

УПРАВЛЕНИЕ И ДИНАМИКА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ С ПЕРЕМЕННОЙ ДЛИНОЙ

Ключевые слова: переменная длина, управление, динамика, протяженная система.

Введение

В настоящее время для проведения исследований научного и прикладного характера в космической, воздушной и водной средах создаются и широко эксплуатируются различные робототехнические средства для вертикального зондирования исследуемого пространства, одним из основных элементов которых являются распределенные системы с переменной длиной. Среди них важную роль в водной среде играют телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (НПА). В традиционной схеме использования телеуправляемого НПА его носитель (судно, подводная лодка, вертолет) находится в режиме удержания в точке, а НПА — отдельно, либо в составе ангара, спускается и направляется к месту работ. На рис. 1, *а*, *б* представлены схемы движения НПА в вертикальной и горизонтальной плоскостях при его позиционировании впереди носителя (такой режим обычно используется для подводного разминирования или детального исследования малоразмерных объектов на дне акватории). Конфигурация кабельной привязной системы для НПА: *а* — плавучий кабель; *б* — кабель отрицательной плавучести, α_1 — угол между горизонтальной осью носителя и КИД (кабель с изменяемой длиной) в коренной точке, α_2 — угол между горизонтальной осью и КИД в месте его крепления к НПА

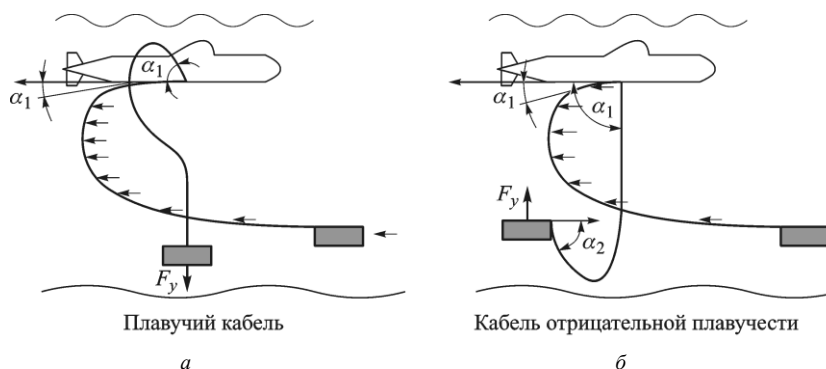


Рис. 1

Особенности и методы проектирования кабельных привязных систем телеуправляемых НПА в научно-технической литературе освещены недостаточно. Ряд особенностей их функционирования определяет целесообразность, а иногда и необходимость целенаправленного изменения длины кабеля, связывающего НПА и носитель. В таких случаях кабель является не только компонентом общей динамической привязной системы, но и выступает в роли самостоятельного объекта управления.

Управление длиной в дискретной модели

Задачи динамики геометрически нелинейных распределенных механических систем в различных средах с изменяемыми размерами относятся к наименее изученным проблемам механики и кибернетики. Решению отдельных нелинейных
© А.Г. ЛЕБЕДЬ, 2020

волновых задач динамики распределенных систем с неизменяемыми размерами посвящены работы И.В. Сергиенко, А.В. Гладкого, В.Ф. Губарева, В.В. Скопецкого и др. [1–3]. Вследствие значительных сложностей в построении и реализации численных алгоритмов задач управления геометрически нелинейными распределенными системами с переменной длиной в морской практике используют упрощенные схемы, вводят ряд допущений при описании действующих на кабель нагрузок, исключают из рассмотрения многие факторы при построении математической модели КИД. Для анализа динамических характеристик КИД многие исследователи [4, 5] используют его упрощенное представление (рис. 2, расчетная эквивалентная схема кабельной линии изменяемой длины [4, 5], α_i — углы отклонения i -го стержневого участка КИД от вертикали) со следующими допущениями:

- рассматривается плоское движение КИД;
- кабель представляется в виде трех стержней, связанных идеальными шарнирами, при этом первый стержень телескопический и его текущая длина равна $(1 \pm \Delta l)$, а остальные два имеют неизменную длину l ;
- центры масс и объема каждого стержня находятся в его середине;
- подводное течение V_T постоянно и действует лишь в плоскости многозвенника;
- первый шарнир связан с подводным (надводным) носителем, последний — с НПА, поэтому оба крайних шарнира неподвижны в рассматриваемой системе координат.

Последнее допущение приближенно соответствует двум типовым режимам использования НПА: совместного синхронного движения НПА и носителя; динамического позиционирования НПА у объекта работ. С учетом принятых допущений эквивалентная механическая система будет иметь только две степени свободы, что существенно упрощает ее математическое представление. Необходимо отметить, что такая модель КИД имеет ряд ограничений. В частности, в качестве начальных условий должна быть определена начальная конфигурация стержневой системы в виде значений углов $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$. Поскольку в методе использованы линеаризованные соотношения кинематических параметров, погрешность моделирования будет возрастать при увеличении приращений координат НПА относительно их начальных значений. В работе [4] приведены два графика оценки относительной погрешности определения координат НПА, как функции приращения угла α_1 и относительной длины Δl (рис. 3, а, б). На рис. 3 $dr, \%$ — оценка погрешности определения координат НПА, при приращении угла $\Delta\alpha_1$ и приращении относительной длины $\overline{\Delta l}$ [4]; dr — приращение радиус-вектора (координат НПА); $\overline{\Delta l}$ — приращение длины КИД; L_k — первоначальная длина КИД.

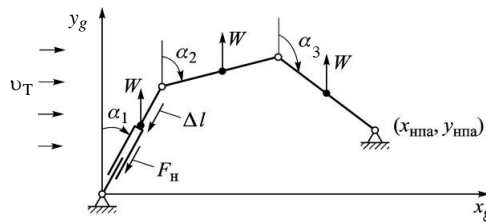


Рис. 2

Результаты рис. 3, а, б свидетельствуют о том, что увеличение погрешности определения координат НПА в рамках описанной дискретной модели прямо пропорционально зависит от изменения приращения угла α_1 и изменения длины первого участка КИД. Это накладывает значительные ограничения на возможность маневрирования по вертикали и горизонтали самим НПА в рамках допустимой погрешности ($\leq 10 \div 15 \%$). Изменение длины кабеля в рамках рассматриваемой

трехстержневой дискретной модели системы [4, 5] приводит к существенным погрешностям ($\geq 50\%$) при выполнении незначительных маневров (изменение координат) НПА в исследуемом им квадрате акватории. Отметим также, что сила натяжения по длине каната и углы наклона отдельных прямолинейных участков кабеля в рамках рассматриваемой модели неизменны при любой частоте колебаний и, соответственно, при амплитуде [6, 7]. Это дополнительно существенно сужает диапазон применимости описанных выше линейных дискретных динамических моделей КИД и ограничивает возможность правильной оценки коэффициента динамичности системы «КИД-НПА» [8].

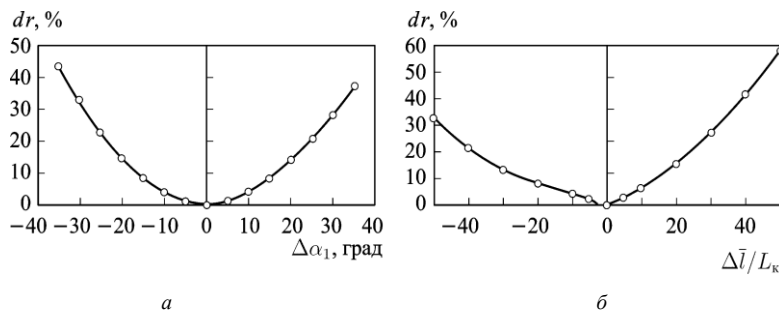


Рис. 3

Управление длиной в непрерывной модели

В силу описанных выше недостатков дискретных моделей КИД рассмотрена непрерывная обобщенная модель управления длиной КИД при его сматывании (наматывании) в потоке с лебедки носителя (судна, подводной лодки, вертолета). В [9] исследована плоская задача динамики геометрически нелинейной связи переменной длины в потоке и предложены следующие уравнения, описывающие эволюцию текущей длины связи по времени:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \beta, \quad \frac{d\beta}{dt} = \frac{k^2}{2} \Delta^2 \alpha + k^2 \Delta^2 \beta, \quad (1)$$

где

$$\Delta^2 \alpha(i) = \alpha(i+1) - 2\alpha(i) + \alpha(i-1), \quad (2)$$

$$\Delta^2 \beta(i) = \beta(i+1) - 2\beta(i) + \beta(i-1).$$

Здесь α — текущее положение дискретной точки КИД, β — скорость изменения текущего положения дискретной точки, i — номер дискретной точки КИД, t — время. Авторы [9] назвали (1) «уравнением критически демпфированного гармонического осциллятора». В соответствии с этим величина k , по их мнению, соответствует времени релаксации возмущения до равновесного состояния и в [9] предложено ее величину брать равной единице. В дифференциальной форме записи система дискретных уравнений (1), (2) может быть обобщена и сведена к одному интегродифференциальному уравнению:

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} = C_1 \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} \int \beta \partial t + C_2 \frac{\partial^2 \beta}{\partial \alpha^2}. \quad (3)$$

Если в (3) величина C_1 мала по сравнению с другими коэффициентами (3), то (3) сводится к одномерному уравнению диффузии. Граничными условиями для (3) является закон работы судовой (вертолетной, подводной лодки) лебедки при $S = 0$:

$$\alpha(0, t) = 0; \quad \beta(0, t) = V(t). \quad (4)$$

$V(t)$ — скорость сматывания (наматывания) каната с (на) лебедки носителя. Краевое условие на другом конце КИД, в зависимости от того, чем он оканчивается (другой лебедкой, НПА, дном), имеет соответствующее выражение (обычно в виде дифференциального уравнения). В качестве начальных условий для (3) берется начальное распределение дискретных точек по длине КИД и равенство нулю начальной скорости движения дискретных точек вдоль КИД:

$$\alpha(S, 0) = S; S \in [0, L], \beta(\alpha, 0) = 0. \quad (5)$$

Здесь L — первоначальная длина КИД, S — текущая длина, переменная. Таким образом, краевая задача (3)–(5) отыскания текущей скорости дискретных точек вдоль КИД и их текущего положения в случае малого коэффициента C_1 может быть решена аналитически с использованием метода тепловых потенциалов, в частности, в виде потенциала двойного слоя:

$$\beta(\alpha, t) = \int_0^t V(\tau) \frac{\alpha}{\sqrt{C_2 \pi(t-\tau)}} e^{-\frac{\alpha^2}{4C_2(t-\tau)}} \frac{d\tau}{2(t-\tau)}. \quad (6)$$

Ввиду того, что непосредственный анализ решения (6) затруднен, дальнейшие рассуждения проведем на основе численного интегрирования следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha}{\partial t} &= \beta(\alpha, t), \\ \frac{\partial \beta}{\partial t} &= C_1 \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} \int \beta dt + C_2 \frac{\partial^2 \beta}{\partial \alpha^2}, \end{aligned} \quad (7)$$

на основе устойчивых явных конечноразностных схем для различных коэффициентов C_1 и C_2 .

Численный анализ непрерывной модели управления КИД

При использовании системы уравнений (7) для управления длиной КИД необходимо обеспечить выполнение одного из следующих условий:

- 1) сохранить первоначальное расстояние между узлами КИД и наращивание (уменьшение) его длины производить только за счет создания (исключения) новых (старых) узлов в начале КИД у лебедки носителя;
- 2) сохранить первоначальное количество узлов по длине КИД и обеспечить равномерное увеличение (уменьшение) расстояния между ними при изменении длины КИД;
- 3) обеспечить адаптивное перемещение узлов по КИД таким образом, чтобы минимизировать приращение кривизны связи между соседними узлами (это условие повышает порядок аппроксимации исходной модели на конечно-разностном шаблоне).

Решение каждой из трех задач имеет свои особенности и определяется коэффициентами модели (7) C_1 , C_2 , а также коэффициентами аппроксимации производной $\frac{\partial^2 \beta}{\partial \alpha^2}$.

Значения коэффициентов C_1 , C_2 в работе [9] соответствуют диапозону изменения только для первого из трех условий. При изменении C_1 и C_2 в одинаковом диапазоне скорость β в средних и крайних узлах растет медленно, не достигая в расчетном режиме скорости сматывания связи с лебедки, что соответствует выполнению первого из трех условий. В то же время, если пользоваться рекомендациями работы [9] относительно значения коэффициентов C_1 и C_2 , то

изменение β в узлах будет носить колебательный характер. Это приведет к переменному увеличению и уменьшению отстояний узлов сетки одного от другого в процессе решения задачи. Преимуществом при использовании этого условия является постоянство значений числа Куранта–Фридрикса–Леви (КФЛ) по продольным колебаниям и уменьшение чисел КФЛ по поперечным колебаниям КИД. Это не ухудшает устойчивость общего численного алгоритма. К недостаткам следует отнести увеличение размерности решаемых конечно-разностных уравнений при появлении каждого нового участка на 4 или 6 в плоской или пространственной задаче соответственно.

Для обеспечения второго условия необходимо, чтобы начальное значение β как можно быстрее было достигнуто в каждом из узлов сетки (мгновенное распространение тепла в полубесконечном стержне). Этому случаю соответствуют малые значения C_1 и большие величины C_2 . Как следует из рис. 4 (зависимость β от времени: 1.1, 1.2 — $C_2 = 0.1$; 2.1, 2.2 — $C_2 = 1$; 3.1, 3.2 — $C_2 = 10$; $C_1 = 0.1$), ...1 соответствует участку посередине каната, ...2 — участку в конце каната (у места крепления НПА), все узлы расчетной сетки при величине $C_2 \geq 10$ практически мгновенно «отслеживают» режим работы лебедки. Преимуществом этого условия является сохранение размерности исходных конечно-разностных уравнений динамики гибкой связи переменной длины. К недостаткам следует отнести изменение критерия КФЛ по продольным и поперечным колебаниям, а также увеличение в процессе счета приращения кривизны связи между соседними узлами за счет увеличения их отстояния один от другого, что в некоторых случаях может привести к рассогласованию численного алгоритма.

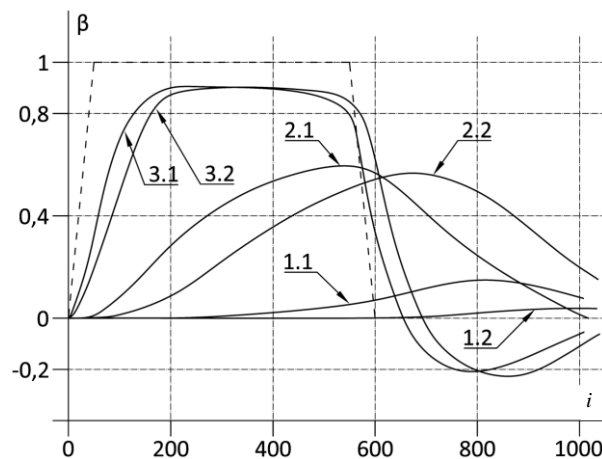


Рис. 4

Выполнение третьего условия может происходить как при использовании первого, так и второго условия. Основным критерием в этом случае является минимизация приращения кривизны между соседними узлами. Исключая случай появления петель во время динамического процесса, а также предполагая, что угол наклона КИД к горизонтали изменяется от 0° до 90° , производную $\frac{\partial^2 \beta}{\partial \alpha^2}$ можно аппроксимировать следующим образом:

$$\frac{\partial^2 \beta}{\partial \alpha^2} = \frac{2\gamma\beta_{i+1} - 2\beta_i + 2(\gamma - 1)\beta_{i-1}}{\Delta\alpha^2}. \quad (8)$$

Здесь β_i — значение скорости β в i -м узле, $\Delta\alpha$ — разность между соседними значениями величины α в $i+1$ и i -м узлах, коэффициент γ нормируется по величине изменения угла между соседними или крайними узлами. Адаптивное управление размещением узлов вдоль связи осуществляется назначением γ в i -х узлах связи в зависимости от текущих приращений угла. Разрежению узлов сетки соответствуют значения γ из диапазона $[0;1]$, сгущению — значения $\gamma > 1$, и узлы сетки остаются неподвижными при одновременном выполнении следующих двух условий: $\gamma = 1$ и $\beta(\alpha, 0) = 0$. Как и следовало ожидать, при адаптивной аппроксимации производной $\frac{\partial^2\beta}{\partial\alpha^2}$ и соответствующих второму условию значениях коэффициентов C_1 и C_2 , изменение скорости β происходит во всех узлах связи практически одновременно. Основное преимущество этого условия — адаптивная перестройка разностной сетки в ходе численного исследования переходного процесса, обеспечивающая выполнение определенного критерия качества. Недостатками третьего условия являются те же, которые присущи первому или второму, в зависимости от того, в совокупности с каким из них реализуется третье условие в численном алгоритме нелинейной динамики КИД.

Адаптивное движение над неровным дном

Уравнение динамики КИД в потоке в вертикальной плоскости можно записать в проекциях на текущие единичные векторы касательной и нормали к связи в следующем виде [10]:

$$\begin{aligned} -e \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial u_t}{\partial \alpha} - u_n \frac{\partial \phi}{\partial \alpha} &= -\frac{\partial \beta}{\partial \alpha}; \quad -(1+\varepsilon) \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial u_n}{\partial \alpha} + (u_t + \beta) \frac{\partial \phi}{\partial \alpha} = 0, \\ -m \left(\frac{\partial u_t}{\partial t} - u_n \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) + \frac{\partial T}{\partial \alpha} - \frac{m(u_t + \beta)e}{1+\varepsilon} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} &= m \frac{\partial \beta}{\partial t} + \omega \sin \phi + \frac{\pi k_f \rho d_0}{2} \sqrt{1+\varepsilon} |u_t + \beta| (u_t + \beta); \quad (9) \\ -(m+M) \left(\frac{\partial u_n}{\partial t} + (u_t + \beta) \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) + T^* \frac{\partial \phi}{\partial \alpha} + \frac{(M+m)u_n e}{1+\varepsilon} \frac{\partial T}{\partial t} &= \omega \cos \phi + \frac{k_n \rho d_0}{2} \sqrt{1+\varepsilon} |u_n| u_n; \\ \varepsilon = Te; \quad e = \frac{1}{EF}; \quad F = \frac{\pi d^2}{4}; \quad T^* = T - Mu_t^2, \end{aligned}$$

где d_0 — первоначальный диаметр КИД до деформирования, ϕ — угол наклона КИД к горизонтали, m , M , ω — масса, присоединенная масса и плавучесть единицы длины КИД до деформирования, k_f , k_n — гидродинамические коэффициенты сопротивления трения и формы протяжной системы, ρ — плотность жидкости, T — эффективное натяжение КИД; u_t , u_n — проекции относительной скорости обтекания КИД на касательную и нормаль; t — время; $e = \frac{1}{EF}$ — эффективная растяжимость КИД; E — модуль Юнга; F — площадь поперечного сечения КИД до деформирования.

Систему уравнений (9) необходимо дополнить уравнениями модели управления (3), описывающей изменение длины каната во времени. В качестве начально-краевых условий рассмотрим режим работы лебедки, которая находится на носителе, и закон его движения:

$$\alpha(0, t) = 0; \quad \beta(0, t) = V_1(t); \quad u_t(0, t) = V_2(t); \quad u_n = V_3(t), \quad (10)$$

где $V_1(t)$ — тахограмма подъема или сматывания каната с лебедки [11], $V_2(t)$ и $V_3(t)$ — проекции скорости судна-буксировщика $\overline{V}(t)$ на текущую касательную и нормаль к канату в месте схода каната с лебедки, взятые с обратным знаком. Граничное условие при $\alpha = L$ соответствует динамическому равенству сил на НПА:

$$T + P \sin \phi + M_* \left(\frac{\partial(u_t + \beta)}{\partial t} - u_n \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) + \frac{K_* S_* \rho}{2} (u_t + \beta) = 0;$$

$$P \cos \phi + M_* \left(\frac{\partial u_n}{\partial t} + (u_t + \beta) \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) - \frac{K_* S_* \rho}{2} |\bar{u}| u_n = 0,$$

$$\bar{u} = \bar{t}(u_t + \beta) + \bar{n} u_n. \quad (11)$$

Здесь P — разность гидростатической выталкивающей силы и силы веса подводного аппарата, M_* — сумма его массы и присоединенной массы, K_* — гидродинамический коэффициент сопротивления, S_* — площадь миделевого сечения (midsection) аппарата, \bar{t} , \bar{n} — текущие единичные векторы касательной и нормали в месте крепления КИД к НПА.

Начальные условия для гипербола-параболической системы уравнений (3), (9) с краевыми условиями (10), (11) получаются из (3), (9)–(11), если в последних производную по времени положить равной нулю [12]. Одним из необходимых условий, определяющих корректность постановки данной начально-краевой задачи, является действительность собственных чисел гиперболической части системы уравнений (9), что на физическом уровне означает наличие скорости распространения продольных и поперечных волн в исследуемом КИД (исключается слабина в системе) и осевое усилие (натяжение) каната T должно превышать определенную (минимальную) величину:

$$V_{1,2}^* = \frac{-\frac{u_t + \beta}{1 + \varepsilon} \pm \sqrt{\left(\frac{u_t + \beta}{1 + \varepsilon}\right)^2 + \frac{4}{em}}}{2}, \quad V_{1,2}^* \in D,$$

$$V_{3,4}^* = \pm \sqrt{\frac{T - M(u_t + \beta)^2}{M + m}}, \quad T > M(u_t + \beta)^2, \quad V_{3,4}^* \in D. \quad (12)$$

Здесь $V_{1,2}^*$ — скорость распространения продольных волн в тросе, $V_{3,4}^*$ — скорость распространения поперечных волн в тросе в положительном и отрицательном направлении соответственно; D — множество действительных чисел. Как следует из (12), скорость сматывания с лебедки не должна превышать скорость распространения поперечных волн в системе.

Для численной реализации начально-краевой задачи (3), (9), (10) воспользуемся апробированной схемой Кранка–Никольсона [13, 14]. Тестирование развитого алгоритма произведено отдельно для гиперболической и параболической части системы.

Исследуем на конкретном примере эволюцию основных силовых и геометрических характеристик буксируемой системы в наиболее часто встречающемся виде маневра:

- обход буксируемым аппаратом препятствия на дне;
- маневр зондирования в вертикальной плоскости НПА для поиска донных мин и других малоразмерных объектов, размещенных непосредственно на морском дне (кабели связи, нефте- и газопроводы и др.).

Быстропротекающий маневр осуществляется при постоянной скорости буксировки 7.5 м/с путем изменения длины вытравленной (corrugated part of cable) части КИД. Первоначальная длина системы составляла 120 м, наибольшая длина во время эволюции — 175 м, время сматывания изменялось в диапазоне [0 ÷ 20 с] в зависимости от тахограммы лебедки. Силовые и гидродинамические характеристики КИД следующие: погонная масса и присоединенная масса до деформирования — 2,5 и 0,8 кг/м, первоначальный диаметр каната — 0,03 м, первоначальная плавучесть единицы длины каната — 17,6 Н/м, эффективная растяжимость каната изменялась в диапазоне $[3 \cdot 10^{-6} \div 3 \cdot 10^{-8}]$, масса НПА — 250 кг (присоединенная масса НПА — 50 кг), площадь миделевого сечения НПА — 0,4 м², гидродинамический коэффициент сопротивления НПА равнялся 0,5, гидродинамические коэффициенты сопротивления формы и трения каната соответственно 0,05 и 0,01, дискретность по длине линии изменялась в диапазоне [1 ÷ 20 м], коэффициенты C_1 и C_2 были равны: $C_1 = 0$, $C_2 = 5$, шаг по времени выбирался из условия устойчивости счета.

Численные результаты получены для тахограммы, в которой чередовались два режима: вытравливание (etching) — подъем с остановкой лебедки (рис. 5, тахограмма режимов работы лебедки). Для указанного режима тахограммы в КИД во время переходного процесса нелинейно взаимодействует три одновременно протекающих физических процесса: продольные волны, поперечные и эффекты, обусловленные изменением длины КИД. Характеристикой первого из процессов являются кривые эволюции осевого усилия и проекции касательной составляющей относительной скорости обтекания каната в потоке. Условно эволюционную зависимость натяжения в коренной точке каната можно разбить на четыре этапа. На первом, во время равноускоренного сматывания каната с лебедки, при увеличении скорости сматывания осевое усилие уменьшается. Одновременно с этим увеличивается длина вытравленной части каната, увеличивается гидродинамическое сопротивление, КИД сначала запаздывает, а потом подтягивается движущимся с постоянной скоростью судном-буксировщиком. Это приводит к рывку в КИД и, как следствие, к резкому увеличению осевого усилия на втором участке тахограммы. На третьем участке тахограммы скорость сматывания равномерно уменьшается и сматывание КИД переходит в выборку (hauling) каната (наматывания на лебедку). Здесь осевое усилие вначале плавно, а затем более резко возрастает, превышая первоначальное квазистатическое значение в 3,5–4 раза. Причем, чем выше эффективный модуль Юнга материала каната, тем выше динамический рывок в распределенной системе. При замедлении выборки каната и полной остановки лебедки силовая картина очередной раз изменяется: осевое усилие уменьшается и постепенно выходит на новое стационарное значение, соответствующее новой длине КИД в 140 м.

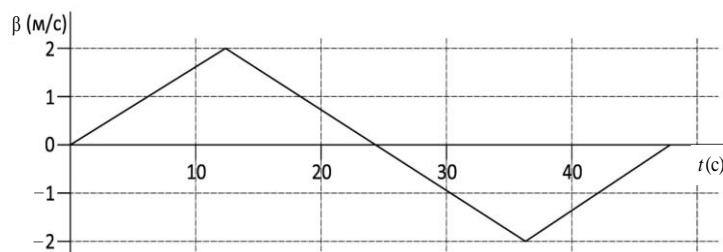


Рис. 5

Больше сглажены процессы, характеризующиеся поперечными волнами. На кривой эволюции угла отклонения коренной точки от вертикали можно выделить три характерных участка в соответствии с изменением скорости сматывания. Однако полной корреляции зависимости $\beta(\alpha, t)$ и $\phi(\alpha, t)$ нет, это обусловлено запаздыванием в системе ввиду нелинейного взаимодействия перечисленных выше трех процессов и сил гидродинамического демпфирования.

Эволюционные кривые всей конфигурации КИД для данной тахограммы лебедки при скорости буксировки 4 м/с в разные моменты времени изображены на рис. 6 (эволюция конфигурации КИД. Время 0–20 с) и рис. 7 (эволюция конфигурации КИД. Время 25–45 с).

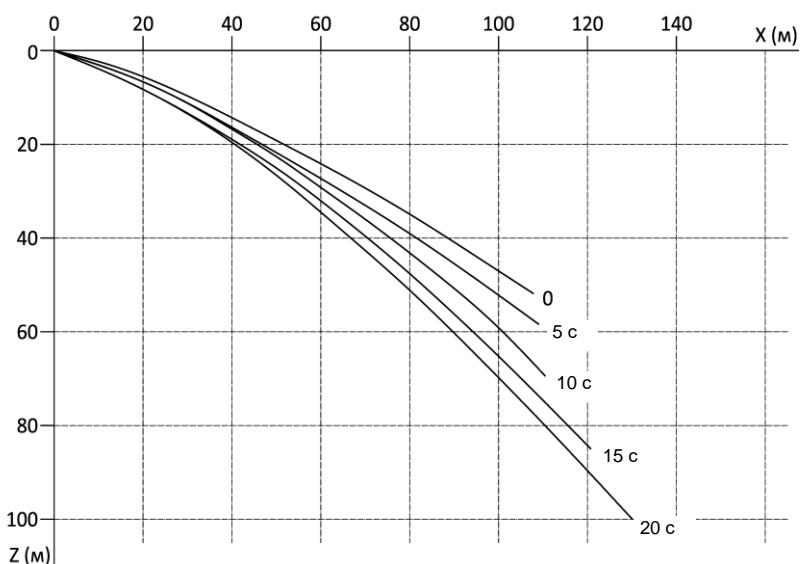


Рис. 6

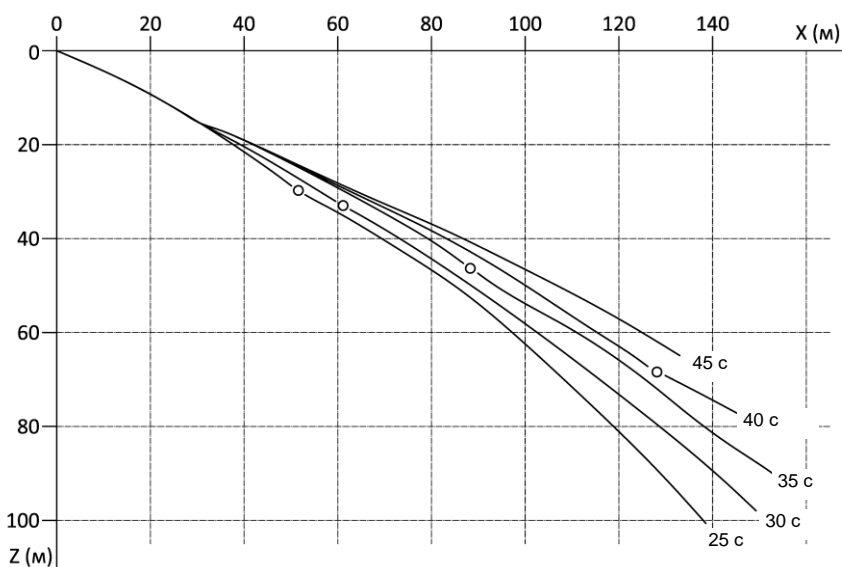


Рис. 7

Заключение

Получена качественная непротиворечивость построенной непрерывной модели управления КИД в потоке, адекватно описывающая экспериментально

наблюдаемые при буксировке быстропротекающие процессы в буксируемой системе с управляемой длиной. Обобщены результаты исследования [9] для модели управления КИД. Для отдельных частных случаев получено качественное и количественное соответствие с результатами расчетов [9].

Уточнены ранее высказанные предположения о движении КИД вдоль начальной конфигурации буксируемой линии при изменении его длины. На самом деле это не так (см. рис. 6, 7). При спуско-подъемных операциях это предположение верно лишь для начального переходного участка. В результате анализа полученных данных установлено также, что при заданной тахограмме в конфигурации КИД наблюдается точка перегиба (рис. 7), которая перемещается сверху вниз при его подъеме. Это может быть дополнительным фактором, способствующим обрыву и петлеобразованию в КИД при буксировке. Такие явления имеют место при эксплуатации КИД и неоднократно описывались в научной литературе [15, 16].

Лебідь О.Г.

КЕРУВАННЯ І ДИНАМІКА РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ ЗІ ЗМІННОЮ ДОВЖИНОЮ

Задачі динаміки геометрично нелінійних розподілених механічних систем у космічному, повітряному та водному середовищах зі змінними розмірами належать до найменш вивчених проблем механіки. У роботі розглядаються особливості математичного моделювання кабельних прив'язних систем телекерованих безпілотних підводних апаратів на базі дискретних та безперервних моделей. Низка особливостей їх функціонування визначає доцільність, а іноді і необхідність цілеспрямованої зміни довжини кабелю. У таких випадках кабель є не лише компонентом загальної динамічної прив'язної системи, а й виступає як самостійний об'єкт керування. В результаті розрахунків уточнені більш ранні припущення щодо руху кабелю вздовж початкової конфігурації буксированої лінії при зміні його довжини. З'ясувалося, що це припущення вірне лише для початкової перехідної ділянки. Встановлено також, що при заданій тахограмі в конфігурації буксированої лінії спостерігається точка перегибу, яка зміщується зверху вниз при його підйомі. Це може бути додатковим чинником, що сприяє обрыву кабельної системи та петлеутворенню при буксированні.

Ключові слова: змінна довжина, керування, динаміка, протяжна система

Lebid A.G.

DISTRIBUTED SYSTEM CONTROL AND DYNAMICS WITH VARIABLE LENGTH

Dynamics problems of geometrically nonlinear distributed mechanical systems in space, air, and water environments with variable dimensions are among the least studied problems of mechanics. The peculiarities of mathematical models of cable tethering systems of telecontrolled unmanned submarines based on discrete and continuous models are considered. A number of features of their operation determines the purposefulness, and sometimes the need, of a purposeful change in cable length. In such cases, the cable is not only a component of the overall dynamic tethering system, but it acts as an independent controlled object. As a result of the calculations, the earlier assumptions about the movement of the cable along its initial configuration were changed as the length of the cable changed. It has been found out that this assumption is only true for the initial transition participant. It is also established that at a given tachogram in the configuration of the towed line, there is a point of inflection, which shifts from top to bottom when lifting it. This can be an additional factor in the looping, contributing to the breakage of the cable system during towing.

Key words: variable length, control, dynamics, lengthy system.

1. Гладкий А.В., Сергиенко И.В., Скопецкий В.В. Численно–аналитические методы исследования волновых процессов. Киев : Наук. думка, 2001. 452с.
2. Гладкий А.В., Скопецкий В.В. О численном моделировании и оптимизации однонаправленных волновых процессов в неоднородных средах. *Кибернетика и системный анализ*. 2010. № 5. С. 177–186.
3. Губарев В.Ф. Рациональная аппроксимация систем с распределенными параметрами. *Кибернетика и системный анализ*. 2008. № 2. С. 99–115.
4. Вельтицев В.В. Упрощенное представление гибкого кабеля переменной длины для моделирования динамики телеуправляемого подводного комплекса. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение»*. 2012. С. 32–39.
5. Егоров С.А. Управление положением телеуправляемого подводного аппарата в режиме совместного с носителем движения : дис. Канд.техн.наук: 05.13.01. М., 2002. 366 с.: ил. OD 61 02-5/2709-3. Режим доступа: <https://dlib.rsl.ru/01002301793>.
6. Безверхий О. І. Динаміка гнучких континуально-дискретних розгалужених структур при взаємодії з зовнішнім середовищем : Автореф. дис. ... д-ра фіз.-мат. Наук : спец. 01.02.04 «Механіка деформованого твердого тіла» НАН України, Ін-т механіки ім. С.П. Тимошенка. К., 2005. 36 с.
7. Горбань В.А., Салтанов Н.В. Колебания гибкой нити в наклонном потоке. *Гидромеханика*. ИГМ АН УССР. 1974. Вып. 30. С. 76–79.
8. Бухарин С.Н., Каликов В.Н., Некрасов И.В., Орданович А.Е. О точности аппроксимации гибкой нити конечномерной моделью. *Материалы III республиканской конференции по прикладной гидромеханике*. 1984. Ч.II. С. 31.
9. Delmer T.N., Stephens T.C., Tremills J.A. Numerical simulation of cable-towed acoustic arrays. *J. Ocean Eng.* 1988. **15**, N 6. P. 511–548.
10. Калюх Ю.И., Вусатюк А.Е. Факторизация в задачах управления и динамики протяженных систем. *Кибернетика и системный анализ*, 2019. № 2. С. 117–128.
11. Горошко О.А., Савин Г.Н. Введение в механику деформируемых одномерных тел переменной длины. Киев : Наук. думка, 1971. 224 с.
12. Калюх Ю.И., Трофимчук А.Н., Лебедь А.Г. Численное решение двухточечных задач статики распределенных протяженных систем с помощью метода Нелдера–Мида. *Кибернетика и системный анализ*. 2019. № 4. С.109–118.
13. Трофимчук О.М., Калюх Ю.І., Дунін В.А., Берчун Я.О. Про можливість багатохвильової ідентифікації дефектів у палях. *Кибернетика та системний аналіз*. 2018. № 4. С. 98–108.
14. Kaliukh I., Senatorov V., Marienkov N., Trofymchuk O., Silchenko K., Kalyukh T. Arrangement of deep foundation pit in restricted conditions of city build-up in landslide territory with considering of seismic loads of 8 points. *Proceedings XVI ECSMGE*, 13–17 Sept 2015, Edinburgh, Great Britain, P. 535–540.
15. Sharhaty A.I. Nonlinear and hysteretic twisting effects in ocean cable laying. *Trans. ASME: J. Energy resource Hehnal*. 1983. **105**, A 3. P. 341–345.
16. Tiner N.A. Failure analysis for wire rope. *SAMPE Quart.* 1977. **11**, N 1. P. 38–46.

Получено 27.04.2020