

УДК 62-503.55

Исследование взаимовлияния контуров управления автономного необитаемого подводного аппарата «Император» с учетом особенностей организации его движительно-рулевого комплекса

*Гладкова О.И., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Подводные роботы и аппараты»*

*Научный руководитель: Вельтицев В.В., д.т.н
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
sm42@sm.bmstu.ru*

Одним из наиболее приоритетных направлений развития подводной техники является создание автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА). Это обусловлено тем, что многие военные и гражданские задачи (поиск, обнаружение, идентификация и уничтожение объектов, гидроакустическая разведка, сбор различной информации о состоянии морской среды, обследование корпусов судов и ряд других) могут быть эффективно решены ими без риска для оператора АНПА. При проектировании таких аппаратов перед разработчиком стоит проблема выбора оптимальной конструкции, обеспечивающей как минимальное энергопотребление, так и хорошую маневренность.

АНПА «Император», создаваемый кафедрой «Подводные роботы и аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана, имеет торпедообразную форму, модульный принцип построения и четыре движителя: гребные винты правого и левого вращения в насадках, расположенные по Х-образной схеме в кормовой части аппарата (рис. 1).

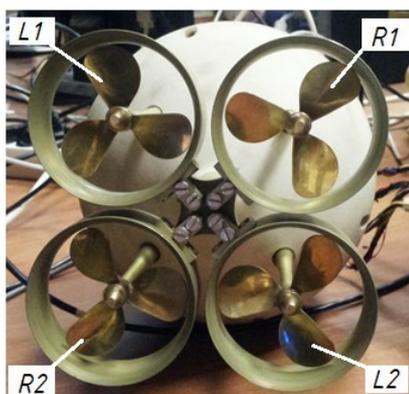


Рис. 1. Схема компоновки движителей АНПА «Император»:

L1, L2 – гребные винты левого вращения, R1, R2 – гребные винты правого вращения

Такая схема построения движительно-рулевого комплекса (ДРК) отличается от общепринятых. Традиционно ДРК автономных необитаемых подводных аппаратов включают в свой состав один или несколько гребных винтов и подруливающие устройства [1]. Аппарат, имеющий один винтомоторный агрегат (ВМА), может осуществлять лишь маршевое движение. Управление угловым положением обеспечивается дополнительными устройствами: например, в аппарате «Gavia» (производства компании Teledyne Gavia, США [2]) имеются независимые приводы перекладки рулей, в аппарате «Bluefin» (компании Bluefin Robotics, США [3]) – поворотная направляющая насадка. При этом энергопотребление минимально, но высокая маневренность достигается лишь на высоких скоростях движения АНПА [2]. Использование большего количества ВМА увеличивает как энергопотребление аппарата, так и его маневренность. Например, в основе ДРК АНПА «Клавесин-1Р», созданного в ИПМТ ДВО РАН, лежат 4 гребных винта, расположенные крестообразно, под углами к продольной оси аппарата, и стабилизаторы. Такая схема является избыточной, каждый из движителей участвует в управлении двумя контурами: маршевым движением и дифферентом или маршевым движением и курсом. При этом контура управления являются независимыми.

АНПА «Император» также имеет четыре ВМА, но, в отличие от аппарата «Клавесин-1Р», винты располагаются по Х-образной схеме и имеют разное направление вращения (см. рис. 1). При такой компоновке ДРК количество исполнительных систем равно числу управляемых координат: маршевое движение, углы курса, дифферента и крена. Существенным отличием данной схемы построения движительно-рулевого комплекса является управление углом крена. Оно формируется не гидродинамическими

силами (как в каналах марша, углов курса и дифферента), а достигается за счёт неуравновешенного реактивного момента от всех четырех приводов движителей с винтами разных направлений вращения.

В рассматриваемой системе каждый движитель участвует в управлении всеми четырьмя каналами. Это существенно влияет на сепаратность их работы и, как следствие, вносит дополнительные требования к построению системы управления (СУ) движением и угловой ориентацией аппарата. Целью данной работы является исследование взаимовлияния контуров марша, курса, дифферента и крена АНПА «Император» с учетом особенностей организации его ДРК. Для достижения поставленной цели были разработаны математические модели винтомоторных агрегатов аппарата, движительно-рулевого комплекса в целом и произведено моделирование в пакете Simulink программы MATLAB.

Полная структурная схема движительного комплекса получается путём комбинирования отдельных структурных схем ВМА с гребными винтами правого и левого вращения. После прохождения через блок формирования сигналов управляющие воздействия по каналам марша, курса, дифферента и крена преобразуются в управляющие напряжения, подаваемые на двигатели винтомоторов (рис. 2).

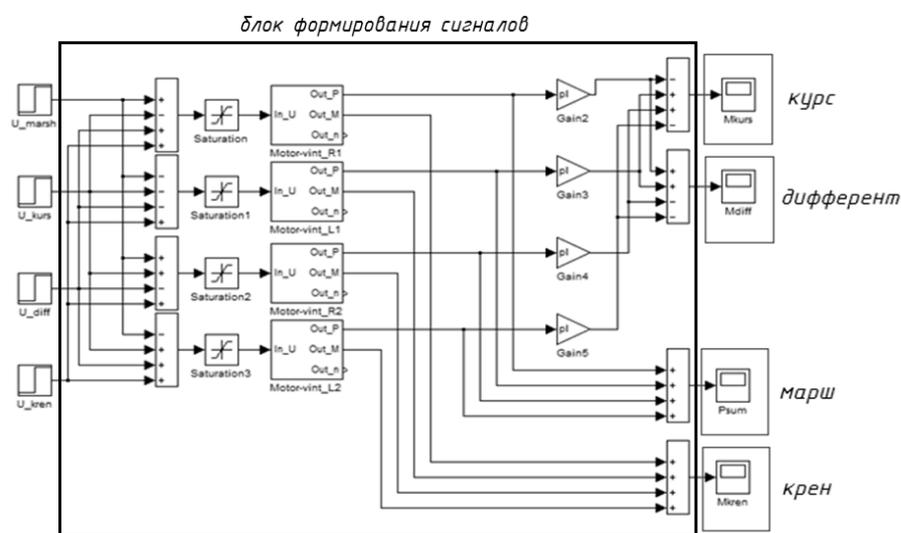


Рис. 2. Структурная схема движительно-рулевого комплекса

В схеме на рис. 2 блоки Motor-vint_R1, R2 соответствуют схеме ВМА с винтом правого вращения; Motor-vint_L1, L2 соответствуют схеме ВМА с винтом левого вращения; расстояние между движителями 2·р1.

Для проверки адекватности составленной модели работы системы использовалось последовательное включение каналов. На рис. 3 изображены переходные процессы в движительном комплексе при поочередном подключении контуров:

- начальный момент: формирование команды на создание продольной тяги;
- 0,5 секунда: формирование дополнительной релейной команды на создание момента по углу курса;
- 1 секунда: формирование дополнительной релейной команды на создание момента по углу дифферента;
- 1,5 секунды: формирование дополнительной релейной команды на создание момента по углу крена.

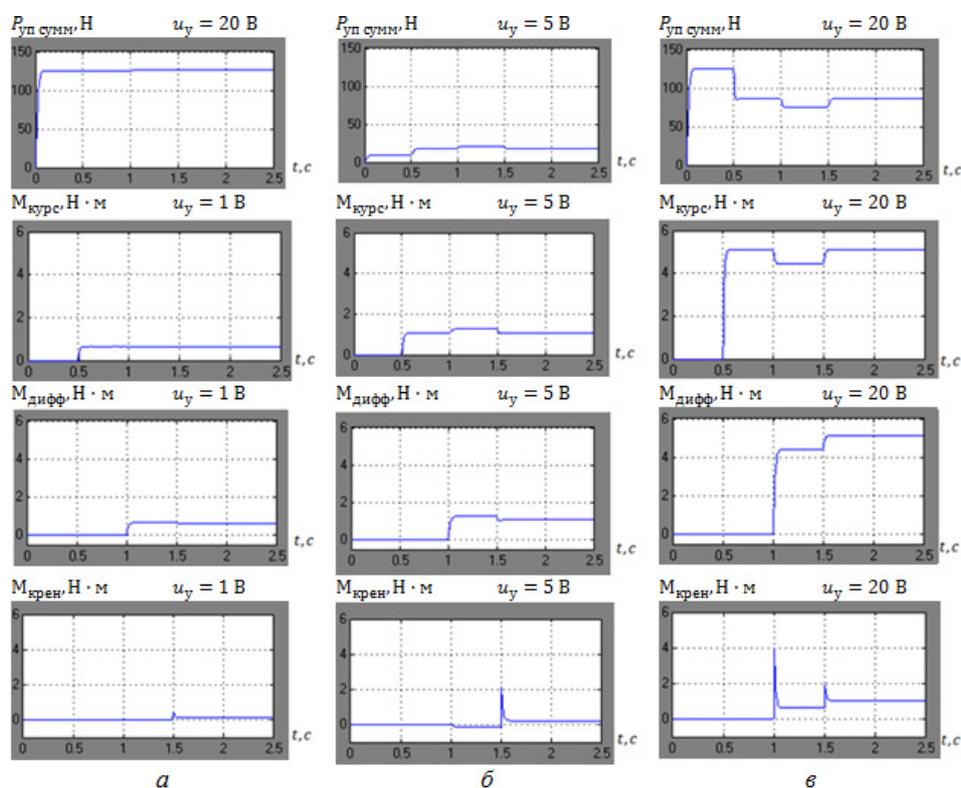


Рис. 3. Переходные процессы в ДРК АНПА: *а* – управляющий сигнал по маршевому движению значительно выше, чем по курсу, дифференту и крену; *б* – управляющие сигналы по маршу, курсу, дифференту и крену соизмеримы; *в* – управляющие сигналы по всем контурам соизмеримы, но не обеспечиваются энергетически

Из рис. 3 видно, что при обеспечении допустимых энергетических характеристик и управляющем сигнале u_y [В] в одном из каналов существенно большем, чем в остальных, их взаимовлияние практически отсутствует (группа переходных процессов *а*). При соизмеримых уровнях управляющих сигналов каждого контура и нахождении суммарных

сигналов двигателей в допустимых пределах проявляется существенное взаимовлияние каналов управления (группа графиков б). При одновременном поступлении на движительный комплекс соизмеримых управляющих сигналов, которые не могут быть энергетически обеспечены (в данном случае предельное напряжение управляющего сигнала составляет 24 В), наблюдается ярко выраженное влияние одного канала управления на другие (группа графиков в).

Рассмотрим все характерные нелинейности, учитываемые в математической модели ВМА (рис. 4): нелинейность двигателя типа «насыщение», нелинейности в цепях упора и момента сопротивления гребного винта.

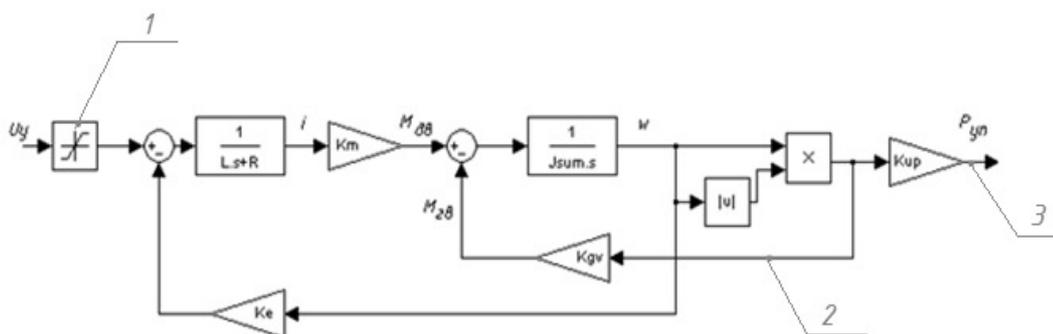


Рис. 4. Нелинейности винтомоторных агрегатов в системе ДРК АНПА:

1 – нелинейность типа «насыщение», 2 – нелинейность в цепи момента сопротивления гребного винта, 3 – нелинейность в цепи упора

Нелинейность типа «насыщение» оказывает отрицательное влияние на систему при подаче суммарных управляющих сигналов, превышающих предельно допустимый уровень напряжения двигателей (см. рис. 3 в). До достижения определенного значения характеристика звена 1 рис. 4 представляет собой линейную зависимость выходного сигнала от входного. Нелинейности в цепях упоров $P_{уп}$ и моментов гребных винтов $M_{гв}$ определяются следующими формулами:

$$P_{уп} = K_{уп} \omega |\omega|, \quad (1)$$

$$M_{гв} = K_{гв} \omega |\omega|, \quad (2)$$

где $K_{уп}$, $K_{гв}$ – гидродинамические коэффициенты упора и момента гребного винта, соответственно, ω – скорость вращения гребного винта.

В ходе работы было исследовано влияние всех существенных нелинейностей на свойства системы. Переходные процессы при отсутствии влияния каждой из них приведены на рис. 5 (управляющие сигналы подаются в соответствии с последовательностью, приведенной выше).

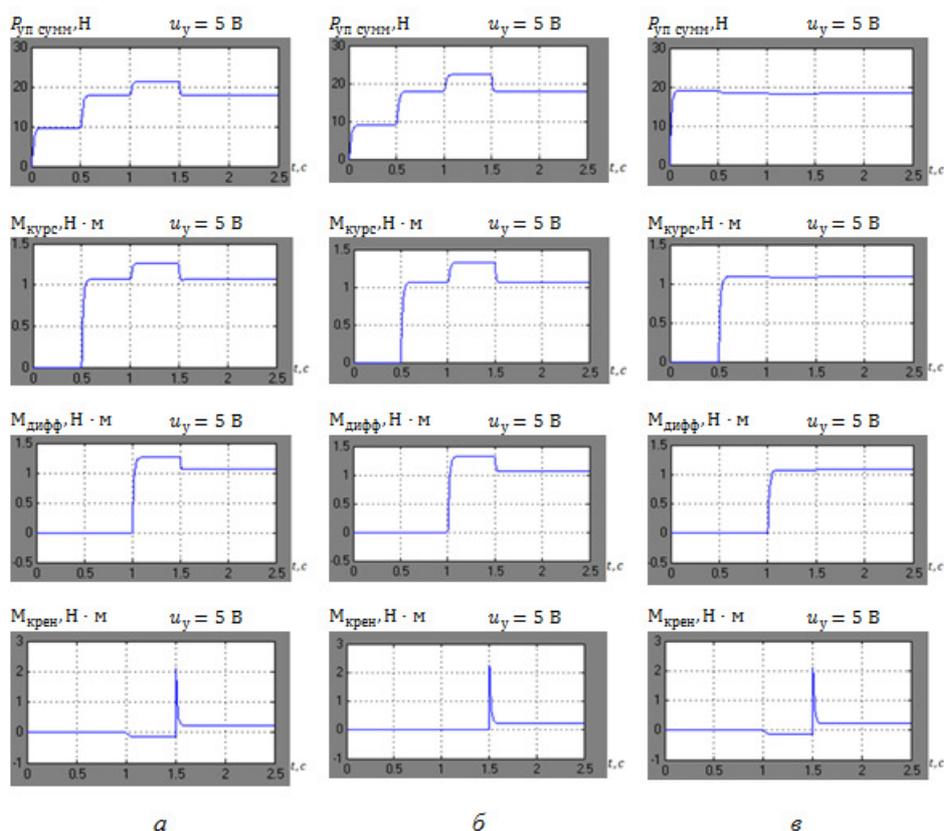


Рис. 5. Переходные процессы в ДРК АНПА: *а* – при отсутствии влияния нелинейности типа «насыщение» и наличии нелинейностей в цепях упоров и моментов сопротивления гребных винтов; *б* – при отсутствии нелинейностей в цепях моментов сопротивления гребных винтов; *в* – при отсутствии нелинейностей в цепях упоров

По результатам анализа влияния нелинейностей на свойства системы можно сделать следующие выводы:

- отсутствие нелинейности типа «насыщение» не приводит к уменьшению взаимовлияния каналов, характеристики системы улучшаются незначительно (рис. 5 *а*). Однако работа в области «насыщения» при отсутствии нелинейностей в цепях упора и момента сопротивления гребного винта приводит к взаимовлиянию всех каналов движения и угловой ориентации;

- снижение влияния нелинейных зависимостей моментов сопротивлений от скоростей вращения гребных винтов не приводит к значительному уменьшению взаимовлияния каналов, характеристики системы для каналов марша, курса и дифферента не улучшаются, однако канал крена имеет меньшую зависимость от воздействий других каналов (рис. 5 *б*);

- исключение нелинейных составляющих в цепях упоров приводит к значительному уменьшению взаимовлияния каналов (рис. 5 *в*).

Исходя из вышеперечисленных выводов, сформулированы требования к системе управления и предложены методы снижения взаимовлияния каналов.

Для работы в линейной зоне характеристики двигателя (вне области «насыщения») в СУ необходимо производить расчеты суммарных управляющих сигналов, поступающих на двигателя ВМА. По результатам этих вычислений должна производиться коррекция, согласно требованиям:

- суммарный сигнал управления (напряжение) должен быть в пределах значений, указанных в паспорте электродвигателя;
- должна обеспечиваться стабильность угловых положений АНПА.

Для коррекции влияния нелинейностей характеристик гребного винта предлагается выбирать такое входное воздействие, которое будет приводить зависимости (1) и (2) выходных сигналов $P_{уп}$ и $M_{ГВ}$ к линейному виду.

Так как для функции $f(x)$ и обратной ей функции $f^{-1}(x)$ выполняется соотношение $f(f^{-1}(x)) = x$, выберем такую функцию $P^{-1}(u_y)$, при подаче на вход которой управляющего сигнала u_y , будет получена линейная зависимость:

$$P(P^{-1}(u_y)) = K_u \cdot u_y. \quad (3)$$

Согласно (1) – (3) управляющий сигнал должен иметь вид:

$$P^{-1}(u_y) = K_u \sqrt{|u_y|} \cdot \text{sign}(u_y), \quad (4)$$

где коэффициент K_u выбран в процессе моделирования (рис. 6).

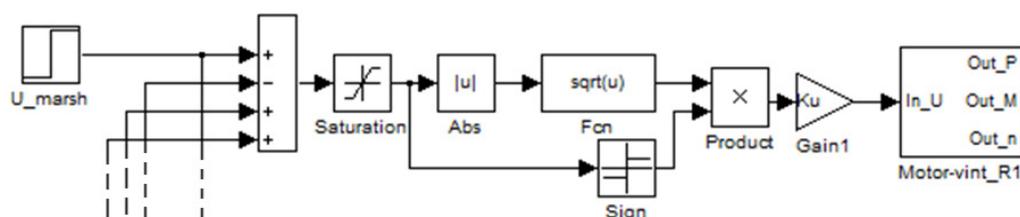


Рис. 6. Экранное представление математической модели канала упора АНПА с коррекцией управляющего сигнала

Переходные процессы в ДРК АНПА, изображенные на рис. 7 б соответствуют математической модели каналов упора, моментов по углам курса, крена и дифферента АНПА при компенсации нелинейностей в цепях упоров и моментов сопротивления гребных винтов и соизмеримых управляющих сигналах по маршру, курсу, дифференту и крену (по 5 В на каждый канал).

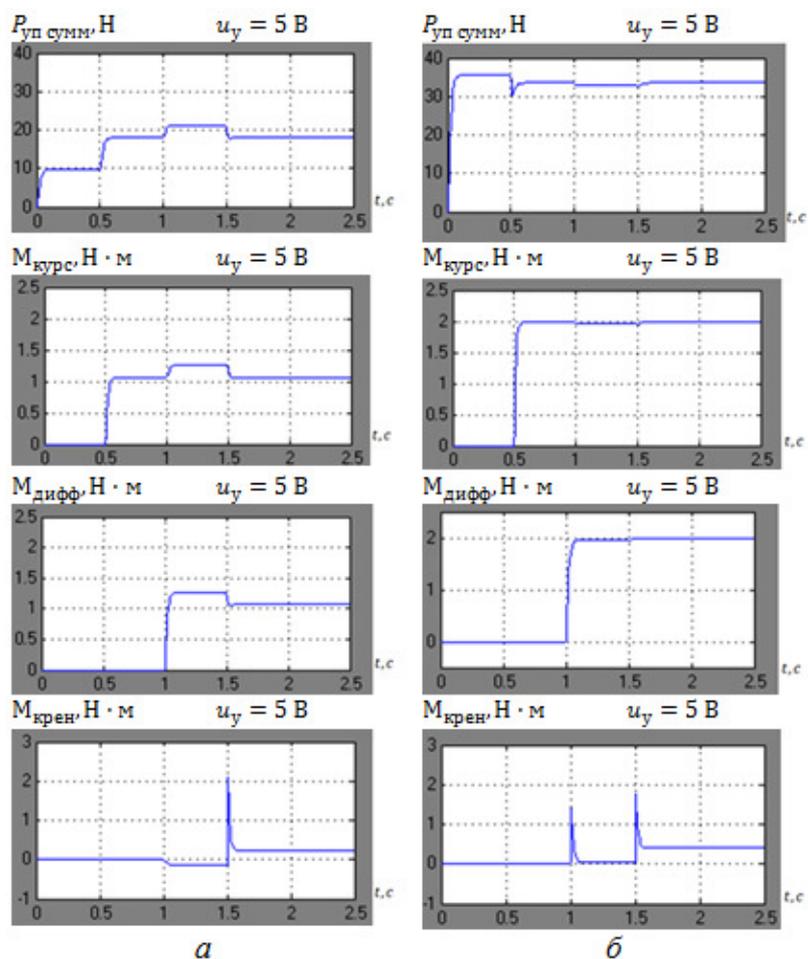


Рис. 7. Переходные процессы в ДРК АНПА: *а* – при наличии нелинейностей без коррекции; *б* – при наличии коррекции управляющего сигнала

Таким образом, в результате работы было показано, что в связи с особенностями организации движительно-рулевого комплекса АНПА «Император» имеется существенное взаимовлияние контуров управления движением и угловой ориентацией аппарата. В наибольшей степени оно проявляется при наличии нелинейностей в цепях упоров и моментов сопротивлений гребных винтов (в особенности от нелинейностей в цепях упоров). Для уменьшения указанного отрицательного эффекта были сформулированы определенные требования к системе управления. СУ аппарата должна выполнять функцию расчета напряжений, поступающих на каждый из четырех двигателей ВМА, ограничивать уровень суммарных управляющих сигналов, поддерживать заданную угловую ориентацию АНПА. Кроме того, для уменьшения влияния нелинейностей в каналах упоров и моментов сопротивления гребных винтов предлагается программно реализовывать звено вида (4). Результаты аналитических расчетов и моделирования системы подтверждают необходимость введения в систему управления вышеперечисленных корректирующих элементов.

Список литературы

1. Гофман А.Д. Двигательно-рулевой комплекс и маневрирование судна: справочник. Ленинград: Судостроение, 1988. 360 с.
2. Цариченко С.С. АНПА GAVIA – подводный исследователь. Режим доступа: <http://www.tetis-pro.ru/docs/ANPA%20GAVIA.pdf> (дата обращения: 20.10.13).
3. Bluefin Robotics. Technology. Propulsion. Режим доступа: <http://www.bluefinrobotics.com/technology/propulsion/> (дата обращения: 20.10.13).