

УДК 681.513

Алгоритм управления подъемником конструкций*

В.Л. ПРИСЕКИН¹, Г.И. РАСТОРГУЕВ²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор кафедры «Прочность летательных аппаратов». E-mail: priseking@gmail.com

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор кафедры «Прочность летательных аппаратов». E-mail: rastorguev@adm.nstu.ru

Подъем конструкций большой массы порядка 10^3 тонн выполняют с помощью системы тросов и исполнительных механизмов, установленных на плавающей платформе. Однако в открытой печати отсутствуют сведения об алгоритме управления этим процессом, нет данных о требуемой информации. Следует отметить, что подобные работы выполняются при испытаниях на прочность в лабораторных условиях упругих конструкций самолетов. Аэродинамические силы и инерционные заменяются действием штоков гидроцилиндров на узловые точки силовых элементов планера. При испытаниях свободной, незакрепленной конструкции необходимо не только реализовать расчетные силы, но и обеспечить положение самолета относительно зала испытаний, необходимое для нормального функционирования гидроцилиндров. Решение этих задач [1–15] является основой данного исследования.

В предлагаемой работе изучен вариант алгоритма управления подъемом конструкции, учитывающий взаимодействие платформы, а также системы тросов и конструкции. Принято, что упругие деформации платформы и конструкции малы, и в задаче подъема эти объекты рассматриваются как жесткие тела с двумя степенями свободы. Таким образом, конструкция подвешена на тросах, связанных с исполнительными механизмами платформы. Из строительной механики известно, что невозможно вычислить реакции абсолютно жестких трех и более опор на абсолютно жесткую балку для любых внешних сил. Введены «фиктивные жесткости», которые реализованы исполнительными механизмами как перемещение интегрального звена, пропорциональное силе натяжения троса. В этом случае алгоритм управления обеспечивает постоянную без ускорений скорость подъема тела, а силы натяжения тросов соответствуют планируемому значению. Принято, что взаимодействие дна и свободной конструкции можно определить опорами большой жесткости, воспринимающими только сжатие. Из-за нелинейности опор процесс подъема разделен на два этапа: отрыв от дна и перемещение конструкции по вертикали. Приведен пример подъема тела.

В третьей части работы дан вывод уравнений движения для изучения переходных процессов в системе управления подъемом тел.

* Статья получена 02 сентября 2016 г.

Ключевые слова: алгоритм, управление, подъем, плавающая платформа, гидравлические домкраты, трос, конструкция, равновесие, опора, дно, волна на поверхности, динамика

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-4-146-163

ВВЕДЕНИЕ

Один из способов подъема конструкций большой массы (например, затонувших кораблей) основан на использовании гидравлических домкратов, установленных на плавающей платформе и соединенных системой тросов с конструкцией. На рис. 1 схематично изображены платформа 1 с домкратами, обладающими функцией изменения длины тросов; конструкция 2, подвешенная на тросах; поверхность дна Γ_0 и системы координат. Полагаем, что тросы образуют упругую систему, хотя и жесткую, расположенную в вертикальной плоскости. Введем в этой плоскости глобальную неподвижную систему координат X, Y, Z . Пусть ось X лежит в горизонтальной плоскости и расположена в окрестности дна Γ_0 , ось Y ориентирована против сил тяжести, а ось Z завершает образование правой системы координат. С платформой свяжем локальную систему координат x, y, z . Примем, что начало координат локальной системы выбрано вблизи центра тяжести платформы, плоскость x, y лежит в плоскости X, Y , а направления оси x и главного момента инерции платформы совпадают. Положение платформы определим относительно поверхности воды Γ_1 в спокойном состоянии. Для управления положением поднимаемой конструкции введем локальную систему координат ξ, η, ζ , ось ξ которой совпадает с главным моментом инерции конструкции, оси ξ, η лежат в плоскости X, Y и ось ζ завершает формирование правой системы координат.

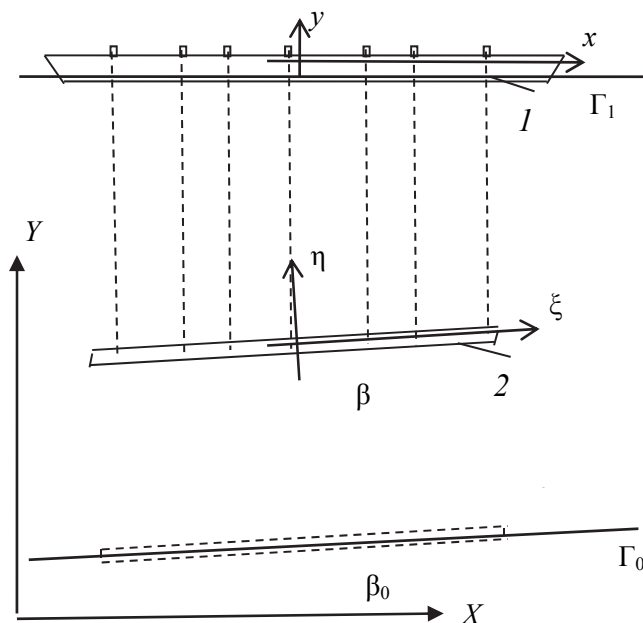


Рис. 1. Системы координат:

1 – платформа; 2 – поднимаемая конструкция

Таким образом, продольные оси платформы и конструкции лежат в одной плоскости с исполнительными механизмами и системой тросов. Основная задача управления – выполнить подъем конструкции в соответствии с ее заданным положением, сохраняя при этом плавучесть платформы. Следует отметить, что подобные трудности возникают при испытаниях на прочность в лабораторных условиях упругих конструкций самолетов при моделировании сил аэродинамических, тяжести, инерционных действием штоков гидроцилиндров на узловые точки силовых элементов планера. При испытаниях свободной, незакрепленной конструкции следует не только реализовать расчетные силы, но и обеспечить положение самолета относительно пола зала испытаний, требуемое для нормального функционирования гидроцилиндров из-за конечной длины штоков. Уравнения состояния для решения этих задач получены в работах [1, 2, 7].

Необходимо также обеспечить прочность тросов. Для плоской задачи подъема условия прочности тросов можно выполнить на основе предварительного анализа данных о структуре поднимаемой конструкции и условного разделения на отсеки, с которыми соединены тросы. При условии близости узла троса к центру тяжести отсека конструкции минимизируются ошибки оценок максимальных сил растяжения тросов $q_j, j = 1, \dots, n$. В результате такого анализа можно получить достоверные данные о силах q_j для суждения о прочности конструкции, подвешенной на тросах.

Волнение поверхности воды приводит к вынужденным колебаниям платформы и связанных с ней домкратов, что вызывает изменение сил натяжения тросов из-за инерции конструкции. Для уменьшения сил инерции принято компенсировать колебания платформы изменением длины тросов так, чтобы конструкция сохраняла свое положение относительно глобальной системы координат. Это осуществляется путем перемещения рамы с домкратом относительно платформы. Таким образом, каждый исполнительный механизм (ИМ) представляет систему с двумя степенями свободы: одна степень – перемещение домкратом узла с последующей намоткой троса, а вторая – вертикальное перемещение рамы, на которой закреплен домкрат.

Конечно, выполнение этих условий подъема можно реализовать лишь на основе управляющего комплекса, в состав которого входят ЭВМ, системы измерений усилий в тросах, положения конструкции и вынужденного движения платформы. Отметим, что подобные проблемы возникают при проведении испытаний на прочность конструкций самолетов, деформируемых штоками гидроцилиндров [3–6]. Отличие лишь в том, что поднимаемая конструкция и платформа, как правило, обладают столь большой жесткостью, что можно считать их абсолютно жесткими. Кроме того, в задачах подъема тел в некоторых случаях необходимо учитывать силы инерции конструкции и платформы, что приводит к достаточно сложным уравнениям состояния системы управления процессом подъема.

УРАВНЕНИЯ СТАТИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ

Платформа связана с конструкцией системой тросов, силы растяжения в которых зависят от перемещений узлов домкратами по направлению оси y . Усилия q_j в тросах, если их число больше двух, определим на основе метода

перемещений. Введем обозначения: ξ_j, x_j – координаты узлов троса на конструкции и платформе; s_j – перемещение узла домкратом, положительное в направлении оси y . Перемещение платформы и конструкции как жестких тел определим компонентами векторов:

$$\mathbf{B} = \begin{Bmatrix} V_0 \\ \Theta \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{\beta} = \begin{Bmatrix} v_0 \\ \theta \end{Bmatrix}.$$

Здесь V_0 – вертикальное перемещение начала локальной системы координат платформы x, y, z относительно поверхности воды Γ_1 ; Θ – угол между осями x и X ; v_0 – проекция начала осей координат ξ, η, ζ на ось Y , определяет положение конструкции; θ – угол между осями ξ и X . Для вертикальных перемещений произвольных точек осей x, ξ имеем

$$V = V_0 + x \sin \Theta, \quad v = v_0 + \xi \sin \theta.$$

В случае малых углов $|\theta| \ll 1, |\Theta| \ll 1$ перемещения представим в виде $V = \{1 \ x\} \mathbf{B}, v = \{1 \ \xi\} \mathbf{\beta}$. Определим положение платформы на поверхности воды под действием собственного веса и веса тросов вектором $\mathbf{B}_0 = \{V_{00} \ \Theta_0\}^T$, аналогично зададим положение конструкции на дне под действием собственного веса $\mathbf{\beta}_0 = \{v_{00} \ \theta_0\}^T$. Примем условие: усилие в тросе равно нулю $q_j = 0$, если в начальном положении платформы и конструкции перемещение узла исполнительным механизмом равно нулю $s_j = 0, j = 1, 2, \dots, n$.

Выразим перемещения узлов троса на платформе и конструкции для малых углов:

$$V_j = s_j + \{1 \ x_j\} \{\mathbf{B} - \mathbf{B}_0\}, \quad v_j = \{1 \ \xi_j\} \{\mathbf{\beta} - \mathbf{\beta}_0\}. \quad (1)$$

Условие совместности перемещения узлов троса имеет вид

$$V_j - v_j = \delta s_j, \quad (2)$$

где δs_j – это сумма: упругое удлинение троса j и «упругое перемещение рамы» с домкратом от действия силы q_j . Выражение «упругое перемещение рамы» означает, что перемещение рамы δ_j зависит от величины силы растяжения троса q_j в соответствии с уравнением состояния интегрального звена:

$$\frac{d\delta_j}{dt} = a(q_j - k_{0j} \delta_j),$$

где величина a определена свойствами механизма перемещения рамы. Для установившегося процесса параметр k_{0j} характеризует «жесткость рамы».

Отметим, что трос и «жесткость» рамы k_{0j} соединены последовательно, поэтому их податливости суммируются, и зависимость силы от удлинения можно записать в виде

$$q_j = k_j \delta s_j, \quad k_j^{-1} = 1 / k_{0j} + (l_j - s_j) / EF. \quad (3)$$

Здесь k_j – фиктивная жесткость, которая меньше жесткости троса $EF / (l_j - s_j)$, l_j – длина троса перед началом подъема. Усилия в тросах q_j определим из (3) и условий совместности перемещений платформы и конструкции (2) и (1):

$$q_j = k_j (s_j + \{1 \quad x_j\} \{\mathbf{B} - \mathbf{B}_0\} - \{1 \quad \xi_j\} \{\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta}_0\}), \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

Из формул (4) и (1) следует, что усилия в тросах равны нулю, если $s_j = 0$, $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0$, $\boldsymbol{\beta} = \boldsymbol{\beta}_0$. Отметим, что силы q_j не могут принимать отрицательных значений, так при сжатии происходит потеря устойчивости троса. Однако, в выводе уравнений равновесия это свойство троса не учитывается, так как при подъеме тел большой массы при нормальном функционировании системы управления усилия всегда растягивающие. Введем векторы-столбцы перемещений узлов тросов \mathbf{s} , усилий \mathbf{q} , матриц $\boldsymbol{\lambda}$ и $\boldsymbol{\Lambda}$:

$$\mathbf{s} = \begin{Bmatrix} s_1 \\ \dots \\ s_n \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{q} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ \dots \\ q_n \end{Bmatrix}, \quad \boldsymbol{\lambda} = \begin{bmatrix} 1 & \xi_1 \\ \dots & \dots \\ 1 & \xi_n \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\Lambda} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ \dots & \dots \\ 1 & x_n \end{bmatrix}.$$

Теперь усилия в тросах \mathbf{q} (4) преобразуем, используя операции с матрицами:

$$\mathbf{q} = \mathbf{D}_k \{ \mathbf{s} + \boldsymbol{\Lambda} \{\mathbf{B} - \mathbf{B}_0\} - \boldsymbol{\lambda} \{\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta}_0\} \}. \quad (5)$$

Здесь \mathbf{D}_k – диагональная матрица с элементами k_j . Введенные матрицы $\boldsymbol{\lambda}$, $\boldsymbol{\Lambda}$ отличаются лишь смещением начала координат локальных осей, поэтому выполняются равенства $x_j - x_i = \xi_j - \xi_i$. Начальная длина троса перед началом подъема l_j в формуле для жесткости троса определена расстоянием между узлами с координатами x_j на платформе и ξ_j конструкции:

$$l_j = l_0 + \{1 \quad x_j\} \{\mathbf{B} - \mathbf{B}_0\} - \{1 \quad \xi_j\} \{\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta}_0\}.$$

Здесь параметр l_0 – проекция начала координат осей x, y на ось Y с добавлением расстояния от оси x до узла троса j . Положение конструкции на грунте $\boldsymbol{\beta}_0$ зависит от распределения веса по отсекам конструкции и жесткости грунта. Для изучения алгоритма подъема конструкции примем допущение, что взаимодействие конструкции с грунтом определяется упругими связями жесткостью κ_j , расположенными на поверхности грунта Γ_0 . Эту по-

верхность определяет вектор-столбец $\beta_1 = \{v_{01} \quad \theta_1\}^T$. Здесь v_{01} – проекция на ось Y начала координат локальной системы ξ, η при начальном касании конструкции поверхности грунта, а θ_1 – угол между осями ξ и X . При подъеме тела из положения на грунте β_0 следует учесть в уравнениях равновесия реакции введенных связей. Примем, что один узел упругой связи закреплен на конструкции в точке с координатой $\xi = \chi_j, j=1,2,\dots,m$, а другой неподвижен на поверхности Γ_0 в точке, определенной проекцией координаты χ_j на ось X . Направление локальных осей координат связи примем от конструкции к грунту. Поэтому усилия взаимодействия представим формулой, аналогичной (4):

$$p_j = \kappa_j \{1 \quad \chi_j\} \{\beta - \beta_1\}, \quad j=1,2,\dots,m.$$

Здесь $\beta - \beta_1$ – изменение положения конструкции относительно поверхности Γ_0 . Отметим, что при перемещении из начального положения β_0 усилие p_j изменяется от сжатия до растяжения, что определяет разрыв связи с грунтом в этом узле. Поэтому жесткость связи определяет знак силы p_j :

$$\kappa_j = \begin{cases} \kappa_{0j}, & \text{если } p_j < 0, \\ 0, & \text{если } p_j \geq 0. \end{cases} \quad (6)$$

Здесь κ_{0j} – жесткость грунта. Введем обозначения вектора \mathbf{p} и матрицы μ :

$$\mathbf{p} = \begin{Bmatrix} p_1 \\ \dots \\ p_m \end{Bmatrix}, \quad \mu = \begin{bmatrix} 1 & \chi_1 \\ \dots & \dots \\ 1 & \chi_m \end{bmatrix}.$$

Представим усилия взаимодействия конструкции с грунтом в виде

$$\mathbf{p} = \Phi_{\kappa} \mu \{\beta - \beta_1\}. \quad (7)$$

Здесь Φ_{κ} – диагональная матрица с элементами κ_j .

Суммируя все силы и моменты, действующие на поднимаемую конструкцию, получим уравнения равновесия

$$\lambda^T \mathbf{q} - \mu^T \mathbf{p} + \mathbf{G} = 0. \quad (8)$$

Введены обозначения: $\mathbf{G} = \begin{Bmatrix} Q_{\eta} \\ M_{\xi} \end{Bmatrix}$ – вектор-столбец внешних сил, Q_{η} и M_{ξ} –

равнодействующая внешних сил и момент. В расчетах принято, что компоненты \mathbf{G} определены весом конструкции с учетом сил выталкивания воды.

На платформу действуют равнодействующая внешних сил и момент $\mathbf{R} = \begin{Bmatrix} Q_y \\ M_z \end{Bmatrix}$, заданные в локальной системе координат x, y, z , силы растяжения тросов \mathbf{q} , сила и момент от давления воды. Действие воды представим в виде произведения двух матриц $-\mathbf{CB}$. Матрица \mathbf{C} определена законом Архимеда и зависит от формы подводной части платформы, матрица \mathbf{B} определяет ориентацию платформы относительно глобальной системы координат (1). Уравнения равновесия платформы запишем в виде

$$-\Lambda^T \mathbf{q} - \mathbf{CB} + \mathbf{R} = 0. \quad (9)$$

Равновесие платформы под действием только сил собственного веса Q_y и момента M_z относительно начала координат согласно (9) удовлетворяет уравнению

$$-\mathbf{CB}_0 + \mathbf{R} = 0.$$

Решение уравнения имеет вид $\mathbf{B}_0 = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{R}$. Исключим из уравнения равновесия платформы (9) вектор-столбец \mathbf{R} :

$$-\Lambda^T \mathbf{q} - \mathbf{C}(\mathbf{B} - \mathbf{B}_0) = 0. \quad (10)$$

Следовательно, изменение положения платформы $\mathbf{B} - \mathbf{B}_0$ определено только усилиями взаимодействия \mathbf{q} . В начальный момент времени положение поднимаемой конструкции на грунте определено параметром β_0 . Вес конструкции уравнивают только упругие связи опор, поэтому усилия в тросах равны нулю ($\mathbf{q} = 0$). В этом случае из уравнений (8) следуют уравнения равновесия конструкции, покоящейся на грунте:

$$-\mu^T \mathbf{p} + \mathbf{G} = 0. \quad (11)$$

Подставив (7) в (11) и учитывая, что в состоянии покоя конструкции на грунте $\beta = \beta_0$, находим параметр β_0 :

$$\beta_0 = \beta_1 + [\mu^T \Phi_{\kappa} \mu]^{-1} \mathbf{G}. \quad (12)$$

Для этого положения конструкции ранее в (1) были приняты начальные перемещения узлов домкратами $\mathbf{s} = 0$. Уравнения равновесия конструкции (8) совместно с уравнением равновесия платформы (10) определяют усилия в тросах в процессе перемещения конструкции из положения β_0 до отделения от грунта. При этом выполняются условия (6) для вычисления жесткостей κ_j .

Алгоритм управления подъемом конструкции удовлетворяет двум условиям: подъем конструкции происходит почти без ускорений с постоянной скоростью так, что выполняются уравнения статического равновесия, силы

растяжения каждого троса не превосходят заданных максимальных значений. Для формирования уравнений процесса подъема введем параметры: q_j^P – максимальная сила растяжения троса j , определяемая весом отсека конструкции; $\mathbf{p}^P = \{v_0^P(t) \quad \theta^P(t)\}^T$ – вектор-столбец планируемого в каждый момент времени t положения конструкции. Здесь $v_0^P(t)$ – перемещение начала координат по оси Y и $\theta^P(t)$ – угол между осями X и ξ . Определим упругие удлинения тросов $\delta s_j^P = k_j^{-1} q_j^P$ и образуем векторы-столбцы:

$$\mathbf{q}^P = \begin{Bmatrix} q_1^P \\ \dots \\ q_n^P \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{s}^P = \begin{Bmatrix} s_1^P \\ \dots \\ s_n^P \end{Bmatrix}, \quad \delta \mathbf{s}^P = \begin{Bmatrix} \delta s_1^P \\ \dots \\ \delta s_n^P \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{p}^P = \begin{Bmatrix} v_0^P(t) \\ \theta^P(t) \end{Bmatrix}. \quad (13)$$

Элементы вектора-столбца \mathbf{s}^P образованы планируемыми перемещениями узлов троса исполнительными механизмами. Отметим, что компоненты \mathbf{p}^P в начальный момент времени $t=0$ удовлетворяют условию $\mathbf{p}^P = \mathbf{p}_0$. Планируемые перемещения узлов троса на платформе учитывают перемещение конструкции и усилия в тросах:

$$\mathbf{s}^P = \lambda \mathbf{p}^P + \mathbf{D}_k^{-1} \mathbf{q}^P.$$

Компоненты вектора-столбца \mathbf{s}^P соответствуют начальному положению \mathbf{p}_0 и выражаются через функции $v_0^P(t)$, $\theta^P(t)$, определяющие перемещение конструкции в процессе подъема. Примем, что свойства исполнительных механизмов можно описать дифференциальными уравнениями вида

$$\frac{ds_j}{dt} = c_j U_j, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (14)$$

Здесь U_j – управляющие сигналы; c_j – коэффициенты, определяющие скорости перемещения троса при задании единичного управляющего сигнала. В работе [5] показано, что для исполнительных механизмов релейного типа можно принять допущение (14) для изучения переходных процессов, задавая с подобранной частотой интервалы времени действия каждого механизма. Отметим, что в системе СИ коэффициенты c_j малы. В задачах статического равновесия перейдем к безразмерному времени τ , выбирая в качестве единицы времени $t_m = 1 \text{ м} / c_{j \max}$. Тогда $\tau = t / t_m$, а система уравнений (14) примет вид

$$\frac{ds_j}{d\tau} = \bar{c}_j U_j, \quad \bar{c}_j = c_j 1 / c_{j \max}, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (15)$$

В этих уравнениях размерность параметров $\bar{c}_j - [\text{м}]$, и эти величины не превосходят единицу. Сформулируем алгоритм управления процессом подъема: в каждый момент времени скорость $ds_j / d\tau$ пропорциональна перемещению Δs_j для устранения разностей планируемых и фактических сил в тросах и параметров положения тела в пространстве (ошибок управления):

$$\delta q_j = q_j^P - q_j, \quad \delta v_0 = v_0^P - v_0, \quad \delta \theta = \theta^P - \theta.$$

Заменим разность δq_j упругим удлинением троса и образуем сумму Δs_j для управления перемещениями узлов:

$$\Delta s_j = a_j k_j^{-1} \delta q_j + b_j (\delta v_0 + \xi_j \delta \theta). \quad (16)$$

Здесь a_j, b_j – элементы диагональных матриц Φ_a, Φ_b , значения которых уточняют при отладке программы на основе принятого критерия минимизации ошибок управления. Из формул (15), (16) получим уравнения состояния, которые описывают процесс подъема:

$$\frac{ds}{d\tau} = \Phi_a \{s^P - s\} + \Phi_b \lambda \{\beta^P - \beta\}. \quad (17)$$

Здесь β^P – вектор-столбец планируемых параметров положения конструкции в процессе подъема (13). Параметры вектора-столбца β определены уравнениями равновесия (8), (10), перемещения s – это результат численного решения системы дифференциальных уравнений (14).

Получена полная система уравнений управления процессом подъема конструкции: n уравнений для определения перемещений узлов в соответствии с планируемыми параметрами и уравнения равновесия (8), (10) – равенство нулю сил и моментов, действующих на платформу и конструкцию, для вычисления компонент векторов \mathbf{B} и β . Единственность решения обеспечивается заданием начальных условий. В момент времени $\tau=0$ заданы параметры: $\beta = \beta_0, \mathbf{B} = \mathbf{B}_0$. Из условия (5) и $\mathbf{q}=0$ следует $\mathbf{s}=0$.

После отделения конструкции от грунта реакции опор равны нулю ($\mathbf{p}=0$) и система уравнений равновесия (8), (10) принимает вид

$$\lambda^T \mathbf{q} + \mathbf{G} = 0, \quad -\Lambda^T \mathbf{q} - \mathbf{C}(\mathbf{B} - \mathbf{B}_0) = 0. \quad (18)$$

ПРИМЕР ПОДЪЕМА КОНСТРУКЦИИ

Изучим частный случай решения уравнений равновесия для выявления зависимости векторов \mathbf{B}, β от перемещений узлов домкратами. Примем, что начала локальных осей координат расположены на одной вертикали. Тогда для малых углов имеем $x_j = \xi_j$, что приводит к равенству $\lambda = \Lambda$. Это условие не упрощает решения задачи, а лишь позволяет в более наглядной форме установить связь параметров \mathbf{B}, β и перемещений узлов \mathbf{s} . Преобразуем

уравнения равновесия (8), (10) с учетом формул (5), (7) и принятого равенства $\lambda = \Lambda$:

$$C(\mathbf{B} - \mathbf{B}_0) = \mathbf{G} - \mathbf{K}_\mu \{\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta}_1\}, \quad (19)$$

$$\lambda^T \mathbf{D}_k \mathbf{s} + (\mathbf{K}_\lambda \mathbf{C}^{-1} \mathbf{G} + \mathbf{G}) - [\mathbf{K}_\mu + \mathbf{K}_\lambda \mathbf{C}^{-1} \mathbf{K}_\mu] (\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta}_1) - \mathbf{K}_\lambda (\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta}_0) = 0. \quad (20)$$

Здесь $\mathbf{K}_\lambda = \lambda^T \mathbf{D}_k \lambda$, $\mathbf{K}_\mu = \mu^T \Phi_\kappa \mu$. Уравнения (19), (20) определяют связь между параметрами $\boldsymbol{\beta}$, \mathbf{B} и перемещениями узлов \mathbf{s} . После отделения конструкции от грунта (6) жесткости опор равны нулю ($\kappa_j = 0$), что приводит к простым уравнениям равновесия для выражения зависимости векторов $\boldsymbol{\beta}$, \mathbf{B} от перемещений \mathbf{s} :

$$C(\mathbf{B} - \mathbf{B}_0) = \mathbf{G}, \quad \lambda^T \mathbf{D}_k \mathbf{s} + (\mathbf{K}_\lambda \mathbf{C}^{-1} \mathbf{G} + \mathbf{G}) - \mathbf{K}_\lambda (\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta}_0) = 0.$$

Обратная задача – вычислить компоненты \mathbf{s} – имеет решение только для числа тросов $n=2$. В общем случае $n > 2$ можно определить компоненты \mathbf{s} только заданием перемещений узлов в виде $\mathbf{s} = \lambda \boldsymbol{\beta}(\tau)$. Например, для перемещения конструкции из положения на грунте $\boldsymbol{\beta}_0$ в положение отрыва от грунта $\boldsymbol{\beta}_1$ компоненты \mathbf{s} можно задать в виде перемещения жесткого тела:

$$\mathbf{s} = \lambda \{\boldsymbol{\beta}_0 + \{\boldsymbol{\beta}_1 - \boldsymbol{\beta}_0\} f\}. \quad (21)$$

Здесь f – функция, которая за конечное время изменяется от нуля до единицы и затем остается постоянной. Отметим, что значение $\boldsymbol{\beta}_0$ соответствует начальному положению конструкции. Таким образом, задачу подъема конструкции разделим на два этапа. В первом выполняется перемещение из положения $\boldsymbol{\beta}_0$ в $\boldsymbol{\beta}_1$. Отметим, если перемещение из начального положения произвольное, то следует выполнять условие (6) для жесткостей опор. Если же конструкция перемещена точно в положении $\boldsymbol{\beta}_1$, то это означает, что реакция поверхности грунта равна нулю ($\mathbf{p} = 0$) и конструкция поддерживается только силами натяжения тросов. В этом случае дальнейший подъем конструкции определен уравнениями равновесия (8), (10):

$$\lambda^T \mathbf{q} + \mathbf{G} = 0, \quad -\Lambda \mathbf{q} - C(\mathbf{B} - \mathbf{B}_0) = 0.$$

Зададим в соответствии с рекомендацией (21) планируемые параметры перемещения узлов из положения $\boldsymbol{\beta}_0$ в положение $\boldsymbol{\beta}_1$ за время $\Delta\tau = 40$:

$$\mathbf{s}^p = \lambda \{\boldsymbol{\beta}_0 + \{\boldsymbol{\beta}_1 - \boldsymbol{\beta}_0\} f_1(\tau)\}.$$

Здесь $f_1(\tau) = \begin{cases} \tau / 40, & \text{если } 0 \leq \tau \leq 40 \\ 1, & \text{если } \tau \geq 40 \end{cases}$ – линейная функция времени до момен-

та времени $\tau_1 = 40$, затем равна единице. На первом этапе управление силами натяжения тросов не предусмотрено. Поэтому уравнения управления подъемом (17) представим в виде

$$\frac{ds}{d\tau} = \Phi_a \{s^p - s\}.$$

Здесь Φ_a – диагональная матрица, элементы которой уточняются в процессе отладки программного комплекса. Начальные условия выполнены: в момент времени $\tau=0$ перемещения $s=0$.

Во втором этапе выполняется управление усилиями в тросах и перемещением конструкции. Поэтому уравнения состояния процесса управления подъемом конструкции имеют вид (17)

$$\frac{ds}{d\tau} = \Phi_a \{s^p - s\} + \Phi_b \lambda \{\beta^p - \beta\}.$$

В момент $\tau=\tau_1$ известно положение конструкции $\beta=\beta_1$ и, следовательно, определены начальные перемещения узлов $s=\lambda\beta_1$.

Свойства алгоритма управления покажем на примере подъема конструкции с параметрами: длина конструкции 70 м, $Q_\eta = -6,75 \cdot 10^6$ Н, $M_\zeta = 2,9 \cdot 10^5$ Н·м. Полагаем, что поднимаемая конструкция представлена девятью блоками, их веса в воде и координаты центров тяжести приведены в табл. 1.

Таблица 1

Веса и координаты блоков конструкции

Номер блока j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Координаты центров тяжести ξ_j , м	-32	-24	-16	-8	0,1	8	16	24	32
Силы в тросах $q_j^p \cdot 10^5$ Н	5	7	7	9,5	11	9	7	7	5

В табл. 2 заданы координаты узлов конструкции и жесткости опор.

Таблица 2

Жесткости опор грунта

Номер опоры j	1	2	3	4	5	6	7
Координаты x_j , м	-30	-20	-10	0	10	20	30
Жесткость опор 10^5 Н/м	4	4	8	8	8	4	4

Первый этап подъема – это перемещение конструкции с учетом реакций упругих опор из положения на грунте $\beta_0^T = \{-1,69 \quad 0,0507\}$ в положение отрыва от грунта $\beta_1^T = \{0 \quad 0,0500\}$. На поверхности грунта β_1 реакции опор обращаются в нуль и не влияют на дальнейший процесс перемещения тела. При произвольном же подъеме конструкции из положения β_0 следует выполнять условия (6) для жесткостей опор. Отметим, что полученные перемещения узлов $\lambda \cdot \beta$ незначительно отличаются от значений $\lambda \cdot \beta_1$, соответствующих отрыву от грунта.

Из расчетов следует, что к моменту времени $\tau = 50$ переходные процессы в системе управления завершаются, и это состояние принято как начальное для второго этапа подъема конструкции. Перемещения узлов и величины усилий в тросах приводят к выводу: на первом этапе подъема в одинаковые моменты времени силы растяжения в тросах практически совпадают и изменяются по линейному закону, достигая максимальных значений порядка $7,53 \cdot 10^5$.

Изгибающие моменты, действующие на конструкцию, показаны на рис. 2. Форма эпюры определена реакцией грунта и весами отсеков. Из-за жестких опор грунта в зоне центра тяжести конструкции моменты достигают значений порядка $-5 \cdot 10^6$ Н·м.

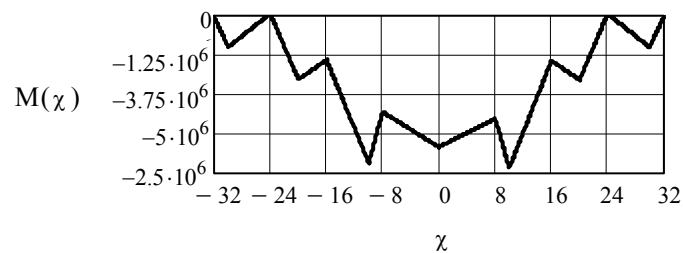


Рис. 2. Эпюра моментов

Для второго этапа планируемое перемещение конструкции примем в виде

$$\beta^p = \begin{Bmatrix} lp \\ \theta p \end{Bmatrix} f_2(\tau) - \beta_1 f_2(\tau) + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0,2 \cdot \phi(\tau) \end{Bmatrix}, \quad lp = 110 \text{ м}, \quad \theta p = 0.$$

Функция $\phi(\tau)$ равна нулю вне диапазона $[60 \ 110]$, а внутри диапазона задана формулой $\phi(\tau) = 0,2 \sin 2\pi(\tau - 60) / 50$. Функция f_2 определена условиями:

$$f_2(\tau) = \begin{cases} 0, & \text{если } \tau < 50 \\ (\tau - 50) / 110, & \text{если } 50 \leq \tau \leq 160 \\ 1, & \text{если } \tau > 160 \end{cases}.$$

Планируемые перемещения узлов домкратами заданы функцией

$$\mathbf{s}^P(\tau) = \lambda \mathbf{\beta}^P - \Lambda(\mathbf{B} - \mathbf{B}_0) + [\mathbf{v}50(1 - f_2(\tau)) + \mathbf{v}p0 \cdot f_2(\tau)].$$

Здесь приняты обозначения: $\mathbf{v}50$ – вектор-столбец перемещений узлов в момент времени $\tau = 50$, $\mathbf{v}p0 = \mathbf{D}_k^{-1} \mathbf{q}^P$ – вектор-столбец упругих удлинений тросов. Выравнивание конструкции и вращение относительно оси ζ после отрыва от поверхности дна, заданное функцией $\phi(\tau)$, показано на рис. 3. Здесь перемещение по оси Y соответствует параметру $\mathbf{\beta}^P$ и завершается примерно к моменту времени $\tau = 160$. На рис. 4 показано изменение усилий в тросах во времени. Обозначение $q0(\tau)$ – это усилия в тросах на первом этапе подъема. Во втором этапе $\tau \geq 50$ силы натяжения изменяются и достигают программных значений q_j^P , заданных в табл. 1. Равенство сил натяжения весу отсечков приводит к существенному уменьшению изгибающих моментов, действующих на конструкцию после освобождения от связей, определяющих свойства грунта. Моменты уменьшились на три порядка.

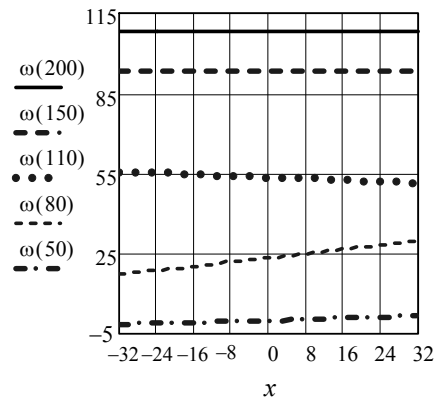


Рис. 3. Положение конструкции

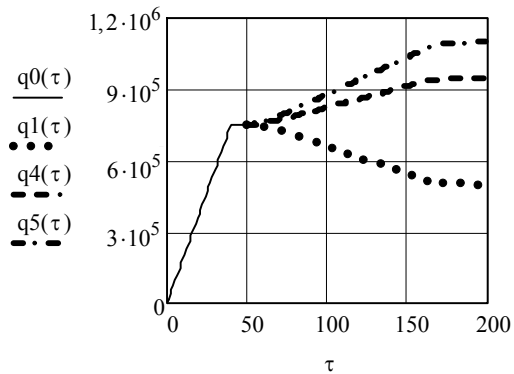


Рис. 4. Усилия в тросах

УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ

Изучим движение платформы и конструкции в плоскости XU . Узловые точки этих тел связаны между собой системой тросов, узлы которых перемещают исполнительные механизмы. В этих точках конструкции и платформы действуют силы растяжения тросов, силы инерции отсеков, силы сопротивления, пропорциональные скорости, и внешние силы \mathbf{R} и \mathbf{G} . Для жестких тел перемещения узловых точек на платформе и конструкции выражены формулами (1):

$$V_j = s_j + \{1 \quad x_j\} \{\mathbf{B} - \mathbf{B}_0\}, \quad v_j = \{1 \quad \xi_j\} \{\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta}_0\}.$$

Здесь $\mathbf{B}_0 = -\mathbf{C}^{-1}\mathbf{R}$ – положение платформы относительно поверхности воды (8) под действием только собственного веса; $\boldsymbol{\beta}_0$ – положение конструкции на дне при условии отсутствия усилий в тросах $\mathbf{q} = 0$.

Вывод уравнений движения системы тел выполним на основе принципа возможных перемещений: работа внутренних сил на возможных перемещениях равна работе поверхностных сил на тех же перемещениях:

$$\delta W = \delta A.$$

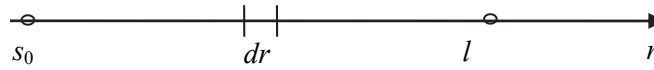


Рис. 5. Трос и система координат

Вычислим работу внутренних сил для троса j на возможных перемещениях $\delta V_j, \delta v_j$. Для вычисления δW введем локальную систему координат r , связанную с тросом j . На рис. 5 приняты обозначения: s_0 – проекция узла на ось η ; l – проекция узла троса на ось Y на платформе. Трос в системе подъема конструкции представляет упругое тело. Запишем уравнение равновесия бесконечно малого элемента троса с учетом веса на единицу длины γ :

$$\frac{dq_j}{dr} - \gamma = 0.$$

Пусть δv – возможное перемещение произвольной точки троса. Тогда работу внутренних сил троса выразим интегралом

$$\delta W_j = \int_{s_0}^l \left(\frac{d\delta v}{dr} q_j + \delta v \frac{dq_j}{dr} \right) dr. \quad (22)$$

Трос будем считать телом с двумя степенями свободы V_j, v_j . Перемещения точек троса v и δv выразим линейными функциями r :

$$v = \frac{r-s_0}{l-s_0} V_j + \frac{l-r}{l-s_0} v_j, \quad \delta v = \frac{r-s_0}{l-s_0} \delta V_j + \frac{l-r}{l-s_0} \delta v_j.$$

Приведем результат вычисления работы внутренних сил (22):

$$\delta W_j = \left\{ \delta V_j \quad \delta v_j \right\} \left\{ k_j \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_j \\ v_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \frac{\gamma(l-s_0)}{2} \right\}.$$

Первое слагаемое в скобках определяет узловые силы, вызванные растяжением $V_j - v_j$, а второе учитывает вес троса. Вес поднимаемой конструкции превосходит вес троса на несколько порядков. Поэтому в выражении δW_j исключим вес троса. Работа внутренних сил всей системы тросов на возможных перемещениях определена суммой $\delta W = \sum_1^n \delta W_j$. Полагая перемещения троса s_j исполнительными механизмами заданными параметрами, установим, что $\delta V_j = \{1 \quad x_j\} \delta \mathbf{B}$ и $\delta v_j = \{1 \quad \xi_j\} \delta \mathbf{\beta}$. Поэтому сумму работ внутренних сил запишем в виде

$$\delta W = \delta \mathbf{B}^T \Lambda^T \mathbf{q} - \delta \mathbf{\beta}^T \lambda^T \mathbf{q}.$$

Для жесткой конструкции и платформы работу поверхностных сил (силы инерции, вязкого трения, веса, взаимодействия с грунтом и водой) на возможных перемещениях представим в виде

$$\begin{aligned} \delta A = & \delta \mathbf{\beta}^T \lambda^T \{ -\mathbf{D}_m \lambda \ddot{\mathbf{\beta}} - \mathbf{D}_h \lambda \dot{\mathbf{\beta}} \} - \delta \mathbf{\beta}^T \mu^T \mathbf{p} + \delta \mathbf{\beta}^T \mathbf{G} + \\ & + \delta \mathbf{B}^T \Lambda^T \{ -\mathbf{D}_M \Lambda \ddot{\mathbf{B}} - \mathbf{D}_H \Lambda \dot{\mathbf{B}} - \mathbf{C}(\mathbf{B} - \mathbf{B}_0) \}. \end{aligned}$$

Из принципа возможных перемещений и линейной независимости компонент векторов $\delta \mathbf{\beta}$, $\delta \mathbf{B}$ следуют уравнения движения платформы и конструкции:

$$\lambda^T \mathbf{q} - \lambda^T \mathbf{D}_m \lambda \frac{d^2 \mathbf{\beta}}{dt^2} - \lambda^T \mathbf{D}_h \lambda \frac{d \mathbf{\beta}}{dt} - \mu^T \mathbf{p} + \mathbf{G} = 0; \quad (23)$$

$$-\Lambda^T \mathbf{q} - \Lambda^T \mathbf{D}_M \Lambda \frac{d^2 \mathbf{B}}{dt^2} - \Lambda^T \mathbf{D}_H \Lambda \frac{d \mathbf{B}}{dt} - \mathbf{C}(\mathbf{B} - \mathbf{B}_0) = 0. \quad (24)$$

Силы взаимодействия конструкции с поверхностью дна определены уравнением (7) и условиями (6). В уравнения движения (23), (24) введены матрицы второго порядка $\lambda^T \mathbf{D}_m \lambda$, $\Lambda^T \mathbf{D}_M \Lambda$, $\Lambda^T \mathbf{D}_H \Lambda$ и $\lambda^T \mathbf{D}_h \lambda$, которые определяют силы инерции и демпфирование. Здесь \mathbf{D}_m , \mathbf{D}_h и \mathbf{D}_M , \mathbf{D}_H – диагональные матрицы с элементами m_j , h_j и M_j , H_j , характеризующие массы и силы сопротивления отсеков конструкции и платформы в узловых точках.

Условия совместности перемещений узловых точек на платформе и конструкции определяют усилия в тросах (4):

$$\mathbf{q} = \mathbf{D}_k \{ \mathbf{s} + \Lambda \{ \mathbf{B} - \mathbf{B}_0 \} - \lambda \{ \boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta}_0 \} \}.$$

Управление параметрами состояния в соответствии с планируемыми данными осуществляют исполнительные механизмы. Примем допущение, что и в задачах динамики исполнительные механизмы являются интегральными звеньями:

$$\frac{ds}{dt} = \Phi_a \{ \mathbf{s}^p - \mathbf{s} \} + \Phi_b \lambda \{ \boldsymbol{\beta}^p - \boldsymbol{\beta} \}. \quad (25)$$

Таким образом, получена полная система уравнений движения платформы и поднимаемой конструкции (23)–(25).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована задача управления подъемом конструкций массой порядка тысячи тонн гидравлическими домкратами и системой тросов. Разработан алгоритм управления процессом подъема и положением конструкции в пространстве с реализацией планируемых усилий в тросах. Результаты численного исследования взаимосвязи платформы с домкратами и конструкции подтвердили эффективность алгоритма. Получены уравнения движения для изучения неустановившихся процессов задач подъема тел.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Присекин В.Л., Расторгуев Г.И.* Алгоритм управления испытаниями конструкции самолета на прочность // Научный вестник НГТУ. – 2012. – № 1 (46). – С. 75–82.
2. *Присекин В.Л., Пустовой Н.В., Расторгуев Г.И.* Алгоритмы управления усталостными испытаниями самолетов // Прикладная механика и техническая физика. – 2014. – № 1. – С. 198–206.
3. Автоматическая система управления теплопрочностными испытаниями / В.Л. Присекин, Л.Е. Абакшина, Л.И. Абрамова, А.В. Иванов, А.Ф. Легомин, И.А. Старикин, В.И. Стыцук // НИИ экономики и планирования ГОАП: информационный бюллетень отраслевого фонда. – 1978. – № 7. – С. 53–59.
4. *Присекин В.Л.* Влияние упругости конструкции на синхронность нагружения в испытательном стенде // Динамика и прочность авиационных конструкций: межвузовский сборник научных трудов. – Новосибирск: НЭТИ, 1986. – С. 113–118.
5. *Присекин В.Л.* Основные уравнения системы нагружения конструкции в испытательных стендах // Динамика и прочность авиационных конструкций: межвузовский сборник научных трудов. – Новосибирск: НЭТИ, 1990. – С. 55–61.
6. Компьютерная модель систем стенда и самолета для испытаний на прочность / В.Л. Присекин, Н.В. Пустовой, А.И. Белоусов, Ю.Б. Нигирич // Научный вестник НГТУ. – 1996. – № 2. – С. 79–88.
7. *Присекин В.Л., Белоусов А.И.* Уравнения состояния систем стенда для испытаний на прочность // Прикладные проблемы механики тонкостенных конструкций. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. – С. 24–34.
8. *Присекин В.Л., Расторгуев Г.И., Белоусов А.И.* Вычисление матрицы податливости по данным эксперимента // Избранные проблемы прочности современного машиностроения: сборник научных статей, посвященных 85-летию Э.И. Григорюка (1923–2005). – М.: Физматлит, 2008. – С. 56–60.

9. Авраамов Н.Ю., Подвысоцкий Б.В., Иосса А.А. Морская практика. Ч. 4. – М.: Военмориздат, 1939. – 164 с.
10. Краморенко А.В., Асмилин В.В. Подъем большого противолодочного корабля «Очаков» // Морской сборник. – 2015. – Т. 2018, № 5. – С. 56–63.
11. Барсуков В.Д., Басалаев С.А., Голдаев С.В. Возможность обеспечения регулируемой продувки балластной цистерны понтона газогенератором // Известия вузов. Физика. – 2008. – № 12/2. – С. 31–35.
12. Моделирование подъема затонувших предметов при продувке понтона управляемым открытым твердотопливным газогенератором / В.Д. Барсуков, С.В. Голдаев, С.А. Басалаев, Н.А. Бабушкин // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2016. – № 1 (39). – С. 57–68.
13. Справочник по расчетам при судоподъеме. – М.: Воениздат, 2005. – 480 с.
14. Патент 2479461 Российская Федерация. Система подъема затонувшего судна / В.Н. Белозеров, И.Б. Бирюлин, А.А. Ветрова, Б.И. Школьник. – Зарег. 20.04.2013.
15. Горз Д.Н. Подъем затонувших кораблей: пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1978. – 352 с.

Присекин Виктор Леонтьевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Прочность летательных аппаратов» Новосибирского государственного технического университета, автор более 90 научных работ, в том числе четырех учебных пособий, специалист в области механики деформируемого твердого тела и прочности летательных аппаратов. E-mail: priseking@gmail.com

Расторгуев Геннадий Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры «Прочность летательных аппаратов» Новосибирского государственного технического университета, автор более 70 научных работ, специалист в области механики деформируемого твердого тела и прочности летательных аппаратов. E-mail: rastorguev@adm.nstu.ru

A control algorithm of lifting structures^{*}

*V.L. PRISEKIN*¹, *G.I. RASTORGUEV*²

¹ *Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), professor, aircraft strength department. E-mail: priseking@gmail.com:*

² *Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), professor, aircraft strength department. E-mail: rastorguev@adm.nstu.ru*

Static equilibrium equations to solve the control problem of lifting structures weighing thousands of tons by using a system of hoist cables and hydraulic jacks installed on the floating platform are derived. A control algorithm of lifting with due regard to the interaction of the platform, a hoist cable system and the structure is studied in the paper. An algorithm to control the lifting process and the structure position in space with implementing the planned stresses in cables is also proposed. The derivation of motion equations to study transient processes in the control system of lifting bodies and to solve dynamics problems is also described. The results of numerical study of the interaction of the platform with jacks and the structure confirmed the efficiency of the proposed algorithm.

Keywords: control algorithm, lifting, floating platform, hydraulic jacks, structure

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-4-146-163

^{*} Received 02 September 2016.

REFERENCES

1. Prisekin V.L., Rastorguev G.I. Algoritmy upravleniya ispytaniyami konstruktssii samoleta na prochnost' [Control algorithm testing of aircraft structure strength]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2012, no. 1 (46), pp. 75–82.
2. Prisekin V.L., Pustovoi N.V., Rastorguev G.I. Algoritmy upravleniya ustalostnyimi ispytaniyami samoletov [Algorithms for controlling fatigue tests of airplanes]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2014, no. 1, pp. 198–206. (In Russian)
3. Prisekin V.L., Abakshina L.E., Abramova L.I., Ivanov A.V., Legomin A.F., Starikin I.A., Stytsyuk V.I. Avtomaticheskaya sistema upravleniya teploprochnostnyimi ispytaniyami [Automatic teploprochnostnyimi trials management system]. *NII ekonomiki i planirovaniya GOAP: informatsionnyi byulleten' otraslevogo fonda* [Research Institute of Economy and Planning EPAU. Newsletter sector fund], 1978, no. 7, pp. 53–59.
4. Prisekin V.L. [Effect of elastic design of synchronous loading in the test bench]. *Dinamika i prochnost' aviatsionnykh konstruktssii* [Dynamics and strength of aircraft structures]. Novosibirsk, 1986, pp. 113–118. (In Russian)
5. Prisekin V.L. [Basic equations design loading system test benches]. *Dinamika i prochnost' aviatsionnykh konstruktssii* [Dynamics and strength of aircraft structures]. Novosibirsk, 1990, pp. 55–61. (In Russian)
6. Prisekin V.L., Pustovoi N.V., Belousov A.I., Nigirich Yu.B. Komp'yuternaya model' sistem stenda i samoleta dlya ispytaniy na prochnost' [Computer model of aircraft systems and stand for the strength tests]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 1996, no. 2, pp. 79–88.
7. Prisekin V.L., Belousov A.I. Uravneniya sostoyaniya sistem stenda dlya ispytaniy na prochnost' [The equation of state of systems of the test stand for durability]. *Prikladnye problemy mekhaniki tonkostennykh konstruktssii* [Applied problems of mechanics of thin-walled structures]. Moscow, MSU Publ., 2000, pp. 24–34.
8. Prisekin V.L., Rastorguev G.I., Belousov A.I. Vychislenie matritsy podatlivosti po dannym eksperimenta [The calculation of the matrix of compliance according to the experiment]. *Izbrannye problemy prochnosti sovremennogo mashinostroeniya: sbornik nauchnykh statei, posvyashchennykh 85-letiyu E.I. Grigolyuka (1923–2005)* [Selected problems of modern engineering strength: collection of scientific articles devoted to the 85th anniversary of E.I. Grigolyuk (1923–2005)]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, pp. 56–60.
9. Avraamov N.Yu., Podvysotskii B.V., Iossa A.A. *Morskaya praktika*. Ch. 4 [Seamanship. Pt. 4]. Moscow, Voenmorizdat Publ., 1939. 164 p.
10. Kramorenko A.V., Asmilin V.V. Pod'em bol'shogo protivolodochnogo korablya "Ochakov" [Large antisubmarine ship "Ochakov" shipraising]. *Morskoi sbornik – Collected naval issues*, 2015, vol. 2018, no. 5, pp. 56–63.
11. Barsukov V.D., Basalaev S.A., Goldaev S.V. Vozmozhnost' obespecheniya reguliruemoi produvki ballastnoi tsisterny pontona gazogeneratorom [The ability to provide an adjustable purge gas generator pontoon ballast tank]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika – Russian Physics Journal*, 2008, no. 12-2, pp. 31–35. (In Russian)
12. Barsukov V.D., Goldaev S.V., Basalaev S.A., Babushkin N.A. Modelirovanie pod'ema zatонувших predmetov pri produvke pontona upravlyaemym otkrytym tverdotoplivnym gazogeneratorom [Simulating the recovery of sunken objects by blowing the pontoon by a controllable solid fuel gas generator]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*, 2016, no. 1 (39), pp. 57–68.
13. *Spravochnik po raschetam pri sudopod'eme* [Handbook is estimated at salvaging]. Moscow, Voenizdat Publ., 2005. 480 p.
14. Belozarov V.N., Biryulin I.B., Vetrova A.A., Shkol'nik B.I. Sistema pod'ema zatонувшего sudna [Sunk ship lifting system]. Patent RF, no. 2479461, 2013.
15. Gores J.N. *Marine salvage*. Newton Abbot: David & Charles, 1971 (Russ. ed.: Gorz D.N. *Pod'em zatонувших korablei*. Translated from English. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1978. 352 p.).