

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПОДВОДНОГО АППАРАТА В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ. СИНТЕЗ КОНТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГЛУБИНОЙ ПОГРУЖЕНИЯ ПОДВОДНОГО АППАРАТА

С.О. Гостилович

mmm333zzz@yandex.ru

SPIN-код: 8566-6499

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

На основе упрощенной математической модели и синтезированного ранее контура управления углом дифферента построен контур управления глубиной погружения подводного аппарата. Показан процесс возникновения в системе автоколебаний при синтезировании контура управления глубиной погружения подводного аппарата по линеаризованной модели. С помощью методов гармонической линеаризации выявлены причины возникновения автоколебаний, и определено условие их отсутствия. Проанализировано влияние структуры контура дифферента и контура глубины погружения, а также влияние неразрывных нелинейностей системы на возникновение автоколебаний. Показана полезность последующей коррекции параметров системы методом имитационного моделирования. Приведены результаты моделирования полученной системы с учетом нелинейностей, возмущений и ненулевой остаточной плавучести при различных задающих воздействиях.

Ключевые слова

Подводный аппарат, математическая модель, дифферент, глубина погружения, движение в вертикальной плоскости, линеаризованная модель, обратные связи, гармоническая линеаризация, передаточная функция, автоколебания, остаточная плавучесть

Поступила в редакцию 17.09.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. В статье рассмотрен подводный аппарат (ПА) с корпусом удобообтекаемой формы, не имеющий крылообразных поверхностей с рулевыми механизмами. Двигательно-рулевой комплекс ПА состоит из подруливающих устройств и четырех основных винтомоторных агрегатов, расположенных в хвостовой части аппарата. Примером такого ПА служит автономный необитаемый подводный аппарат «Клавесин» (рис. 1).

Аппараты данного типа широко используются в гражданских и военных целях для решения поисковых, исследовательских, картографических и других задач.

Движение рассматриваемого ПА в вертикальной плоскости осуществляется путем изменения угла дифферента и движения по маршевому направлению. Отсутствие прямой связи между маршевой скоростью ПА и моментом от движителей, поворачивающим аппарат по дифференту, позволяет декомпозиро-

вать задачу построения системы управления (СУ) движением подводного аппарата в вертикальной плоскости на следующие элементы:

- контур управления дифферентом ПА;
- контур управления глубиной погружения ПА.

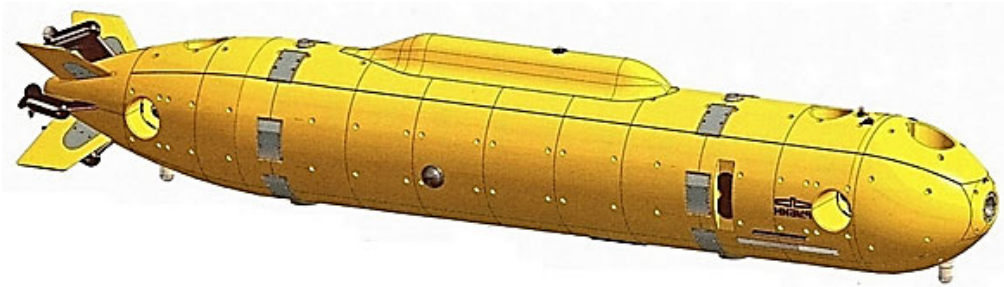


Рис. 1. Внешний вид автономного подводного аппарата «Клавесин»

Целью проводимых исследований является построение и исследование контура глубины погружения рассмотренного выше подводного аппарата, который основан на синтезированном ранее контуре управления дифферентом.

Используемая математическая модель ПА. При описании движения в жидкости удобообтекаемого тела можно использовать аналитические методы, основанные на применении скоростной системы координат [1–7]. Учитывая, что в аппаратах рассматриваемого типа отсутствует непосредственная связь между силовыми воздействиями движительно-рулевого комплекса (ДРК) и скорости продольного движения ПА, в исследовании будем использовать общие методы математического описания динамики ПА [8].

Рассмотрим кинематику движения ПА в вертикальной плоскости при условии малости угла крена и без учета угла курса. Основываясь на работе [8], выпишем соотношения, описывающие движения ПА по вертикальной координате (в дальнейшем контур управления движением ПА по вертикальной координате η будем называть контуром управления глубиной погружения ПА):

$$\begin{cases} \dot{\eta} = V \sin \vartheta; \\ \eta = \int \dot{\eta} dt, \end{cases}$$

где V — маршевая скорость ПА, которая считается постоянной; ϑ — угол дифферента, являющийся выходным сигналом из контура дифферента; η , $\dot{\eta}$ — значение вертикальной координаты оси $O_0\eta$ и ее производная соответственно.

Контур СУ глубиной погружения ПА будем строить путем охватывания контура дифферента главной обратной связью по координате вертикального положения и добавления коэффициента усиления K_3 . Также в систему требуется добавить ограничение диапазона задающего воздействия на контур дифферента ϑ^{\max} . С одной стороны, это ограничение необходимо, чтобы предотвратить переход углом дифферента отметки $\pm 90^\circ$, при котором возникает резкое

изменение угла курса и крена, которое скажется на СУ этими каналами. С другой стороны, данное ограничение предотвратит подачу на контур дифферента сигнала много большего $+90^\circ$ (много меньшего -90°), который может вызвать опрокидывание подводного аппарата. Чтобы обеспечить хороший запас на перерегулирование, выберем значение $\vartheta^{\max} = \pm 80^\circ$. Тогда контур движения ПА в вертикальной плоскости будет иметь вид, представленный на рис. 2.

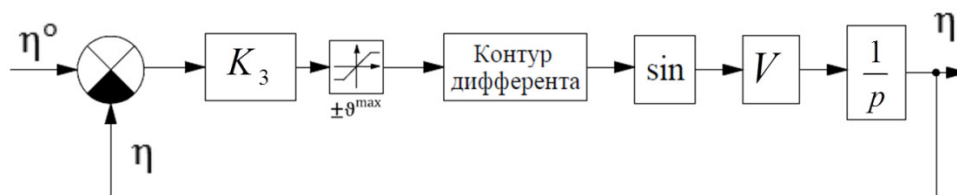


Рис. 2. Контур управления глубиной погружения ПА

В качестве контура дифферента будем использовать контур, основанный на упрощенной модели динамики ПА [8], который строился путем добавления обратных связей по угловой скорости и положению, введением коэффициента усиления и ПИ-регулятора [9]. Вид описанного контура дифферента представлен на рис. 3.

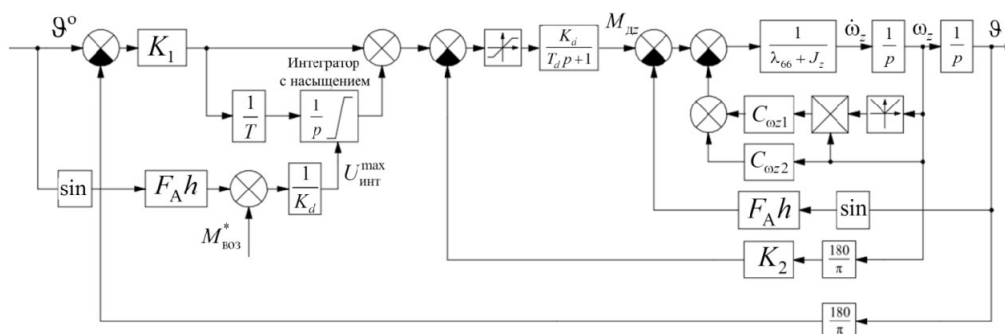


Рис. 3. Структурная схема контура дифферента

Синтез контура управления глубиной погружения ПА. Синтез контура будем проводить по линеаризованной модели системы, которая имеет вид, представленный на рис. 4.

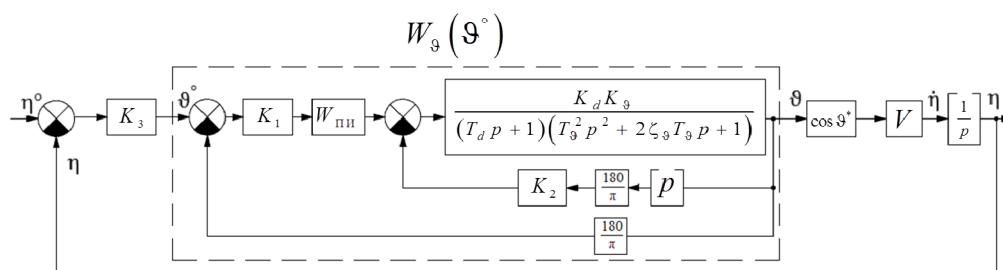


Рис. 4. Структурная схема линеаризованного контура глубины погружения ПА

Получение передаточной функции (ПФ) контура дифферента $W_9(\vartheta^\circ)$ описано в работе [9].

Синтез коэффициента K_3 . Учитывая вид логарифмических частотных характеристик (ЛЧХ) замкнутого контура дифферента (рис. 5), аппроксимируем контур дифферента аperiodическим звеном третьего порядка:

$$W_9(\vartheta^\circ) = \frac{\pi/180}{(T_{W_9} p + 1)^3},$$

где T_{W_9} — постоянная времени, значение которой можно определить с помощью ЛЧХ замкнутого контура дифферента (см. рис. 5).

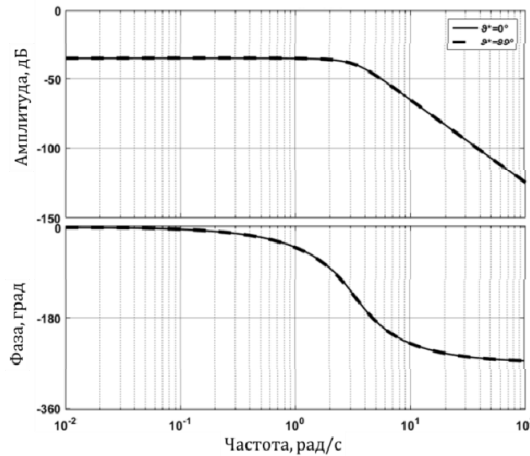


Рис. 5. ЛЧХ замкнутой системы контура дифферента

Тогда передаточная функция СУ глубиной погружения ПА имеет следующий вид:

$$W_{\eta} = \frac{K_3 \frac{\pi}{180} V \cos \vartheta^*}{p(T_{W_9} p + 1)^3}.$$

Синтез коэффициента K_3 будем проводить по методике, основанной на показателе колебательности M для ЛАЧХ вида 1-2-3-4 [10]:

$$K_3 \leq \frac{30 \cdot (M^2 + M \sqrt{M^2 - 1})}{\pi T_{W_9} V \cos \vartheta^*}.$$

Следует отметить, что наихудший с точки зрения устойчивости случай имеет место при наибольших значениях V и $\cos \vartheta^*$.

Учитывая вид ЛЧХ $W_9(\vartheta^\circ)$ (см. рис. 5), показатель колебательности M выберем равным 1,03, чтобы обеспечить перерегулирование менее 5%.

Введение в контур глубины погружения ПИИ-регулятора. Для устранения внешних возмущений введем в систему ПИИ регулятор, как показано на рис. 6.

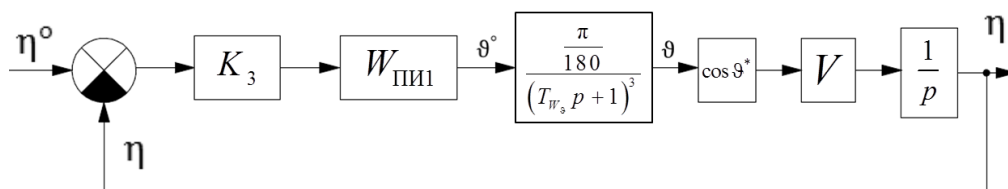


Рис. 6. Линеаризованный контур глубины погружения с ПИИ регулятором

Добавим в систему ПИИ-регулятор с насыщением в виде, представленном в работе [9], имеющий следующую передаточную функцию:

$$W_{\text{ПИИ}} = \frac{(T_1 p + 1)/T_1}{p},$$

где T_1 — параметр ПИИ-регулятора.

Параметр ПИИ-регулятора T_1 выберем методом имитационного моделирования, построив переходные процессы в контуре глубины погружения для различных T_1 . Предельное значение интегрирования $U_{\text{инт}}^{\text{max}}$ выберем из соображения компенсации внешних возмущений и ненулевой остаточной плавучести.

Моделирование синтезированного контура глубины погружения ПА. Построим переходные процессы в нелинейном контуре глубины погружения ПА для малого входного воздействия $\eta^\circ = 0,1$ м (рис. 7, а), что соответствует линеаризованной системе, и для $\eta^\circ = 1$ м (рис. 7, б), при котором возникает влияние нелинейностей системы.

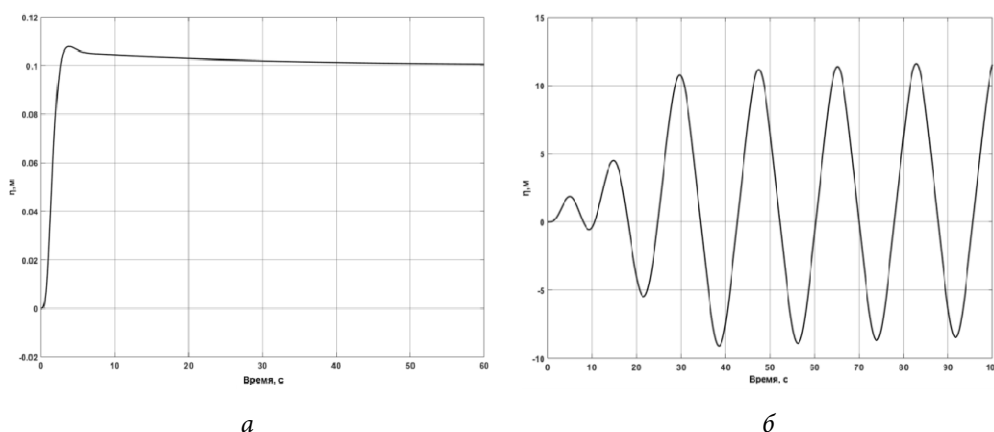


Рис. 7. Переходные процессы в СУ глубиной погружения ПА, синтезированной по линеаризованной модели подводного аппарата

Данные графики показывают, что при достаточно больших задающих воздействиях в системе возникают автоколебания.

Анализ возникающих автоколебаний. Основной причиной возникновения автоколебаний являются разрывные нелинейности. В рассматриваемом контуре управления глубиной погружения ПА встречается разрывная нелинейность «насыщение». Такая нелинейность встречается 2 раза: в модели движителей и специально введенная нелинейность перед контуром дифферента.

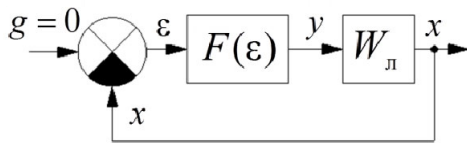


Рис. 8. Структурная схема системы для применения гармонической линеаризации

Для изучения причин возникновения автоколебаний воспользуемся методом гармонической линеаризации [10, 11], для применения которого необходимо разделить исследуемый контур на линейную $W_{л}$ и нелинейную $F(\varepsilon)$ части и преобразовать систему к виду, представленному на рис. 8.

Гармоническая линеаризация позволяет представить нелинейность в виде передаточной функции $W_{н}$:

$$F(\varepsilon) \approx W_{н} \cdot \varepsilon = \left(q(a) + q'(a) \frac{p}{\omega} \right) \varepsilon,$$

где $q(a)$, $q'(a)$ — коэффициенты разложения первых гармоник сигнала, выходящего из нелинейности, в ряд Фурье для \sin и \cos соответственно; a — амплитуда автоколебаний.

Для нелинейности насыщение имеем:

$$\begin{cases} q(a) = \frac{\pi}{2} \left(\arcsin \frac{U_{\max}}{a} + \frac{U_{\max}}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{U_{\max}}{a} \right)^2} \right); \\ q'(a) = 0, \end{cases}$$

где U_{\max} — граница насыщения.

Будем использовать частотный метод анализа автоколебаний, по которому необходимое условие возникновения автоколебаний имеет следующий вид:

$$W_{л}(j\omega) = Q(a);$$

$$Q(a) = \frac{-1}{W_{н}(a)},$$

где ω — циклическая частота.

Рассмотрим и проанализируем логарифмические характеристики $Q(a)$, построенные для рассматриваемой нелинейности, приведенные на рис. 9:

– логарифмическая амплитудная характеристика определена от нуля децибел до плюс бесконечности;

- логарифмическая амплитудная характеристика является монотонно убывающей функцией;
- логарифмическая фазовая характеристика постоянная и равна -180° .

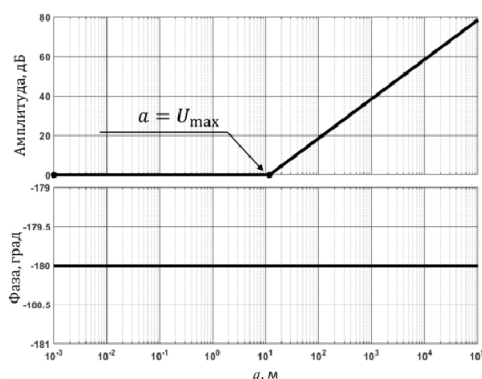


Рис. 9. Логарифмические амплитудные и фазовые характеристики $Q(a)$

Учитывая вышеизложенное, можно сказать, что необходимое условие возникновения автоколебаний будет выполняться, если ЛФЧХ линейной части системы W_l будет пересекать значение -180° при такой частоте ω , при которой ЛАЧХ линейной части системы W_l принимает неотрицательное значение.

Если рассматривать насыщение, специально введенное в систему перед контуром дифферента, то можно сказать, что линейная часть системы в таком случае будет являться линеаризованным контуром управления глубиной погружения ПА. Учитывая, что выше был проведен синтез такой системы, в процессе которого была обеспечена устойчивость системы, или, иными словами, ЛФЧХ линейной части пересекает значение -180° в точке, при которой ЛАЧХ линейной части меньше нуля, можно сказать, что необходимое условие возникновения автоколебаний выполняться не будет. Таким образом, эта нелинейность не является причиной возникновения автоколебаний.

Рассмотрим нелинейность «насыщение», которая входит в модель движителей. Для этого преобразуем контур управления глубиной погружения ПА к виду, при котором проводится гармоническая линеаризация (рис. 10) и построим ЛЧХ линейной части системы (рис. 11).

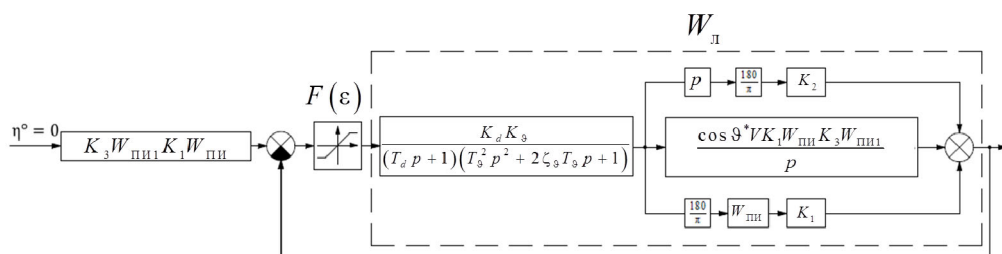


Рис. 10. Структурная схема контура управления глубиной погружения ПА для применения гармонической линеаризации

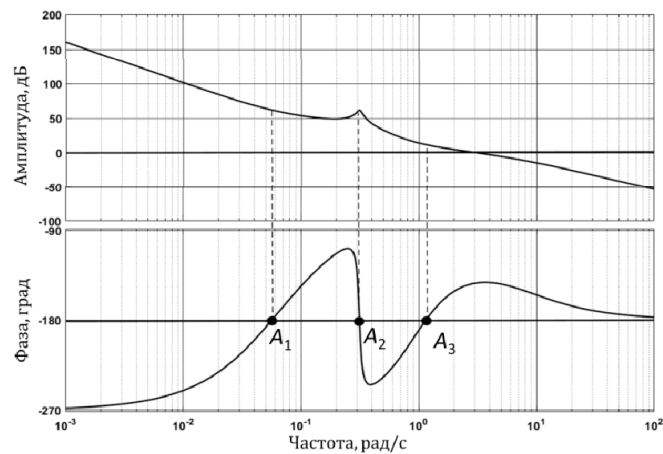
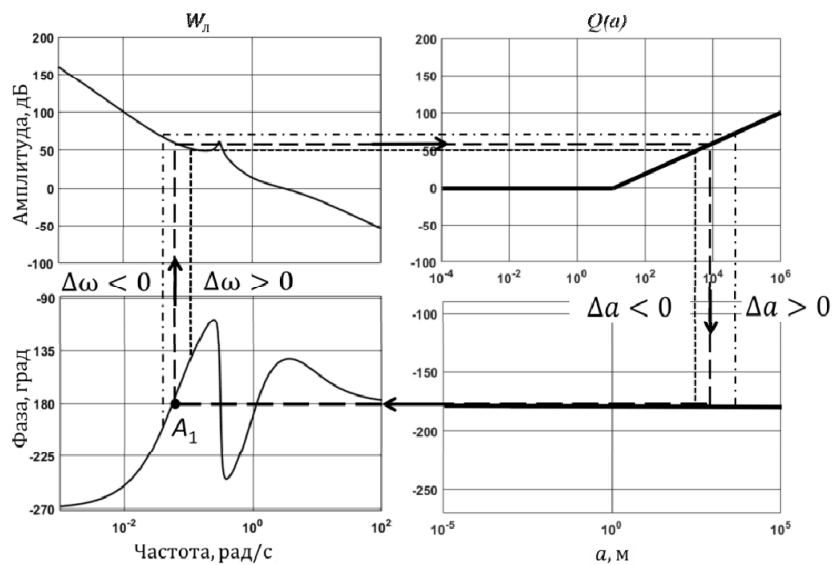


Рис. 11. ЛЧХ линейной части

Как видно на рис. 11, существуют три точки, в которых выполняется необходимое условие возникновения автоколебаний. Проведем анализ устойчивости колебаний, которые возникают в точках A_1 , A_2 и A_3 .

Рассмотрим точку A_1 (рис. 12).

Рис. 12. Анализ устойчивости автоколебаний для точки A_1

Как видно на рис. 12, если немного сместить частоту в большую сторону, то амплитуда колебаний уменьшается, а ЛФЧХ линейной части системы становится больше 180° , следовательно, колебания не стремятся к точке A_1 . Однако если немного сместить частоту в меньшую сторону, то амплитуда колебаний увеличится, а ЛФЧХ линейной части системы становится меньше 180° , следовательно, колебания также не стремятся к точке A_1 . Иными словами, в точке A_1 возникают

неустойчивые колебания, а это значит, что в системе не будут возникать автоколебания, соответствующие данной точке. В точке A_3 автоколебания возникать не будут по аналогичной причине.

Для анализа точки A_2 необходимо более детально изучить ЛАЧХ в окрестности данной точки (рис. 13).

Как видно на рис. 13, если немного сместить частоту в большую сторону, то амплитуда колебаний уменьшается, но ЛФЧХ линейной части системы становится меньше -180° , следовательно, колебания для данной ситуации будут стремиться к точке A_2 . С другой стороны, если немного сместить частоту в меньшую сторону, то амплитуда колебаний увеличится, но ЛФЧХ линейной части системы становится больше -180° , следовательно, колебания опять будут стремиться к точке A_2 . Иными словами, в точке A_2 возникают устойчивые колебания, или автоколебания.

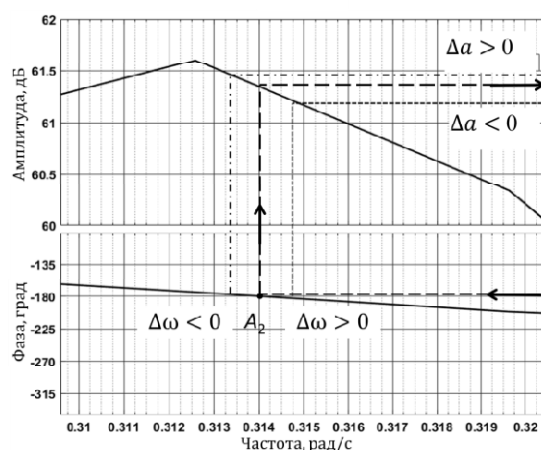


Рис. 13. Анализ устойчивости автоколебаний для точки A_2

После анализа всех точек, в которых выполняется необходимое условия возникновения автоколебаний, можно сформулировать необходимое и достаточное условие возникновения автоколебаний: если в точке пересечения ЛФЧХ линейной части системы значения -180° ЛАЧХ имеет отрицательный наклон, то для возникновения автоколебаний необходимо и достаточно, чтобы ЛФЧХ пересекало точку -180° сверху вниз (ЛФЧХ монотонно убывало в некоторой окрестности точки пересечения).

Для более детального анализа возникновения автоколебаний в контуре управления глубиной погружения ПА были построены ЛЧХ линейной части контура для различных конфигураций системы при различных коэффициентах K_3 :

- 1) без ПИ-регуляторов (рис. 14);
- 2) с одним ПИ-регулятором в контуре дифферента (рис. 15);
- 3) с двумя ПИ-регуляторами в контурах дифферента и управления глубиной погружения ПА (рис. 16).

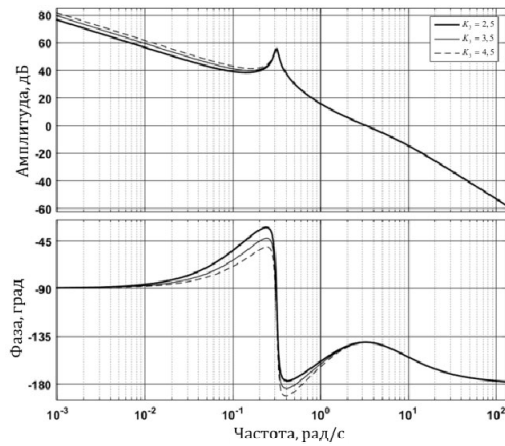


Рис. 14. ЛЧХ для системы без ПИ-регуляторов

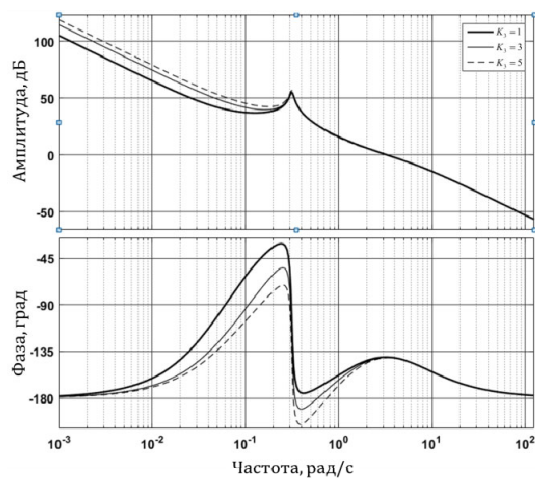


Рис. 15. ЛЧХ для системы с одним ПИ-регулятором в контуре дифферента

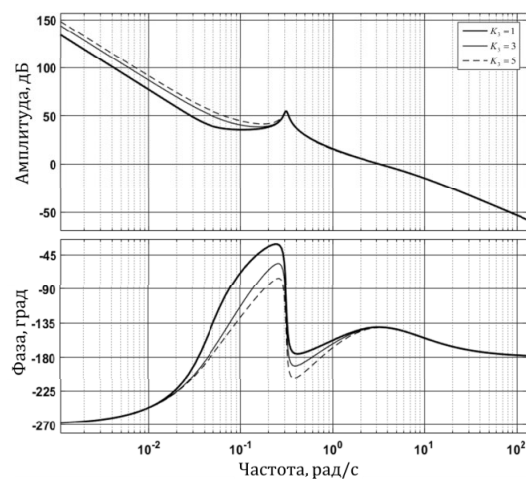


Рис. 16. ЛЧХ для системы с двумя ПИ-регуляторами в контурах дифферента и управления глубиной погружения ПА

Анализируя приведенные выше графики, можно сделать следующие выводы:

– для всех конфигураций достаточное условие отсутствия автоколебаний можно определить, как значение K_3 должно быть меньше критического $K_3^{кр}$;

– при конфигурации без ПИ-регуляторов, значение $K_3^{кр}$ заметно больше, чем при других конфигурациях системы.

Таким образом, выберем значение коэффициента $K_3 = 1$, чтобы в системе не возникали автоколебания.

Для анализа влияния неразрывных нелинейностей на коэффициент $K_3^{кр}$ были построены ЛЧХ системы с двумя ПИ-регуляторами для разных точек линеаризации по угловой скорости ω_z^* (рис. 17) и углу дифферента ϑ^* (рис. 18) соответственно.

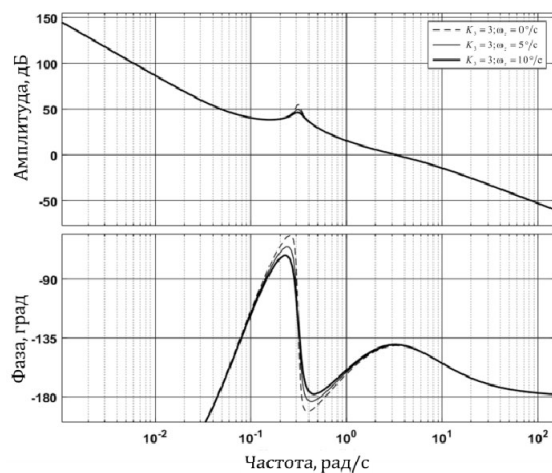


Рис. 17. ЛЧХ для различных значений ω_z^*

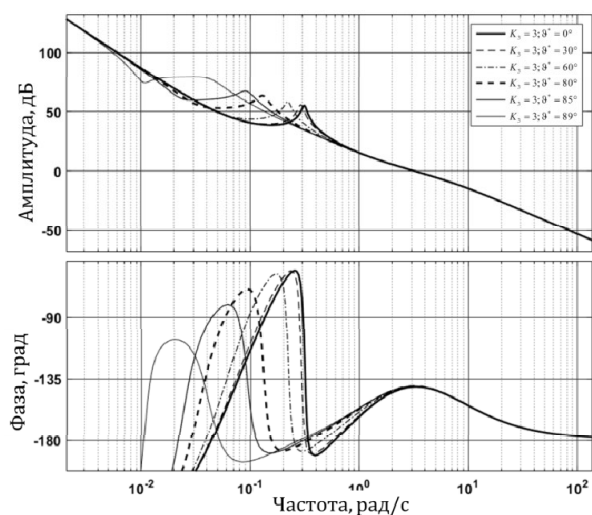


Рис. 18. ЛЧХ для различных значений ϑ^*

Анализируя данные графики, можно сделать следующие заключения:

- при увеличении угловой скорости ω_z^* увеличивается значение $K_3^{кр}$;
- в большом диапазоне значений угол дифферента слабо влияет на значения $K_3^{кр}$. Только, если $\vartheta^* > 80^\circ$, возникает заметное влияние на $K_3^{кр}$.

Отметим, что неразрывные нелинейности влияют на значение коэффициента $K_3^{кр}$, следовательно, целесообразно будет скорректировать выбранное значение K_3 по результатам моделирования работы контура управления глубиной погружения ПА.

Коррекция коэффициента K_3 по результатам моделирования. Для уточнения значения коэффициента K_3 в рассматриваемом контуре управления были построены переходные процессы при подаче входного воздействия $\eta^\circ = 10$ для различных значений коэффициента K_3 (рис. 19).

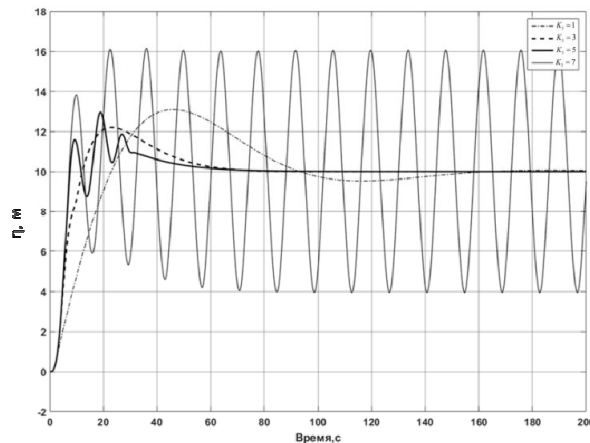


Рис. 19. Переходные процессы для различных значений K_3

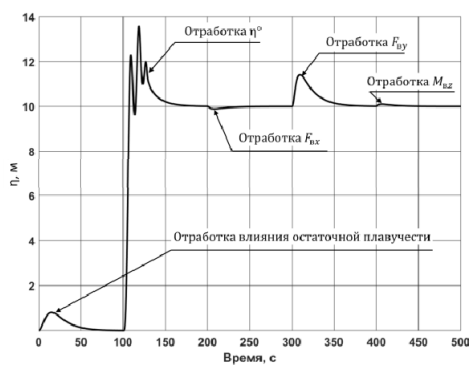
После анализа приведенных выше графиков можно сказать, что при выбранном после анализа возникновений автоколебаний значении коэффициента K_3 в системе не возникают автоколебания, но целесообразней выбрать значение $K_3 = 5$, что обеспечивает меньшее время переходных процессов при допустимом перерегулировании без возникновения автоколебаний.

Моделирование работы синтезированного контура управления глубиной погружения ПА. На рис. 20 представлены переходные процессы синтезированной СУ глубиной погружения ПА для воздействий, действующих в следующем порядке: на 100-й секунде подается задающее воздействие η° , равное 1, 10, 50 м (см. рис. 20, а–в соответственно), на 200-й секунде начинает действовать возмущающая сила по оси X $F_{вх} = 200$ Н, на 300-й секунде начинает действовать возмущающая сила по оси Y $F_{вy} = 100$ Н, на 400-й секунде начинает действовать возмущающий момент вокруг оси Z $M_{вz} = 30$ Н·м. При моделировании учитывались все нелинейности системы, также была учтена ненулевая остаточная

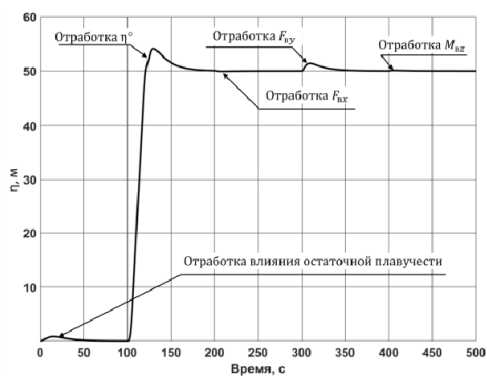
плавучесть. Моделирование начинается с нулевых начальных условий по всем параметрам, кроме маршевой скорости $V_{x0} = V = 3$ м/с, поэтому в начале моделирования система обработает влияние ненулевой остаточной плавучести.



а



б



в

Рис. 20. Переходные процессы в синтезированной СУ глубиной погружения ПА

Анализируя переходные процессы контура управления глубиной погружения ПА, можно сделать следующие выводы:

- система обрабатывает малые, средние и большие задающие воздействия без статической ошибки и автоколебаний;
- система обрабатывает различные возмущающие воздействия: $M_{вз}$, $F_{вх}$, $F_{вн}$ и ненулевую остаточную плавучесть без статической ошибки;
- при средних задающих воздействиях переходные процессы имеют высокую колебательность.

Заключение. В ходе проведенной работы синтезирован и исследован контур системы управления глубиной погружения подводного аппарата, который обрабатывает задающие воздействия и внешние возмущения с нулевой статической ошибкой.

Исследование синтезированного контура управления глубиной погружения показало, что в системе, которая синтезируется по линеаризованной модели контура управления, возникают автоколебания.

Анализ возникновения автоколебаний позволяет сделать следующие выводы:

- автоколебания возникают из-за разрывной нелинейности «насыщение» в модели движителей;
- условием отсутствия автоколебаний является неперевышение коэффициентом K_3 критического порога $K_3^{кр}$;
- исключение из системы ПИ-регуляторов в контуре управления глубиной погружения и контуре дифферента приводит к увеличению порогового значения $K_3^{кр}$;
- существует влияние неразрывных нелинейностей на возникновение автоколебаний, которое увеличивает значение $K_3^{кр}$.

Результаты моделирования работы контура управления глубиной погружения подводного аппарата с учетом нелинейностей и ненулевой остаточной плавучести позволяют сформулировать следующие выводы:

- система обрабатывает влияние ненулевой остаточной плавучести как возмущающее воздействие;
- система обрабатывает все виды входных воздействий с нулевой статической ошибкой;
- при средних задающих воздействиях колебательность переходных процессов больше, чем при малых и больших воздействиях.

Целью дальнейших исследований является синтезирование адаптивной системы управления глубиной погружения ПА, которая будет обеспечивать требуемое качество переходных процессов при любых задающих воздействиях.

Литература

- [1] Грумондз В.Т., Половинкин В.В., Яковлев Г.А. *Теория движения двусредных аппаратов. Математические модели и методы исследования*. Москва, Вузовская книга, 2012, 644 с.
- [2] Грумондз В.Т., Яковлев Г.А. *Алгоритмы аэрогидродинамического проектирования*. Москва, Изд-во МАИ, 1994, 304 с.

- [3] Киселев Л.В., Медведев А.В. Исследование динамических свойств автономного подводного робота на основе типологии процессов и моделей нечеткого управления. *Подводные исследования и робототехника*, 2008, № 1 (5), с. 16–23.
- [4] Киселев Л.В., Медведев А.В. Модели динамики и алгоритмы управления движением автономного подводного робота при траекторном обследовании аномальных физических полей. *Подводные исследования и робототехника*, 2011, № 1 (11), с. 24–31.
- [5] Киселев Л.В., Медведев А.В. О параметрических соотношениях гидродинамики и устойчивости движения автономного подводного робота. *Подводные исследования и робототехника*, 2013, № 1(15), с. 17–22.
- [6] Киселев Л.В., Медведев А.В. Сравнительный анализ и оптимизация динамических свойств автономных подводных роботов различных проектов и конфигураций. *Подводные исследования и робототехника*, 2012, № 1(13), с. 24–35.
- [7] Лукомский Ю.А., Чугунов В.С. *Системы управления морскими подвижными объектами*. Ленинград, Судостроение, 1988, 272 с.
- [8] Гостилович С.О. Разработка и исследование системы управления движением подводного аппарата в вертикальной плоскости. Математическая модель подводного аппарата. *Политехнический молодежный журнал*, 2018, № 2(19).
URL: <http://ptsj.ru/catalog/menms/robots/254.html>.
- [9] Гостилович С.О., Гостилович А.О. Разработка и исследование системы управления движением подводного аппарата в вертикальной плоскости. Синтез контура дифференциала. *Политехнический молодежный журнал*, 2018, № 5(22).
URL: <http://ptsj.ru/catalog/menms/robots/305.html>.
- [10] Бесекерский В.А., Попов Е.П. *Теория систем автоматического управления*. Санкт-Петербург, Профессия, 2007, 752 с.
- [11] Попов Е.П. *Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления*. Москва, Наука, 1979, 256 с.

Гостилович Сергей Олегович — студент кафедры «Подводные роботы и аппараты», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Егоров Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Подводные роботы и аппараты», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE SUBMERSIBLE MECHANISMS
MOTION CONTROL SYSTEM IN THE VERTICAL PLANE. SYNTHESIS
OF THE CONTOUR OF THE SUBMERSIBLE MECHANISMS DEPTH
CONTROL SYSTEM**

S.O. Gostilovich

mmm333zzz@yandex.ru

SPIN-code: 8566-6499

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

In this paper on the basis of a simplified mathematical model and previously synthesized control loop trim angle made control circuit depth of the submersible mechanisms. The author showed the process of occurrence in the system of self-oscillations in the synthesis of the control loop depth of the submersible mechanisms on the linearized model. The author determined with the help of harmonic linearization methods, the causes of self-oscillations are revealed, and the condition of their absence. The paper analysis the influence of the structure of the contour of the trim and the contour of the depth of immersion, as well as the effect of continuous nonlinearities of the system on the occurrence of self-oscillations. The paper deals with the usefulness of the subsequent correction of the system parameters by simulation. It is reported that the results of simulation of the obtained system taking into account nonlinearities, perturbations and non-zero residual buoyancy under various driving forces are presented.

Keywords

Submersible mechanisms, mathematical model, trim, immersion depth, vertical motion, linearized model, feedbacks, harmonic linearization, transfer function, self-oscillation, residual buoyancy

Received 17.09.2018

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] Grumondz V.T., Polovinkin V.V., Yakovlev G.A. Teoriya dvizheniya dvusrednykh apparatov. Matematicheskie modeli i metody issledovaniya [Movement theory of two-medium apparatus. Mathematical models and research methods]. Moscow, Vuzovskaya kniga publ., 2012, 644 p.
- [2] Grumondz V.T., Yakovlev G.A. Algoritmy aerogidrodinamicheskogo proektirovaniya [Algorithms of aerohydrodynamic engineering]. Moscow, MAI publ., 1994, 304 p.
- [3] Kiselev L.V., Medvedev A.V. Research of AUV dynamic features on basis of processes typology and fuzzy control models. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigations and Robotics], 2008, no. 1(5), pp. 16–23.
- [4] Kiselev L.V., Medvedev A.V. Dynamics models and control algorithms of autonomous underwater robot in trajectory inspection of the physical fields anomalies. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigations and Robotics], 2011, no. 1(11), pp. 24–31.
- [5] Kiselev L.V., Medvedev A.V. On parametric relation of hydrodynamics and motion stability of the autonomous underwater robot. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigations and Robotics], 2013, no. 1(15), pp. 17–22.

- [6] Kiselev L.V., Medvedev A.V. Comparative analysis and the optimization of the autonomous underwater robots dynamic properties of different projects and configurations. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigations and Robotics], 2012, no. 1(13), pp. 24–35.
- [7] Lukomskiy Yu.A., Chugunov V.S. Sistemy upravleniya morskimi podvizhnymi ob'ektami [Control systems of marine vehicles]. Leningrad, Sudostroenie publ., 1988, 272 p.
- [8] Gostilovich S.O. Designing and vertical testing of the submersible motion control system. The mathematical model of the submersible. *Politekhnicheskiiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2018, no. 2(19). Available at: <http://ptsj.ru/catalog/menms/robots/254.html>.
- [9] Gostilovich S.O., Gostilovich A.O. Development and investigation of the submersible vertical motion control system. Trim difference loop synthesis. *Politekhnicheskiiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2018, no. 5(22). Available at: <http://ptsj.ru/catalog/menms/robots/305.html>.
- [10] Besekerskiy V.A., Popov E.P. Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya [Automatic control system theory]. Sankt-Peterburg, Professiya publ., 2007, 752 p.
- [11] Popov E.P. Teoriya nelineynykh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya i upravleniya [Theory of non-linear systems of automatic regulation and control]. Moscow, Nauka publ., 1979, 256 p.

Gostilovich S.O. — student, Department of Submersible Robots and Mechanisms, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific adviser — S.A. Egorov, PhD of Engineering, Assist. Professor, Department of Submersible Robots and Mechanisms, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.