплект оборудования размещается в верхней части корпуса НПА.

В связи с этим в целях исключения дублирования оборудования, снижения массы НПА и экономии электроэнергии предложено применять один комплект аппаратуры, и по мере необходимости создавать крен на требуемый угол вплоть до положения «оверкиль» и удерживать корпус НПА в устойчивом состоянии. Подобные задачи ранее рассматривались лишь с точки зрения принятия мер для препятствия перевороту судна или обитаемого подводного объекта.

2. Постановка задачи

Пусть НПА находится в устойчивом состоянии килем вниз. Состояние НПА характеризуется положением центра величины (ЦВ), совпадающим с серединой объема НПА и не меняющимся при нахождении НПА под водой, и положением центра тяжести (ЦТ) НПА. В устойчивом состоянии положения ЦВ и ЦТ находятся на одной вертикали.

Предполагаем, что корпус НПА представляет собой тело вращения относительно продольной оси, в связи с чем – симметричен относительно продольной оси. В связи с этим ЦТ корпуса расположен в центре НПА на пересечении диаметральных осей, и при возникновении крена его положение не меняется.

Необходимо определить условия сохранения устойчивого состояния корпуса НПА с заданным креном.

3. Силы и моменты, приводящие к изменению крена

Введем систему координат с центром в точке положения центре величины (ЦВ). Обозначим горизонтальную ось координат Ox , вертикальную – Oy .

На НПА действуют: в диаметральной плоскости сила Архимеда, приложенная в ЦВ, и сила тяжести, приложенная в точке ЦТ, расположенной ниже ЦВ.

Устойчивое состояние корпуса НПА сохраняется при положении силы Архимеда F_A и равнодействующей силы тяжести Fg на одной вертикальной оси, проходящей через ЦВ (рис. 1 слева).

Для определения условий нахождения НПА с креном в состоянии равновесия представим массу НПА в виде суммы массы корпуса, которую будем считать в диаметральной плоскости симметричной, и массы оборудования, приборов, механизмов (далее – приборов), которые поворачиваются вместе с корпусом при возникновении крена. Тогда сила тяжести НПА равна равнодействующей силы тяжести корпуса НПА и силы тяжести приборов. Точкой приложения силы тяжести корпуса НПА является его середина (пересечение осевых диаметральных линий корпуса), а точкой приложения силы тяжести приборной массы является точка, отстоящая от ЦТ корпуса НПА на некотором расстоянии, пропорциональном радиусу R корпуса НПА.

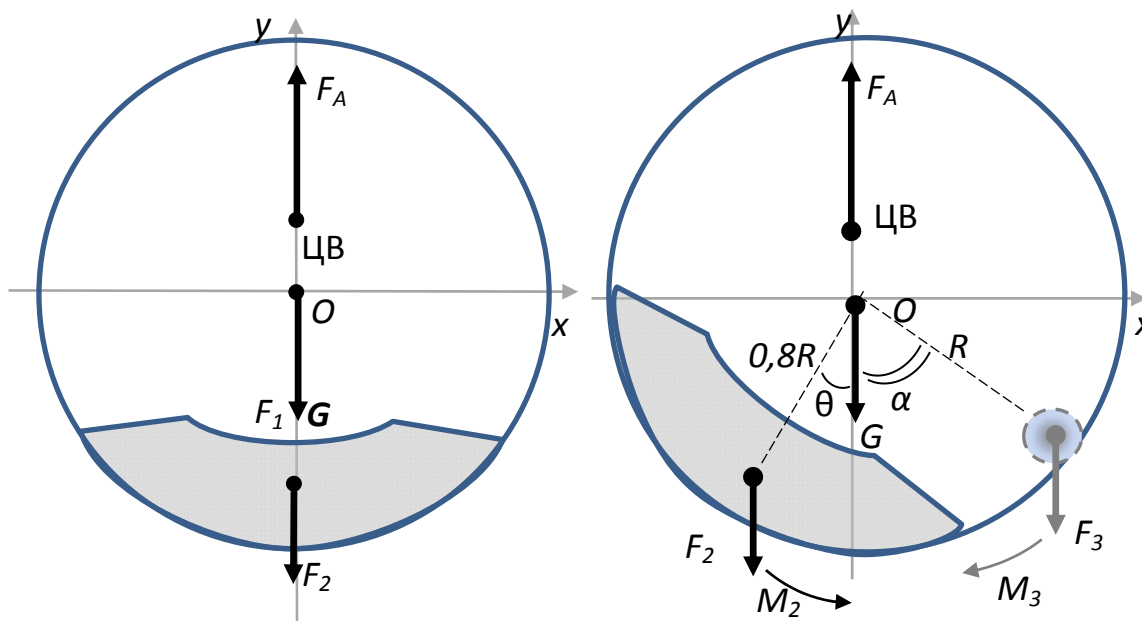


Рис.1. Исходное положение сил, действующих на НПА в устойчивом состоянии (слева) и смещение точки приложения силы тяжести при возникновении крена (справа).

При положении корпуса НПА с креном θ центр тяжести приборов смещается в сторону, противоположную направлению созданного крена (рис. 1 справа), в результате чего возникает крутящий момент M_2 , стремящийся вернуть корпус НПА в исходное положение. Для обеспечения равновесия корпуса с креном необходимо в противовес возникшему моменту M_2 создать момент M_3 с противоположной стороны относительно ЦВ и с противоположным знаком. Для этого необходимо определенным образом расположить груз определенной массы. Положение груза будем считать прижатым к корпусу, то есть расстояние от него до ЦВ равно R , а угол, на который необходимо будет поднять груз, обозначим α .

Положение груза должно быть таким, чтобы равнодействующая сил тяжести приборной массы и массы груза находилась на осевой вертикали, совпадающей с положением ЦВ и ЦТ корпуса НПА.

Определим условия создания устойчивого положения корпуса НПА. Обозначим через F_2 силу тяжести оборудования НПА, через F_3 – силу тяжести груза. Пусть НПА должен находиться в устойчивом состоянии с заданным креном θ .

Поскольку положение центра тяжести корпуса НПА не меняется, то в условие равновесия включаем только моменты, создаваемые приборной массой и массой груза. Тогда для определения массы и угла отклонения груза сформируем систему уравнений относительно моментов, «вращающих» корпус НПА относительно ЦВ:

$F_{3x} \cdot 1,0 \cdot R \cdot \sin\alpha = F_{2x} \cdot N \cdot R \cdot \sin\theta$, где F_{2x} , F_{3x} – проекции сил тяжести на горизонтальную ось x , N – число, характеризующее отстояние центра тяжести приборов от ЦТ корпуса НПА (в пропорции от R).

Отсюда получаем условие для угла α отклонения груза от вертикальной оси для обеспечения нахождения НПА с креном в положении равновесия:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{M_{2x}}{M_{3x}} N \sin\theta\right).$$

Из приведенного выражения следует, что смещение груза вдоль оси Ox пропорционально расстоянию от центра НПА и отношению масс груза и приборов: чем меньше масса груза, тем больше должна быть проекция расстояния до груза на ось Ox .

Из-за ограничения радиуса размерами корпуса НПА возникает ограничение по минимально допустимой массе груза, при которой возможно обеспечение устойчивого состояния НПА с креном.

Для оценки массы груза, обеспечивающего устойчивое состояние НПА в зависимости от угла крена, проведен численный эксперимент, в котором рассмотрен крен НПА от 0 до 80° через 5° и изменение массы груза от $0,2M$ до $1,0M$, где M – масса приборной части НПА.

Результаты расчетов приведены на рис. 2: по горизонтальной оси отложено значение угла крена θ в градусах, по вертикальной – значение угла α отклонения груза от вертикальной оси Oy .

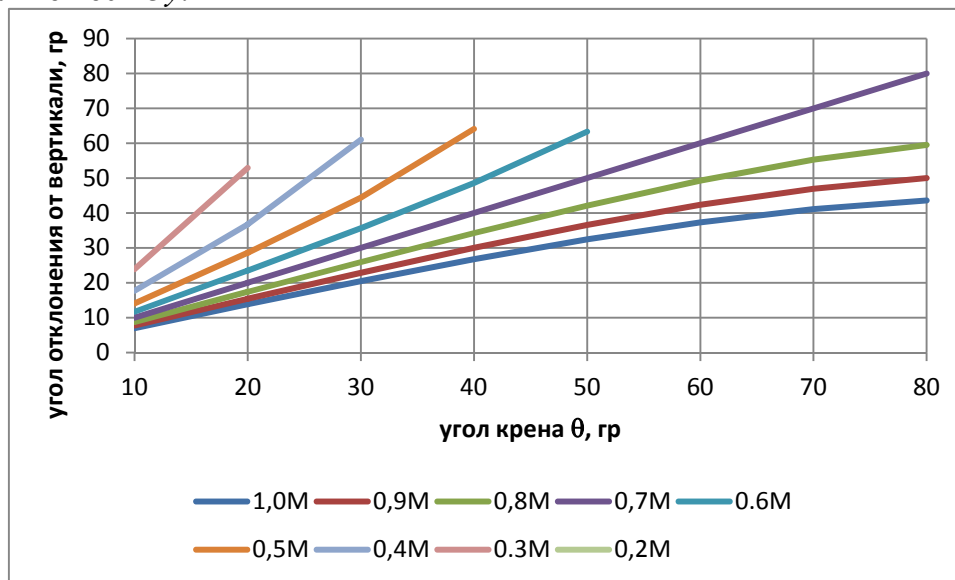


Рис. 2. Зависимость угла положения груза от угла крена НПА и массы груза.

На рис. 2 изображена серия кривых для различных масс груза, выраженных пропорцией через массу M приборов НПА. Из результатов, приведенных на рис. 2 видно, что при размещении груза той же массы, что и приборная масса, вблизи корпуса на удалении R от ЦВ угол α отклонения груза от вертикали меньше угла крена θ : при $\theta=10^\circ$ отклонение $\alpha=7^\circ$, при $\theta=20^\circ$ отклонение $\alpha=13^\circ$ и т.д. Аналогичная тенденция наблюдается и при массе груза, меньшей чем масса приборов: и при массе $0,7$ от массы приборов M угол отклонения груза α от вертикали совпадает с углом крена θ . При этом угол α достиг своего предела в 90° при крене $\theta=50^\circ$, и при дальнейшем снижении массы груза из-за ограничений по углу отклонения теряется возможность удержания НПА в устойчивом состоянии: при массе груза $0,6M$ равновесие обеспечивается только для крена $\theta=50^\circ$, при массе груза $0,5M$ равновесие возможно только для крена 40° , при $0,4 M$ – для крена 30° , при массе груза $0,3 M$ – для крена 20° , и, наконец, для массы груза $0,2 M$ – только для крена в 10° возможно обеспечение устойчивого состояния НПА.

3. Способы изменения силы и момента для управляемого изменения крена

Для создания момента, компенсирующего «возвращающий» момент при возникновении крена, можно использовать следующие способы:

- перемещение груза, изначально находящегося на борту НПА, поперек корпуса НПА; груз можно перемещать: равномерно, с ускорением, с использованием

импульса [3]; при перемещении с ускорением возникает инерция перемещения груза, и, как следствие, кинетическая энергия, создающая по мере увеличения крена корпуса НПА ускорение;

- закачивание воды в специально оборудованные на НПА с каждого борта цистерны – по принципу глайдера, только не в продольной, а в поперечной плоскости [4];
- перемещение с борта на борт специального балласта, в роли которого может выступать аккумуляторная батарея самого аппарата [5];
- использование специально размещенных на борту НПА эластичных емкостей и перекачка рабочей жидкости между внутренней и внешней (по отношению к прочному корпусу) емкостями с использованием насоса или поршня с линейным приводом;
- маневрирование НПА по курсу, «побочным» эффектом которого является возникновение крена; для дальнейшего увеличения крена возможны варианты формирования опрокидывающего момента, в том числе – с использованием эффекта параметрического резонанса [6].

4. Заключение

Для обследования автономным необитаемым подводным аппаратом состояния льда, поиска полыньи, обследования препятствий – требуется дорогостоящее оборудование, находящееся традиционно в нижней части корпуса НПА. Для исключения дублирования оборудования, связанного с его размещением в верхней части корпуса НПА, предложено управлять изменением крена аппарата с тем, чтобы исследовательское оборудование оказалось направленным на обследуемую поверхность препятствия или льда. Проанализированы силы и моменты, обеспечивающие крен аппарата и устойчивое его положение в состоянии с креном. Приведены математические зависимости для определения массы и положения груза, позволяющие сохранять аппарату устойчивое стояние в условиях крена. Приведены результаты численных экспериментов, направленные на оценку возможности нахождения аппарата с креном в устойчивом состоянии. Получены зависимости положения и массы дополнительного груза от крена аппарата.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-29-00803.

Список литературы

1. Мартынова Л.А., Розенгауз М.Б. Решение задачи подводного наблюдения в условиях применения интеллектуальных помех // Информационно-управляющие системы. 2018. № 1 (92). С. 31-41. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2018.1.31.
2. Мартынова Л.А., Розенгауз М.Б. Определение эффективного поведения группы АНПА в сетевидной системе освещения подводной обстановки // Информационно-управляющие системы. 2017. № 3 (88). С. 47-57. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2017.3.47.
3. Черноушко Ф.Л., Болотник Н.Н. Динамика мобильных систем с изменяющейся конфигурацией. М. Физматгиз. 2022. 464 с.
4. Кожемякин И.В., Рождественский К.В., Рыжов В.А., Смольников А.В. Разработка автономных необитаемых подводных глайдеров // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. С. 31-39.
5. <https://dfnc.ru/predpriyatiya/avtonomnye-podvodnye-apparaty-s-gidrodinamicheskimi-printsipami-dvizheniya/> (дата обращения 07.12.2023).
6. Ершов А.А., Теренчук А.В. Практический способ определения параметрического резонанса по бортовой качке судна // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2015. № 5 (33). С. 18-25.