

МЕТОД СИНТЕЗА СИСТЕМ ВЫСОКОТОЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ ПОДВОДНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ

**В.Ф. Филаретов^{1,2}, А.Ю. Коноплин^{1,3},
А.В. Зуев^{1,3}, Н.А. Красавин^{2,3}**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН¹
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования Дальневосточный федеральный университет²
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем морских технологий ДВО РАН³

Представлена разработка метода синтеза комбинированных систем, обеспечивающих высокоточное управление перемещениями рабочих органов многозвенных манипуляторов, установленных на подводных аппаратах. Предложенный метод позволяет точно идентифицировать негативные моментные воздействия на выходные валы электроприводов манипуляторов, возникающие при их перемещениях в вязкой среде, а также моменты сухого и вязкого трений в этих приводах. При использовании этого метода вначале с помощью рекуррентного алгоритма решения обратной задачи динамики выполняется предварительный аналитический расчет внешних моментов, возникающих во всех степенях подвижности движущегося подводного манипулятора. Этот расчет является весьма приближенным вследствие сложности определения параметров реального взаимодействия с водной средой всех звеньев манипулятора и захваченного груза. Поэтому далее с использованием динамических моделей электроприводов каждой степени подвижности, включающих аналитически рассчитанные внешние моменты, строятся дополнительные диагностические наблюдатели. Эти наблюдатели с помощью формируемых ими невязок точнее определяют величины непредвиденных изменений моментов вязкого и сухого трения в самих электроприводах. Затем идентифицированные моментные воздействия на электроприводы всех степеней подвижности манипулятора точно компенсируются с помощью самонастраивающихся корректирующих устройств, обеспечивающих стабилизацию динамических свойств этих приводов на номинальном уровне. Выполнено численное моделирование системы, синтезированной с помощью разработанного метода для многозвенного манипулятора с кинематической схемой PUMA, рабочий орган которого перемещался по сложным пространственным траекториям. Результаты численного моделирования показали многократное повышение точности выполнения подводными манипуляторами различных технологических операций при использовании синтезированной системы.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение точности управления многозвенными манипуляторами (ММ), установленными на подводных аппаратах, необходимо для расширения областей применения подводной робототехники при выполнении конкретных рабочих операций [1, 2]. Однако на движущиеся звенья подводных ММ оказываются значительные и трудно определяемые динамические воздействия со стороны окружающей водной среды [3, 4]. При этом манипуляторы часто перемещают подводные объекты с априорно неизвестными параметрами. Кроме того, в процессе эксплуатации подводных ММ могут происходить непредвиденные увеличения моментов вязкого и сухого трений

в используемых электроприводах (из-за изменения свойств и загрязнений смазки, трений в герметизирующих разьемах и т.п.). В результате на выходных валах приводов ММ возникают дополнительные переменные моменты, существенно снижающие точность перемещения их рабочих органов (РО) при выполнении манипуляционных работ.

Для расчета в реальном масштабе времени силовых воздействий вязкой среды на движущиеся звенья ММ, а также взаимовлияний между их степенями

¹690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5. Тел.: +7 (423) 231-37-83.
E-mail: filaret@pma.ru.

²690000, г. Владивосток, ул. Суханова, 8. Тел.: +7 (423) 243-44-72.
E-mail: krasavin.na@students.dvfu.ru.

³690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел.: +7924-429-83-96.
E-mail: kayur-prim@mail.ru.

подвижности может использоваться рекуррентный алгоритм [3] решения обратной задачи динамики (ОЗД). Однако точность вычислений этих взаимовлияний и воздействий невелика из-за большой сложности корректного априорного определения параметров воздействий вязкой среды на все звенья ММ, а также величин масс и моментов инерции жидкости, присоединенных к этим звеньям. Поэтому аналитических расчетов, полученных с помощью алгоритма решения ОЗД, недостаточно для определения всех негативных моментных воздействий на выходные валы приводов подводных ММ.

Уточнение величин указанных моментов возможно с использованием фильтра Калмана [5] и диагностических наблюдателей [6–8]. Но эти фильтры в основном применимы для линейных систем с постоянными или медленно изменяющимися параметрами и внешними воздействиями. Поэтому они не могут быть эффективно использованы для идентификации быстро изменяющихся внешних моментов в приводах подводных ММ, описываемых сложными нелинейными дифференциальными уравнениями с существенно и быстро изменяющимися параметрами. В отличие от фильтров специальные диагностические наблюдатели позволяют не только обнаруживать появления неучтенных моментов на выходных валах приводов ММ, но и определять их величины. Но, как показали исследования, точность их работы во многом определяется отличием реальных величин идентифицируемых функций от заданных в используемых моделях приводов. В подводных ММ параметры их приводов и внешних воздействий могут изменяться в больших диапазонах (особенно при их быстрых перемещениях). Поэтому вводимые в модели всех приводов параметры и внешние воздействия должны быть максимально приближены к реально действующим. Требуемое приближение может быть достигнуто с помощью предварительного расчета силовых воздействий вязкой среды на движущиеся звенья ММ и возникающих при движении ММ взаимовлияний между их степенями подвижности с использованием указанного выше рекуррентного алгоритма.

После точного определения искомых параметров приводов и внешних моментных воздействий на ММ можно использовать известные подходы [9] для синтеза высокоточных самонастраивающихся регуляторов подводных ММ, обеспечивающих стабилизацию динамических свойств их приводов на номинальном уровне и, тем самым, требуемую динамическую точность управления.

■ Постановка задачи

Для повышения динамической точности управления ММ, установленными на подводных аппаратах, в статье ставится задача разработки нового метода синтеза комбинированных систем, обеспечивающих высокоточную идентификацию и последующую компенсацию всех внешних моментов в степенях подвижности подводных ММ, вызванных влияниями вязкой среды на эти манипуляторы, а также точную стабилизацию параметров их электроприводов на номинальном уровне.

Эту главную задачу предполагается решить в два этапа. На первом – с помощью рекуррентного алгоритма решения ОЗД [3] предполагается выполнить аналитический расчет моментов, возникающих во всех степенях подвижности ММ при их движении в вязкой водной среде. Поскольку этот расчет априорно является весьма приближенным по причине сложности точного определения параметров взаимодействия всех звеньев ММ и удерживаемого груза с водной средой, то на втором этапе с использованием динамических моделей электроприводов каждой степени подвижности ММ, включающих приближенно рассчитанные на первом этапе внешние моменты, по известной процедуре, описанной в работах [7, 8], требуется построить дополнительные диагностические наблюдатели, которые за счет использования формируемых ими невязок должны не только обнаружить факт появления дополнительных (неучтенных) моментов, обусловленных переменным взаимодействием движущегося ММ с вязкой средой, но и достаточно точно определить их величины, а также величины непредвиденных изменений моментов вязкого и сухого трения в самих электроприводах. Все идентифицированные внешние моментные воздействия на электроприводы всех степеней подвижности ММ должны быть скомпенсированы с помощью синтезированных самонастраивающихся корректирующих устройств (СКУ) [9], сохраняя высокую точность движения ММ по пространственным траекториям в водной среде.

1. Расчет моментов, возникающих в суставах ММ при их движении в водной среде

Рассмотрим n -степенной подводный ММ с произвольной кинематической схемой, электроприводы каждой степени подвижности которого с учетом введения фазовых координат $x_1 = q, x_2 = \dot{q}, x_3 = I$, измеря-

емых соответствующими датчиками, можно описать уравнениями:

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{i_p} x_2, \dot{x}_2 = -\frac{k_e}{J_\Sigma} x_2 + \frac{k_m}{J_\Sigma} x_3 - \frac{M_{cmp}(x_2)}{J_\Sigma} - \frac{P^*}{J_\Sigma} + d,$$

$$\dot{x}_3 = -\frac{k_\omega}{L} x_2 - \frac{R}{L} x_3 + \frac{k_y}{L} u,$$

где q – угол поворота выходного вала редуктора электропривода; $\dot{\alpha}$ – скорость вращения ротора электродвигателя; R, L, I – активное сопротивление, индуктивность и ток цепи якоря соответственно; k_ω, k_m, k_y – коэффициенты противо-э.д.с., крутящего момента и усиления усилителя; u – входное напряжение; J_Σ – момент инерции ротора электродвигателя и вращающихся частей редуктора, приведенный к этому ротору; k_b – номинальный коэффициент вязкого трения (КВТ); M_{cmp} – номинальный момент сухого трения электродвигателя и редуктора; $M_{cmp} = \begin{cases} M_{mp} \text{sign}(x_2), \text{ при } x_2 \neq 0 \\ 0, \text{ при } x_2 = 0 \end{cases}$; $M_{тр}$ – величина момента сухого трения движения; i_p – передаточное отношение редуктора; $P^* = P / i_p$ – приведенный к ротору внешний момент P , обусловленный взаимодействиями в степенях подвижности подводного ММ (в него могут входить и параметры рассматриваемого привода) и вычисляемый с помощью рекуррентного алгоритма решения ОЗД [3].

Поскольку, как отмечалось выше, аналитический расчет величины P является весьма приближенным и возможно непредвиденное увеличение значений k_b и M_{cmp} в используемых электроприводах из-за трений в герметизирующих разьемах и изменений свойств смазки, то в уравнение (1) дополнительно вводится функция d , определяющая неизвестное суммарное моментное воздействие, описываемое выражением:

$$d = -\frac{1}{J_\Sigma} [\tilde{k}_e x_2 + \tilde{M}_{cmp}(x_2) + \tilde{P}^*],$$

где $\tilde{k}_e, \tilde{M}_{cmp}(x_2), \tilde{P}^*$ – величины отклонений КВТ и момента сухого трения от своих номинальных значений, а также \tilde{P}^* от рассчитанного значения P^* соответственно.

В результате задача идентификации всех неизвестных негативных динамических воздействий на приводы подводного ММ сводится к определению величин P^* и d .

На первом этапе решения этой задачи для вычисления моментов P , действующих на выходные валы всех электроприводов ММ, можно использовать рекуррентный алгоритм решения ОЗД [3], в котором полагается, что каждая элементарная часть звена i

n -степенного ММ может иметь различную скорость движения относительно покоящейся жидкости не только по величине, но и по направлению. Кроме того, сила, действующая на эту элементарную часть со стороны вязкой среды, может иметь линейную или квадратичную зависимость от величины скорости движения этой части в водной среде. Поэтому каждое звено этого манипулятора в алгоритме разбито на конечное число элементарных частей одинаковой длины, а суммарная сила, действующая на звено i , определяется как сумма сил, приложенных к каждой элементарной части этого звена. В результате по рекуррентным формулам, начиная с последнего и кончая первым звеном подводного ММ, вычисляются и моменты, действующие во всех его степенях подвижности [3]:

$$M_i = A_i^{i+1} \cdot M_{i+1} + p_i^* \times (A_i^{i+1} \cdot F_{i+1}) + r_i^* \times (m_i \cdot \ddot{r}_{mi}) + r_{pi} \times (\Pi_{mi} \cdot \ddot{j}_{mi}) + (\tau_i + T_i) \cdot \dot{\omega}_i + \omega_i \times ((\tau_i + T_i) \cdot \omega_i) + M_{Rpi} + M_{Li}, M_{n+1} = 0, i = \overline{n, 1},$$

где A_i^{i+1} – матрица перевода векторов из $(i + 1)$ -й в i -ю систему координат; $\omega_i \in R^3$ – угловая скорость вращения звена i ; $p_i^* \in R^3$ – вектор, совпадающий с продольной осью звена i , определяющий положение шарнира $(i + 1)$ относительно шарнира i ; $M_{Rpi} \in R^3$ – суммарный момент, создаваемый поперечными составляющими сил вязкого трения, действующих на каждую элементарную часть звена i ; m_i – масса звена i ; $\dot{\omega}_i \in R^3$ – угловое ускорение звена i ; $M_{Li} \in R^3$ – момент, создаваемый составляющей угловой скорости ω_p , направленной вдоль продольной оси звена i ; Π_{mi} – присоединенные к звену i массы жидкости; $\ddot{j}_{mi} \in R^3$ – линейное ускорение центра масс звена i ; $r_{pi} \in R^3$ – вектор, задающий положение центра массы Π_{mi} относительно шарнира i ; $r_i^* \in R^3$ – вектор, задающий положение центра масс звена i относительно шарнира i ; $\tau_i \in R^{3 \times 3}$ – тензор инерции звена i относительно его центра масс; $T_i \in R^{3 \times 3}$ – тензор инерции массы жидкости, присоединенной к звену i ; $F_i, M_i \in R^3$ – сила и момент этой силы, действующие в шарнире i , соответственно; (\times) и (\cdot) – соответственное векторное и скалярное произведение векторов.

Рассчитанный внешний момент P_p , действующий на выходной вал редуктора i -го электропривода ММ, будет определяться равенством $P_i = M_{i(3)}$, где нижний индекс 3 в круглых скобках указывает на номер элемента в соответствующем векторе M_i . Далее для простоты введенных обозначений индексы i , обозначающие номер соответствующей степени подвижности ММ, будем опускать.

2. Описание дополнительных наблюдателей

Как было отмечено выше, точное априорное определение параметров ММ, их приводов и вязкой среды, а, тем более, перемещаемых объектов практически всегда затруднено. В результате не удается обеспечивать качественное управление ММ, используя только приведенный аналитический расчет моментов P . Для более точного определения особенностей внешнего воздействия на электроприводы ММ (величины функции d) на втором этапе следует синтезировать и использовать дополнительные диагностические наблюдатели, рассмотренные ниже.

При синтезе наблюдателей уравнение (1) удобнее представить в матричной форме:

$$\dot{x} = Ax + Bu + G(x_2, P^*) + Dd, \quad (2)$$

где $A = \begin{bmatrix} 0 & 1/i_p & 0 \\ 0 & -k_e/J_\Sigma & k_m/J_\Sigma \\ 0 & -k_\omega/L & -R/L \end{bmatrix}$, $x = \begin{bmatrix} q \\ \dot{\alpha} \\ I \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_y/L \end{bmatrix}$

$$G = \begin{bmatrix} 0 \\ -M_{cmp}(x_2) - P^* \\ J_\Sigma \\ 0 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}. \text{ При этом для иденти-}$$

фикации величины d можно использовать диагностические наблюдатели, синтезированные с помощью известных методов, описанных в работах [7, 8].

Уравнение искомого наблюдателя удобно представить в виде:

$$\dot{x}_* = A_*x_* + B_*u + G_* + J_*y - ke_y + D_*v, (J_* \in R^3), \quad (3)$$

где символом «*» снизу отмечены матрицы и векторы, описывающие рассматриваемый наблюдатель, элементы которых отличаются от соответствующих элементов матриц и векторов моделей приводов (2); k – положительная константа; $e_y = \Phi x - x_* \in R^3$ – невязка, которая позволяет установить отличия параметров соответствующих электроприводов ММ от их номинальных значений в системе (2) (при $e_y \neq 0$ и $d \neq 0$); $\Phi \in R^3$ – вектор, подлежащий определению;

функция v имеет вид $v = \begin{cases} -g_* \frac{e_y}{|e_y|}, & \text{если } e_y \neq 0 \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}$,

g_* – положительная константа. При синтезе наблюдателя, определяющего появление в системе (2) ненулевой функции d , следует определить матрицы A_* , B_* и векторы J_* ; Φ . Вводя известное условие [8] $\Phi D \neq 0$ чувствительности невязки к d , вектор Φ можно сформировать в виде $\Phi = [0 \ 1 \ 0]$.

Задачу построения диагностических наблюдателей целесообразно решать в канонической форме Кронекера [8]. В этом случае с учетом размерности синтезируемых наблюдателей справедливо равенство $A_* = 0$. С учетом этого равенства и справедливости соотношений $J_* = \Phi A$, $B_* = \Phi B$, $G_* = \Phi G$, $D_* = \Phi D$ [8] искомый наблюдатель может быть описан уравнением:

$$\dot{x}_* = -\frac{k_e}{J_\Sigma} \dot{\alpha} + \frac{k_m}{J_\Sigma} I - \frac{M_{cmp}(x_2)}{J_\Sigma} - \frac{P^*}{J_\Sigma} - ke_y + v, e_y = \dot{\alpha} - x_* \quad (4)$$

Известно [7], что при выборе $g_* > |d|$ ошибка оценивания $e_y \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$. При этом величина d может быть оценена с высокой точностью при использовании фильтра низких частот [10]: $\hat{d} = v_y$, где \hat{d} – полученная наблюдателем (4) оценка функции d ; v_y – величина функции v , пропущенная через фильтр низких частот.

Таким образом, использование дополнительных наблюдателей (4) для электроприводов каждой степени подвижности ММ обеспечивает обнаружение и оценку \hat{d} неучтенных суммарных моментов, появляющихся ввиду возникновения отклонений \tilde{P}^* величины P^* от своих расчетных значений, а также отклонений моментов вязкого и сухого трения в этих приводах от своих номинальных значений.

3. Синтез СКУ приводов ММ

Для компенсации всех идентифицированных внешних моментов во всех степенях подвижности ММ и стабилизации параметров всех их электроприводов необходимо синтезировать соответствующие СКУ, обеспечивающие требуемые показатели качества их работы при быстром изменении внешних приведенных моментов, а также при наличии изменяющихся моментов сухого и вязкого трений в этих приводах. Эти СКУ предлагается синтезировать с помощью подхода, основанного на стабилизации параметров дифференциальных уравнений, описывающих электроприводы ММ [9, 11]. Для этого дифференциальное уравнение каждого нагруженного электропривода (1) перепишем с учетом того, что при их движении справедливо равенство $\dot{M}_{cmp} = 0$:

$$uk_y k_m = LJ_\Sigma \ddot{\alpha} + (k_e L + J_\Sigma R) \dot{\alpha} + (Rk_e + k_\omega k_m) \dot{\alpha} + L \left(\dot{P}^* + \hat{d} \right) + R(P^* + \hat{d} + M_{cmp}). \quad (5)$$

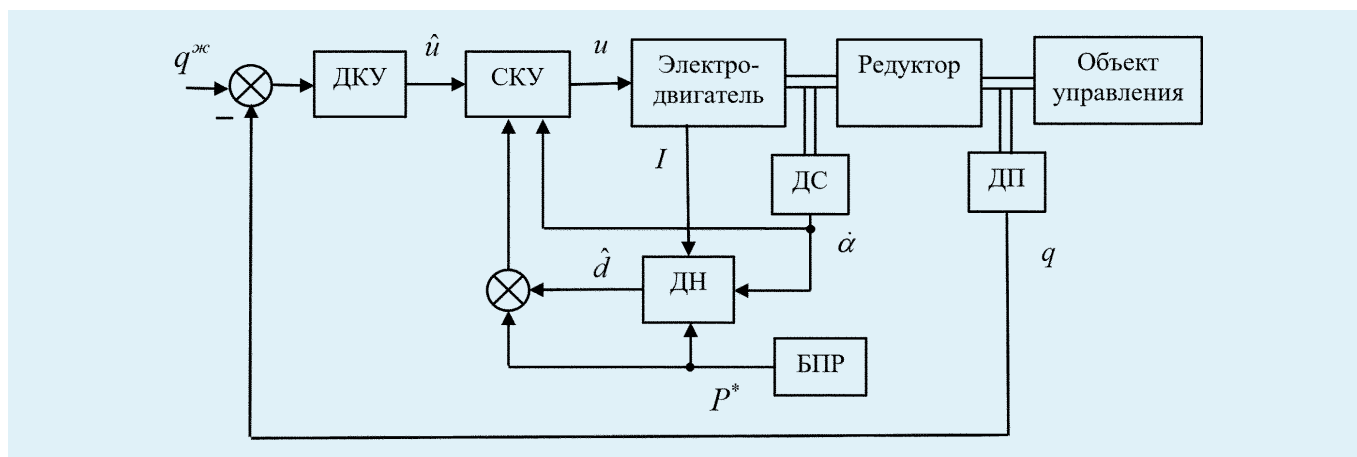


Рис. 1. Структурная схема электропривода подводного ММ

Желаемое линейное дифференциальное уравнение каждого электропривода с номинальными постоянными параметрами и стабильными динамическими свойствами имеет вид:

$$\hat{u}k_y k_m = LJ_\Sigma \ddot{\alpha} + RJ_\Sigma \dot{\alpha} + k_\omega k_m \dot{\alpha}, \quad (6)$$

где \hat{u} – сигнал управления, поступающий на вход СКУ.

Выразив из уравнения (6) значение старшей производной $\ddot{\alpha}$ и подставив его в исходное уравнение (5), несложно получить желаемый закон управления, который обеспечит заданное стабильное качество работы каждого электропривода подводного ММ:

$$u = \frac{1}{k_y k_m} [k_\omega L \ddot{\alpha} + k_\omega R \dot{\alpha} + L(\dot{P}^* + \hat{d}) + R(P^* + \hat{d} + M_{cmp})] + \hat{u}. \quad (7)$$

Поскольку в современных электроприводах ММ электрическая постоянная времени обычно пренебрежимо мала ($\frac{L}{R} \ll 1$), то уравнение (7) можно значительно упростить:

$$u = \frac{1}{k_y k_m} [k_\omega R \dot{\alpha} + R(P^* + \hat{d}) + M_{cmp} R] + \hat{u}. \quad (8)$$

Для придания электроприводу, описываемому уравнением (6) с постоянными параметрами, заданных показателей качества и динамических свойств в его прямую цепь можно установить дополнительное корректирующее устройство (ДКУ). Обобщенная схема электропривода, управляющего i -й степенью подвижности подводного ММ, представлена на рис. 1. На этом рисунке введены следующие новые обозначения: ДП – датчик положения выходного вала редуктора электропривода; ДС – датчик скорости вращения ротора; ДН – диагностический наблюда-

тель; БПР – блок предварительного расчета внешних моментов P^* ; q^* – входной (желаемый) сигнал.

4. Результаты моделирования

Для исследования особенностей функционирования синтезированной системы управления (см. рис. 1) в среде Matlab Simulink было выполнено моделирование работы трехступенного ММ с кинематической схемой PUMA [12, 13], имеющей только три переносные степени подвижности. Его РО перемещался по траектории (см. рис. 2), описываемой системой уравнений [14]:

$$\dot{x}^* = \frac{V^*}{\sqrt{\left(\frac{\partial f_y(x^*)}{\partial x^*}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_z(x^*)}{\partial x^*}\right)^2 + 1}},$$

$$y^* = f_y(x^*), \quad z^* = f_z(x^*),$$

где $V^* = 0,6$ м/с – модуль вектора желаемой скорости движения РО вдоль заданной пространственной траектории; $f_y(x^*) = 0,5\sin(10x) + 0,05$, $f_z(x^*) = 0,01$. Время движения по траектории 4 с.

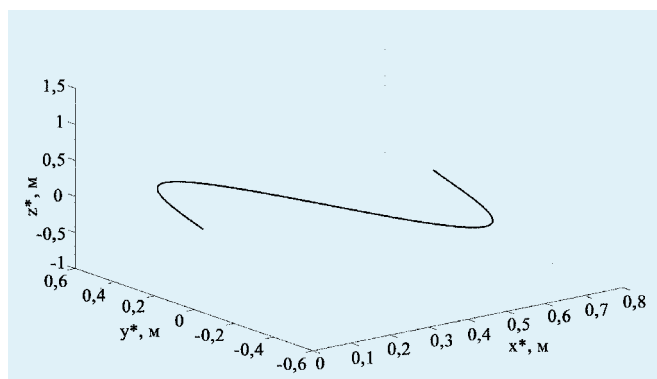


Рис. 2. Траектория движения РО подводного ММ

При моделировании были введены следующие параметры этого ММ [12, 13]: $l = 0,05$ м, $l_2 = l_3 = 0,5$ м, $m_1 = 0,4$ кг, $m_2 = m_3 = 3,925$ кг, $|r_1^*| = 0,025$ м, $|r_2^*| = |r_3^*| = 0,25$ м. Было принято, что центры масс всех звеньев ММ совпадают с их центрами величины, звенья имеют цилиндрическую форму с радиусом основания $r_1 = r_2 = r_3 = 0,05$ м и нейтральную плавучесть. Их тензоры инерции – диагональные, имеющие значения $\tau_{111} = 6 \times 10^{-4}$ кгм², $\tau_{122} = \tau_{133} = 4 \times 10^{-4}$ кгм², $\tau_{211} = \tau_{311} = 5 \times 10^{-3}$ кгм², $\tau_{222} = \tau_{233} = \tau_{322} = \tau_{333} = 8,4 \times 10^{-2}$ кгм². КВТ, входящие в алгоритм решения ОЗД [3], а также величины присоединенных масс жидкости для звеньев ММ имели следующие значения: $k_1^* = k_2^* = k_3^* = 0,6$, $k_{L1} = k_{L2} = k_{L3} = 0,12$; $P_1 = 0,1$ кг, $P_2 = P_3 = 1,075$ кг. Плотность воды $1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Диагональные элементы соответствующих тензоров инерции присоединенных масс жидкости: $T_{111} = 1 \times 10^{-4}$ кгм², $T_{122} = T_{133} = 1,5 \times 10^{-4}$ кгм², $T_{211} = T_{311} = 1,4 \times 10^{-3}$ кгм², $T_{222} = T_{233} = T_{322} = T_{333} = 0,026$ кгм². Полагалось, что во всех степенях подвижности ММ установлены одинаковые электроприводы с двигателями постоянного тока независимого возбуждения или постоянными магнитами, имеющие следующие параметры: $J_\Sigma = 1 \times 10^{-4}$ кгм², $R = 0,2$ Ом, $k_y = 35$, $i_p = 100$, $k_\omega = 0,02$ Вс, $k_m = 0,02$ Нм/А, $k_g = 0,005$ Нмс/рад, $M_{mp} = 0,06$ Нм, $L = 0,002$ Гн. Для каждого электропривода использовались наблюдатели (4) с параметрами: $k = 10$ и $g_* = 7000$. Во всех электроприводах использовались СКУ вида (8), а также типовые ДКУ (см. рис. 1) – ПИД регуляторы с коэффициентами: $k_p = 10$, $k_1 = 0,01$, $k_D = 0,4$.

Для моделирования дополнительных внешних моментов \tilde{P}^* , возникающих в электроприводах ММ, в алгоритме решения ОЗД использовались значения величин КВТ, присоединенных масс и моментов инерции жидкости, увеличенные на 20%. Кроме того, в момент времени $t = 2$ с в электроприводах всех степеней подвижности ММ на 20% от своих номинальных значений увеличивались КВТ и моменты сухих трений.

На рис. 3 показаны законы изменения динамических ошибок ϵ движения РО по заданной программной траектории: без использования в электроприводах ММ синтезированных СКУ (кривая 1), при введении СКУ (8) (кривая 2), учитывающих только расчетные значения P^* , а также с использованием дополнительных наблюдателей (4) (кривая 3). Из представленных кривых видно, что величина ϵ без использования СКУ достигает 32 мм, а с использованием СКУ эта ошибка не превышает 15 мм. При этом

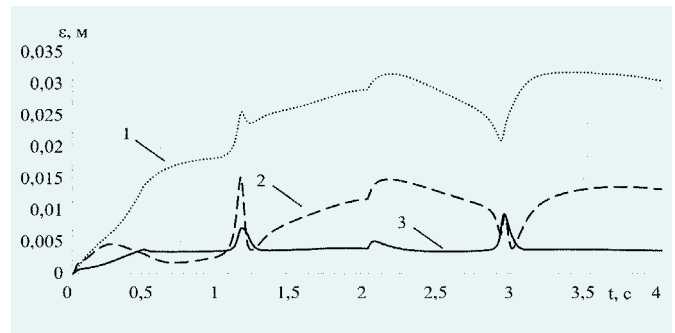


Рис. 3. Величины динамических ошибок движения РО ММ по синусоиде

введение дополнительных наблюдателей, позволяющих учесть величины $\tilde{k}_g, \tilde{M}_{cmp}(x_2), \tilde{P}^*$, приводит к снижению динамической ошибки движения РО ММ на большинстве участков до 4 мм.

Также было проведено моделирование движения РО ММ с постоянной скоростью $V^* = 0,45$ м/с по окружности, описываемой системой уравнений (см. рис. 4):

$$x^* = 0,3\sin(1,5t) + 0,4, y^* = 0,3\cos(1,5t) + 0,4, z^* = 0,01.$$

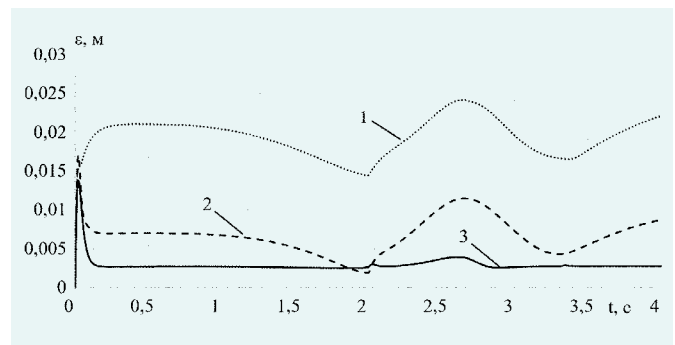


Рис. 4. Величины динамических ошибок движения РО ММ по окружности

Из этого рисунка видно, что после завершения переходных процессов динамическая ошибка движения РО ММ без использования СКУ в его приводах достигает 24 мм (кривая 1), а при введении СКУ (кривая 2), учитывающих только расчетные значения P^* , величина ϵ не превышает 12 мм. При введении дополнительных наблюдателей динамическая ошибка снижается до 3 мм (кривая 3).

Таким образом, результаты численного моделирования подтвердили работоспособность синтезированной системы, позволяющей значительно повысить точность выполнения РО подводного ММ различных технологических операций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описан новый метод синтеза комбинированных систем высокоточного управления перемещениями РО подводных ММ. Созданная на основе предложенного метода система за счет введения СКУ электроприводов ММ компенсирует негативные взаимовлияния между всеми степенями подвижности многозвенника, возникающие при его перемещениях с высокой скоростью в водной среде, а также моменты сухого и вязкого трений в этих приводах. Поскольку с помощью рекуррентного алгоритма решения ОЗД невозможно точно определить параметры силового воздействия вязкой среды на движущи-

ся звенья подводного ММ, то в систему управления предложено вводить дополнительные наблюдатели для идентификации и последующей компенсации неучтенных внешних моментов на валах соответствующих электроприводов.

Выполнено численное моделирование работы синтезированной системы, результаты которого показали многократное снижение динамической ошибки движения РО ММ по сложным пространственным траекториям по сравнению с типовыми системами управления.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 20-38-70161, № 19-08-00347_А, № 18-08-01204_А).

ЛИТЕРАТУРА

1. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю. Система для автоматического выполнения манипуляционных операций с помощью подводного робота // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 8. С. 543–549.
2. Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю., Шувалов Б.В. Подход к выполнению АНПА технологических манипуляционных операций с различными подводными объектами // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 1 (27). С. 31–37.
3. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Ч. 1 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 6. С. 53–56.
4. Куафе Ф. Взаимодействие робота с внешней средой. М.: Мир, 1985. 285 с.
5. Zhang Q. Adaptive Kalman filter for actuator fault diagnosis // Automatica. 2018. Vol. 93. P. 333–342.
6. He J., Zhang C. Fault reconstruction based on sliding mode observer for nonlinear systems // Mathematical Problems in Engineering. 2012. Vol. 2012. ID 451843. P. 1–22.
7. Zhirabok A., Zuev A., Shumsky A. Sliding Mode Observers Based Fault Identification in Mechatronic Systems // Proceeding of the IEEE Industrial Electronics Conference. Zaragoza, Spain, 2019. P. 161–166.
8. Жирабок А.Н., Усольцев С.А. Линейные методы при диагностировании нелинейных систем // Автоматика и телемеханика. 2000. № 7. С. 149–159.
9. Филаретов В.Ф. Самонастраивающиеся системы управления приводами манипуляторов. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2000. 304 с.
10. Уткин В.И. Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой. М.: Наука, 1974.
11. Filaretov V.F., Zhirabok A.N., Zuev A., Protchenko A. The development of the faults accommodation system for actuators of multilink manipulators // Proceedings of the 23rd DAAAM Int. Symp. on Intelligent Manufacturing and Automation 2012. Zadar, Croatia, 2012. Vol. 23, No. 1. P. 575–578.
12. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической коррекции программной траектории движения многозвенного манипулятора, установленного на подводном аппарате // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 1. С. 40–45.
13. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Ч. 2 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 7. С. 29–34.
14. Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Губанков А.С. Управление манипуляторами при выполнении различных технологических операций. М.: Наука, 2018. 232 с.

