

УДК 621.81+674

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.103

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОЛЕБАНИЙ ГРУЗОВОЙ ПОДВЕСКИ ЛЕСОТРАНСПОРТНОЙ АЭРОСТАТНО-КАНАТНОЙ СИСТЕМЫ

А.В. Абузов, д-р техн. наук, проф.

П.Б. Рябухин, д-р техн. наук, проф.

Тихоокеанский государственный университет, ул. Тихоокеанская, д. 136,

г. Хабаровск, Россия, 680042; e-mail: ac-systems@mail.ru, PRyabukhin@mail.khstu.ru

Одним из основных факторов, сдерживающих в Дальневосточном федеральном округе увеличение объемов лесозаготовок, проводимых в горной местности, является сложность технологического процесса первичной транспортировки древесины от точки заготовки до места складирования и погрузки. Около 30 % лесных площадей, на которых произрастает качественный и спелый древостой, находятся именно на склонах с крутизной свыше 20°, где традиционная техника либо не в состоянии вести заготовку древесины, либо выполняет ее с большими затратами и явными экологическими нарушениями. Опыт применения аэростатных систем транспортировки древесины доказал их технологическую и лесоводственную эффективность. Однако способ выборочного изъятия отдельно растущих деревьев требует дополнительного и разностороннего исследования, так как связан с конструктивными и технологическими особенностями аэростатных систем, в первую очередь с функционированием грузовой подвески и захватного механизма. Проведены практические и теоретические исследования процесса колебаний, возникающих в грузовой подвеске трехлинейной аэростатно-канатной системы, предназначенной для вертикального изъятия деревьев с их последующей транспортировкой. Разработана математическая модель, описывающая равновесие точки стыковки канатов аэростатно-канатной системы и ее перемещения при приложении произвольных нагрузок. С помощью полученной зависимости можно определять параметры колебаний трех взаимосвязанных точек грузовой подвески системы в различных условиях эксплуатации и в любое время ее функционирования. Установление расчетных значений параметров колебательного процесса грузовой подвески и, соответственно, отклонений грузозахватного механизма от точки захвата дерева позволяет выполнять проектирование технических параметров грузо-захватных и лебедочных механизмов, предназначенных для процесса воздушной транспортировки (трелевки) древесины, с достаточно высокой степенью точности. На основании полученных результатов можно при выборочной заготовке леса более эффективно использовать технологические и конструктивные особенности аэро-статно-канатных систем.

Ключевые слова: воздушная трелевка, аэростатно-канатная система, колебание и натяжение грузового каната, моделирование процесса колебаний.

Для цитирования: Абузов А.В., Рябухин П.Б. Исследование процесса колебаний грузовой подвески лесотранспортной аэростатно-канатной системы // Лесн. журн. 2018. № 3. С. 103–116. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.103

Введение

В настоящее время лесозаготовительные операции планомерно смещаются с наиболее доступных лесных территорий на лесосеки с характерными признаками труднодоступности и экологической зависимости, с наличием рек, озер и болот, как правило, окруженных горными склонами с резким перепадом высот. Поэтому характер технологических процессов, связанных с заготовкой древесины на крутых склонах, требует внедрения новых прогрессивных технологий, обеспечивающих не только минимальное экологическое воздействие, но и оперативный режим транспортировки древесины в зоне сильно пересеченного рельефа с наличием водных препятствий.

Анализ современных исследований в области лесопользования показал, что к технологическим системам лесозаготовительного процесса, способным без серьезных экологических последствий совмещать возможность выборочного изъятия деревьев и эффективную работу на крутых склонах с преодолением водных преград, могут относиться канатные лесотранспортные системы на базе аэростатических конструкций [1, 2, 15].

В результате натурных испытаний (2002 г., Хабаровский край) конструкции аэростатно-канатной системы (АКС) МТА-500, предназначенной для воздушной трелевки древесины на труднодоступных лесных участках, установлено несколько ключевых эксплуатационных закономерностей, влияющих на эффективность функционирования системы. Это привело к необходимости проведения дополнительного объема практических и теоретических исследований, связанных с более детальным изучением процесса колебаний грузовой подвески аэростата [4].

Цель исследования – разработка математической модели для определения параметров колебательного процесса, возникающего в трех рабочих точках грузовой подвески АКС, с учетом их взаимного влияния друг на друга, что позволяет обеспечивать высокую степень точности наведения грузовой подвески на предмет труда.

Объекты и методы исследования

Как показали результаты натурных испытаний, напряжения удерживающих канатов, а следовательно, и их влияние на поведение в пространстве точки подвеса груза могут меняться в течение не только смены, но и одного рабочего цикла (например, в процессе движения аэростата вверх или вниз над склоном). Подобная ситуация приводит к тому, что грузовая подвеска АКС начинает совершать колебания одновременно в различных плоскостях, в связи с чем грузозахватный механизм (ГЗМ) отклоняется от точки местонахождения груза на значительное расстояние.

Из ранее проведенных исследований [3, 4, 6, 8] известно, что процесс колебаний подвески зависит от ряда факторов, которые могут изменяться как независимо, так и в полном взаимодействии и дополнении друг друга:

- подъемная сила аэростата F_a , Н;
- температура окружающей среды T , °С;
- высота подъема аэростата над уровнем моря H , м;
- рейсовая нагрузка аэростата Q_p , кг;
- скорость ветра v_b , м/с;

направление ветра (угол ветровой атаки) φ , ... °;
 направление движения аэростата ψ ;
 траектория перемещения аэростата;
 скорости перемещения аэростата при различных режимах (холостой–
 рабочий) $v_{\text{хол}}$, $v_{\text{раб}}$, м/с;
 скоростной напор q_0 , Н/м²;
 результирующая нагрузка R , Н;
 вертикальная нагрузка, действующая на аэростат, Q_y , Н;
 горизонтальная нагрузка, действующая на аэростат, Q_x (зависит от
 скоростного напора и воздушного потока), Н;
 скорость выбирания аэростата лебедкой $v_{\text{выб}}$, м/с;
 скорость опускания грузозахватного механизма $v_{\text{ог}}$, м/с;
 скорость подъема груза (дерева) $v_{\text{п.г.}}$, м/с;
 сила лобового сопротивления кроны дерева F_k , Н/м².

Особенность колебательных процессов, возникающих в грузовой подвеске АКС, заключается во взаимно-системном влиянии трех нагруженных точек A , F , L (точек приложения силы) друг на друга. Структурная схема исследуемой трелевочной системы АКС-5, учитывающая трехмерное расположение исследуемых точек, представлена на рис. 1.

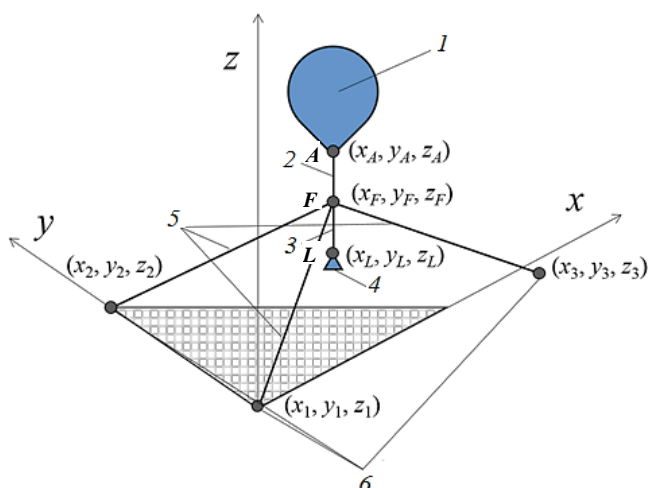


Рис. 1. Структурная схема аэростатно-канатной системы: 1 – аэростат; 2 – канат верхней подвески; 3 – канат грузовой подвески; 4 – грузозахватный механизм; 5 – тягово-возвратные канаты; 6 – направляющие концевые блоки для канатов

Установлено, что каждая отдельная точка может оказывать периодическое влияние на соседнюю точку не зависимо от третьей, что приводит к повторяющемуся изменению положения точек A , F , L относительно координат x , y , z . При этом все три точки за счет периодически изменяющихся параметров системы могут иметь несколько степеней свободы не только относительно друг друга, но и относительно вертикально стоящего дерева.

В процессе перемещения аэростата за счет сдавания и выбирания канатов, соединяющихся в т. F , данная точка будет являться ведущей. Тогда за

счет кинетической энергии и приложения внешней нагрузки (при лобовом сопротивлении аэростата) через гибкие нити FA и FL будет оказываться влияние на верхнюю и нижнюю точки системы (A и L), которые в данный момент являются ведомыми с наличием углов отклонения.

При состоянии неподвижности системы или ее технологической остановке (после перемещения и приложения внешней силы) роли точек в системе меняются. Точка A становится ведущей, а т. F – ведомой, что имеет принципиальное значение для точности наведения ГЗМ, который с учетом кинематики процесса ассоциируется с нижней т. L .

Отклонение аэростата от намеченной траектории при действии постоянного ветрового потока можно компенсировать сдаванием и выбором канатов наземных лебедок. Но на процесс выполнения управляющих воздействий на АКС могут оказывать негативное влияние возникающие кратковременные резкие порывы ветра (особенно вертикальные нисходящие). При этом происходит не только увеличение прогибов удерживающих канатов (и, соответственно, смещение т. F), но и возникают вибрационные процессы в системе, приводящие к колебаниям нижней части подвески FL с захватным механизмом.

Высокая степень сложности процесса колебаний, возникающего в подвеске АКС, потребовала разработки специального алгоритма, в котором должны быть отражены все частные случаи взаимодействия элементов АКС с внешними действующими факторами.

Результаты исследования и их обсуждение

Для конкретного исследуемого случая рассмотрим элементы каната в подвеске АКС как упруго-вязкие элементы с жесткостью k и коэффициентом демпфирования b . За счет этого можно одновременно учитывать как растяжение канатов, так и влияние на развитие колебаний системы возникающего явления диссипации энергии [11–13]. Для расчета коэффициента b , находящегося под действием вертикальной нагрузки, с учетом деформации в вертикальной плоскости от воздействия процесса растяжение–сжатие, предложена следующая зависимость:

$$b = 2\zeta m \omega_n, \quad (1)$$

где ζ – коэффициент, определяемый в соответствии с логарифмическим декрементом колебаний по пиковым значениям натяжения каната;

m – масса каната;

ω_n – собственная частота колебаний каната.

Для построения аппроксимирующей зависимости влияния ветровой нагрузки на аэростат (в виде функции второго порядка) было рассмотрено три угла ветровой атаки АКС:

0° – ветер обдувает аэростат сверху;

90° – ветер действует в плоскости, параллельной горизонту;

180° – ветер направлен снизу.

Соответственно, площадь наветренной части аэростата, влияющая на лобовое сопротивление и нагрузку в целом, также будет различной.

Тогда зависимость площади наветренной поверхности аэростата от угла ветровой атаки φ представим в виде линейной функции:

$$S_n(\varphi) = 2,4607\varphi + 508,87. \quad (2)$$

Для исследования поведения отдельного каната, нагруженного произвольной распределенной нагрузкой, используем уравнение, описывающее равновесие гибкой нити:

$$\frac{d^2 Z(X)}{dX^2} = \frac{q(X)}{H}, \quad (3)$$

где H – распор, кН.

При необходимости учета нагрузок (например, ветровой или любой другой внешней нагрузки, в том числе от веса снега либо капель дождя), носящих переменный характер по длине каната, воспользуемся следующими зависимостями:

$$q(X) = aX + b; \quad (4)$$

$$q(X) = a \exp(bX), \quad (5)$$

где a, b – числовые коэффициенты, значения которых зависят от интенсивности нагрузки.

С учетом погонной массы каната и ветровой нагрузки, зависящей от скорости ветра, имеем:

$$\bar{q}(X) = \frac{1}{2\sqrt{2}} \rho C_d d_\tau X f_\varphi v^2(X) + \frac{pgX}{100};$$

$$v(X) = 0,0333X; \quad q(X) = \frac{d\bar{q}(X)}{dX}, \quad (6)$$

где C_d – коэффициент лобового сопротивления аэростата, для аэростатов луковичного типа $C_d = 0,5$;

d_τ – диаметр троса (каната), мм;

f_φ и v – коэффициент учета угла атаки ветра и его скорость, м/с.

После ряда дополнительных преобразований получим трансцендентное уравнение, задающее длину каната в деформированном состоянии в зависимости от величины распора и внешней нагрузки:

$$\left\{ \begin{aligned} L &= \frac{(-b^4 H^2 l^2 - a^2 e^{2bl} + 2a^2 e^{bl}) \ln A_4 - \{a(e^{bl} - 1) \ln A_5 + Hb^2 l(A_2 - A_3)\} b^2 l A_1 H}{b^5 H^2 A_1 l^2}; \\ L &= \frac{H}{kb} \left(f_1 - f_2 - \operatorname{arctanh} \frac{1}{f_1} + \operatorname{arctanh} \frac{1}{f_2} \right) + l; \\ A_1 &= \frac{\sqrt{b^4 H^2 l^2 + e^{2bl} a^2 - 2e^{bl} a^2 + a^2}}{b^2 H l}; \\ A_2 &= \frac{\sqrt{e^{2bl} a^2 - 2e^{bl} a^2 (bl + 1) + a^2 (bl + 1)^2 + b^4 H^2 l^2}}{b^2 H l}; \\ A_3 &= \frac{\sqrt{e^{2bl} a^2 (bl - 1)^2 - 2e^{bl} a^2 (bl - 1) + a^2 + b^4 H^2 l^2}}{b^2 H l}; \\ A_4 &= \frac{-a^2 (bl - 1) e^{2bl} + a^2 (bl - 2) e^{bl} + a^2 + b^4 H^2 l^2 (A_1 A_3 + 1)}{\{a^2 e^{2bl} - a^2 (bl + 2) e^{bl} + a^2 (bl + 1) + b^4 H^2 l^2 (A_1 A_2 + 1)\} e^{bl}}; \\ A_5 &= \frac{a(bl - 1) e^{bl} + A_3 b^2 l H + a}{A_2 b^2 l H + a bl - a e^{bl} + a}; \end{aligned} \right. \quad (7)$$

$$f_1 = \sqrt{1 + \{a \exp(bl)/H\}^2};$$

$$f_2 = \sqrt{1 + \{a/H\}^2}. \quad (7)$$

При составлении математической модели для исследования колебательных процессов в АКС необходимо учитывать, что нагрузка на элементы системы (аэростат, грузозахватный механизм, тягово-возвратные канаты, канаты подвески) может быть различной как по величине, так и по направлению.

Реакции V_A , V_B определим из условия равновесия гибкой нити [9, 10] (рис. 2).

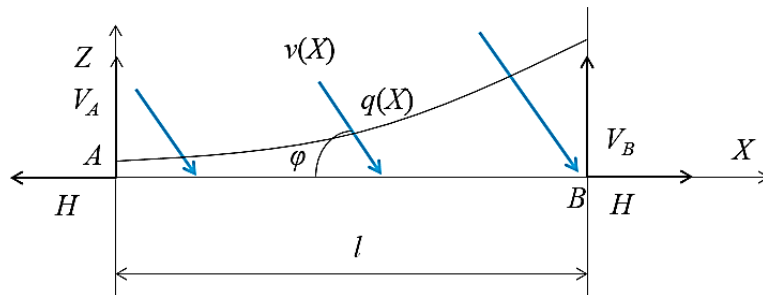


Рис. 2. Расчетная схема гибкой нити

Тогда:

$$V_B = \frac{1}{l} \int_0^l X q(X) dX = \frac{a(e^{bl} bl - e^{bl} + 1)}{b^2 l}; \quad (8)$$

$$V_A = \int_0^l q(X) dX - \frac{1}{l} \int_0^l X q(X) dX = \frac{a}{b}(e^{bl} - 1) - \frac{a}{b^2 l}(e^{bl} bl - e^{bl} + 1). \quad (9)$$

Рассчитаем проекции силы H на оси z , x , y :

$$H_{iz} = H_i \sin \gamma_{iz}; \quad (10)$$

$$H_{ix} = H_i \cos \gamma_{iz} \cos \gamma_{ix}; \quad (11)$$

$$H_{iy} = H_i \cos \gamma_{iz} \sin \gamma_{ix}. \quad (12)$$

Угол γ в уравнениях зависит от положения точки соединения канатов АКС и является переменной величиной, зависящей от прикладываемой нагрузки.

Дополнительно определим усилия, возникающие в канатах за счет смещения точки их соединения в случае деформирования канатов под действием подъемной силы аэростата либо за счет внешнего усилия, действующего на аэростат и передающегося через верхнюю подвеску.

Определим проекции длины канатов на их собственные направления в недеформированном состоянии:

$$l_{1F} = \sqrt{(x_F - x_1)^2 + (y_F - y_1)^2 + (z_F - z_1)^2}; \quad (13)$$

$$l_{2F} = \sqrt{(x_F - x_2)^2 + (y_F - y_2)^2 + (z_F - z_2)^2}; \quad (14)$$

$$l_{3F} = \sqrt{(x_F - x_3)^2 + (y_F - y_3)^2 + (z_F - z_3)^2}, \quad (15)$$

где x_F, y_F, z_F – координаты точки соединения тягово-возвратных канатов в неподвижной системе координат (переменные величины, подлежащие определению);

x_i, y_i, z_i – координаты точек соединения канатов с контурными шкивами у поверхности земли.

В связи с тем, что усилия растяжения пропорциональны удлинениям, запишем:

$$N_1 = \frac{l_{1F} - l_{10}}{l_{10}} k_1; \quad (16)$$

$$N_2 = \frac{l_{2F} - l_{20}}{l_{20}} k_2; \quad (17)$$

$$N_3 = \frac{l_{3F} - l_{30}}{l_{30}} k_3, \quad (18)$$

где l_{i0} – длина канатов в недеформированном состоянии;

k_i – жесткость канатов.

Смоделируем процесс колебаний грузовой подвески аэростата. Введем дополнительные обозначения:

$$F_x = V_{1Bx} + V_{2Bx} + V_{3Bx} + H_{1Bx} + H_{2Bx} + H_{3Bx} + S_x; \quad (19)$$

$$F_y = V_{1By} + V_{2By} + V_{3By} + H_{1By} + H_{2By} + H_{3By} + S_y; \quad (20)$$

$$F_z = V_{1Bz} + V_{2Bz} + V_{3Bz} + H_{1Bz} + H_{2Bz} + H_{3Bz} + S_z. \quad (21)$$

Здесь S_x, S_y, S_z – компоненты дополнительных внешних нагрузок (подъемная сила аэростата F_a ; ветровое воздействие на аэростат, передаваемое верхней подвеской, F_v ; вес перемещаемого груза и вес грузоподъемного устройства; сопротивление среды при перемещении аэростата и т. д.) задаются в качестве исходных данных по осям x, y, z неподвижной системы координат x_{uz} .

Таким образом, все внешние нагрузки на АКС приводятся к ортогональным проекциям на оси неподвижной системы координат x_{uz} , приложенным к точке стыковки тросов.

Систему уравнений, описывающих равновесие точки стыковки канатов аэростата, равно как и ее перемещения при приложении произвольных нагрузок, представим в виде уравнений равновесия:

$$\begin{cases} \cos \gamma_{1x} N_1 \text{He}(N_1) + \cos \gamma_{2x} N_2 \text{He}(N_2) + \cos \gamma_{3x} N_3 \text{He}(N_3) = F_x; \\ \cos \gamma_{1y} N_1 \text{He}(N_1) + \cos \gamma_{2y} N_2 \text{He}(N_2) + \cos \gamma_{3y} N_3 \text{He}(N_3) = F_y; \\ \cos \gamma_{1z} N_1 \text{He}(N_1) + \cos \gamma_{2z} N_2 \text{He}(N_2) + \cos \gamma_{3z} N_3 \text{He}(N_3) = F_z. \end{cases} \quad (22)$$

В систему (22) введены единичные функции Хевисайда ($\text{He}(\xi) = 0$ при $\xi < 0$; $\text{He}(\xi) = 1$ при $\xi \geq 0$), таким образом можно предположить, что канаты не сопротивляются осевому сжатию.

С помощью системы уравнений (22) можно получить решение и обратной задачи по определению значений напряжений N_1, N_2, N_3 при варьировании перемещений точек x_F, y_F, z_F с учетом действующих внешних факторов, задающихся в виде исходных данных.

Полученные по результатам решения системы математические модели для определения ортогональных перемещений точки соединения канатов в зависимости от направлений и интенсивностей воздействия могут быть использованы при расчете колебаний грузовой подвески АКС.

Схема для расчета колебаний представлена на рис. 3.

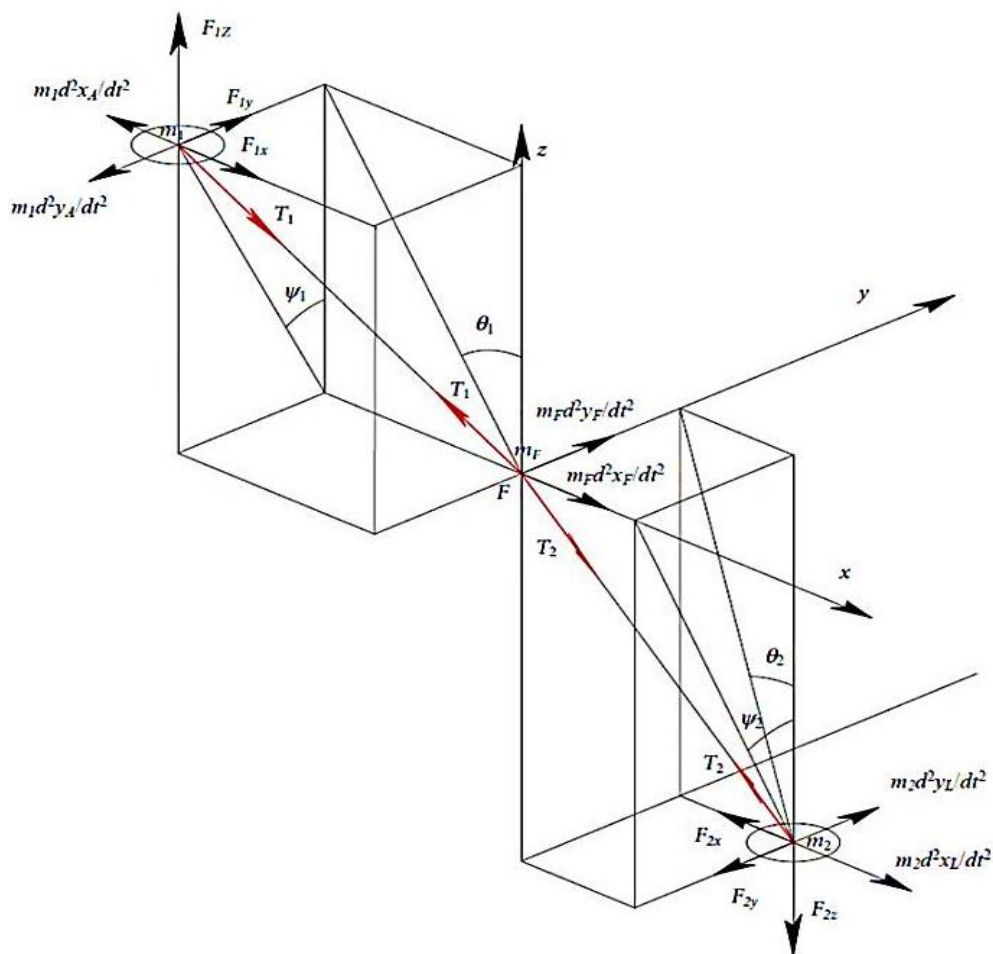


Рис. 3. Рабочая схема для расчета колебаний грузовой подвески АКС

Для расчета параметров колебаний грузовой подвески АКС составлена и решена система нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка, которая в общем виде записывается следующим образом:

$$m_1 \frac{d^2 x_A}{dt^2} + n_1 \frac{dx_A}{dt} + T_1 \sin \theta_1 = F_{1x};$$

$$m_F \frac{d^2 x_F}{dt^2} + n_F \frac{dx_F}{dt} + k_x x_F - T_1 \sin \theta_1 - T_2 \sin \theta_2 = F_x;$$

$$\begin{aligned}
m_2 \frac{d^2 x_L}{dt^2} + n_2 \frac{dx_L}{dt} + T_2 \sin \theta_2 &= F_{2x}; \\
m_1 \frac{d^2 y_A}{dt^2} + n_1 \frac{dy_A}{dt} + T_1 \sin \psi_1 &= F_{1y}; \\
m_F \frac{d^2 y_F}{dt^2} + n_F \frac{dy_F}{dt} + k_y y_F - T_1 \sin \psi_1 - T_2 \sin \psi_2 &= F_y; \\
m_2 \frac{d^2 y_L}{dt^2} + n_2 \frac{dy_L}{dt} + T_2 \sin \psi_2 &= F_{2y}; \\
T_1 = \frac{F_{1z}}{\cos \theta_1} = \frac{F_{1z}}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_1}}; T_2 = \frac{F_{2z}}{\cos \theta_2} = \frac{F_{2z}}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_2}}; \\
\sin \theta_1 = \frac{x_A - x_F}{l_1}; \sin \theta_2 = \frac{x_L - x_F}{l_2}; \\
\sin \psi_1 = \frac{y_A - y_F}{l_1}; \sin \psi_2 = \frac{y_L - y_F}{l_2}.
\end{aligned} \tag{23}$$

Здесь m_1 – масса аэростата;
 m_2 – масса грузозахватного механизма;
 m_F – масса бортовой лебедки, размещенной в точке подвеса (при отсутствии бортовой лебедки m_F принимается равной нулю);
 n_1, n_2 – коэффициенты демпфирования канатов верхней и нижней подвесок соответственно;
 n_F – коэффициент демпфирования тягово-возвратных канатов;
 l_1 – длина верхней подвески;
 l_2 – длина нижней подвески;
 F_{1x}, F_{1y}, F_{1z} – внешние нагрузки на аэростат (исходные данные);
 F_{2x}, F_{2y}, F_{2z} – внешние нагрузки на грузозахватный механизм (исходные данные);
 T_1, T_2 – натяжения каната (внутренние усилия) в верхней и нижней подвесках соответственно;
 $\psi_1, \psi_2, \theta_1, \theta_2$ – углы, характеризующие отклонения аэростата и грузозахватного механизма от положения точки подвеса.

Пример решения системы уравнений (23) был реализован в программном комплексе Maple [7, 14] и представлен в виде графиков (рис. 4), отражающих процесс изменения амплитуды колебаний грузовой подвески АКС при заданных условиях эксплуатации: масса ГЗМ – 500 кг; длина верхней подвески – 1 м; длина нижней подвески – 150 м; высота нахождения аэростата – 200 м; ветер восходящий порывистый по оси x , угол направления ветра – 30° к траектории движения аэростата; время действия порыва – 20 с; скорость ветра на уровне аэростата – 10 м/с, на уровне ГЗМ – 6 м/с; уклон обрабатываемой лесной площадки – 30° .

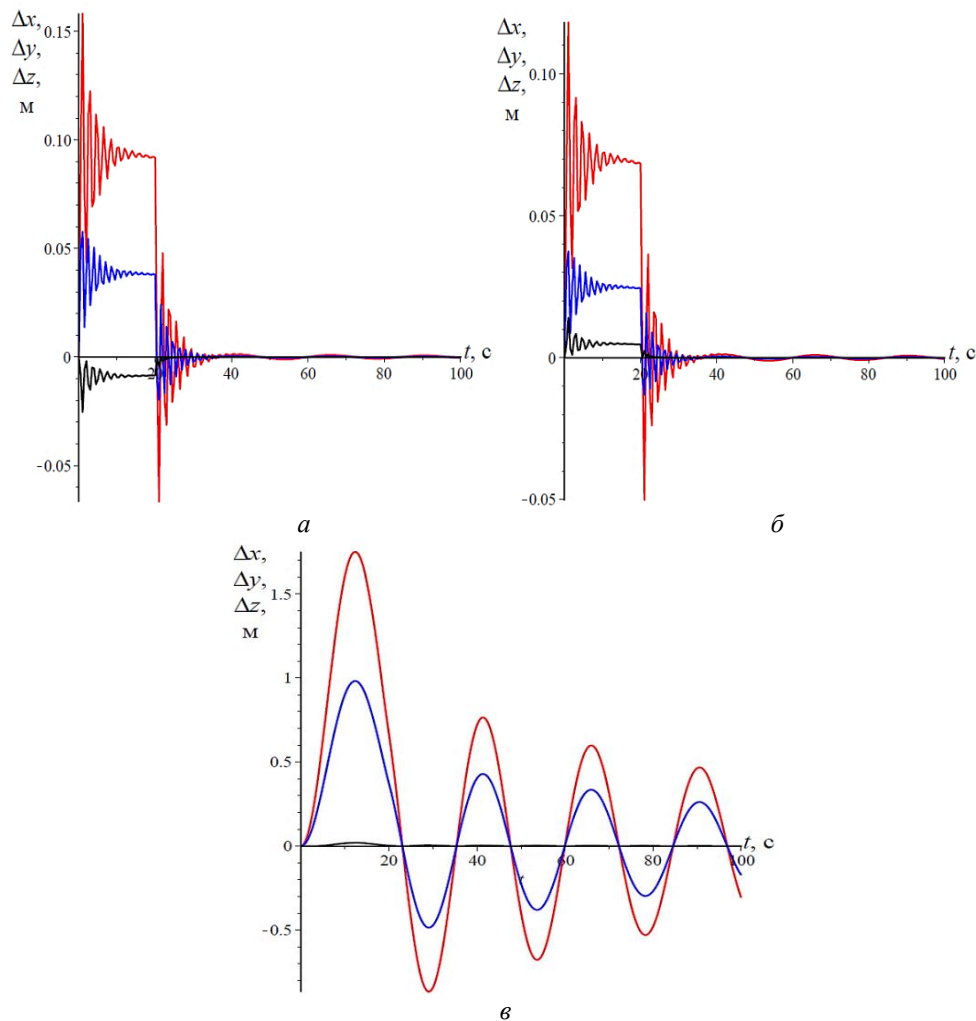


Рис. 4. Амплитуда колебаний системы при воздействии ветра в момент остановки над точкой загрузки: *а* – колебания аэростата; *б* – колебания точки стыковки канатов; *в* – колебания ГЗМ (черный цвет – колебания по оси z ; синий – по оси y ; красный – по оси x)

Выводы

1. Разработанная методика определения параметров колебаний трех взаимосвязанных точек грузовой подвески АКС позволяет описывать равновесие точки стыковки канатов АКС и ее перемещения при приложении произвольных нагрузок в различных условиях эксплуатации и в любое заданное время.

2. Уменьшение длины верхней части грузовой подвески не приводит к снижению амплитуды колебаний ее нижней составляющей с ГЗМ, при этом повышается их частота в точке крепления аэростата и подвеса (точка стыковки тягово-возвратных канатов).

3. Оптимальная длина нижней подвески для транспортной системы АКС-5 в пределах 100...150 м повышает устойчивость системы, снижает ам-

плитуду колебаний, но приводит к росту усилий в тягово-возвратных канатах системы, не достигая при этом их критических значений.

4. Уменьшение амплитуды и продолжительности колебаний в пределах 25...40 % происходит при использовании подвижной нижней подвески, на которой спуск и подъем ГЗМ осуществляются бортовой лебедкой, находящейся под оболочкой аэростата, что позволяет обеспечивать более точное и оперативное наведение (по сравнению с ГЗМ со свободной нижней подвеской, управляемой наземными лебедками и тягово-возвратными канатами).

5. Максимальная амплитуда колебаний свободной нижней подвески с ГЗМ массой 500 кг при критических условиях эксплуатации (порывы ветра от 14 до 18 м/с) находится в диапазоне от 1 до 6 м в течение 50...70 с; при благоприятных условиях (порывы ветра от 3 до 5 м/с) амплитуда колебаний находится в диапазоне от 0,3 до 1,2 м в течение 20...30 с.

6. При вертикальном изъятии дерева с использованием свободной нижней подвески длиной 100...150 м и скорости ветра не более 10 м/с максимальный диапазон отклонений ГЗМ составляет 1,2...1,8 м; при использовании подвижной нижней подвески с бортовой лебедкой, имеющей скорость опускания ГЗМ 1 м/с, максимальный диапазон отклонений (при тех же условиях эксплуатации) составляет 0,2...0,8 м.

7. Амплитуду и время колебаний ГЗМ можно снизить на 15...20 % за счет увеличения скорости опускания ГЗМ с помощью бортовой лебедки до 2 м/с, что повысит эффективность работы срезающего механизма в процессе удаления ветвей и сучьев со стоящего дерева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абузов А.В.* Агрэкология: формирование лесозаготовительных операций с учетом экологических требований // Инж. экология. № 1(103). 2012. С. 24–30.
2. *Абузов А.В.* Технические и конструктивные особенности современной аэростатно-канатной системы для трелевки древесины // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2013. № 1(93). С. 5–9.
3. *Абузов А.В.* Математическое моделирование основных параметров аэростатно-канатной системы для трелевки древесины АКС-5 // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 2(22). С. 136–140.
4. *Абузов А.В.* Методика определения усилий, возникающих в канатах трехлинейной аэростатно-канатной транспортной системы // Лесотехн. журн. 2014. Т. 4, № 3(15). С. 140–153.
5. *Абузов А.В., Бернотас Р.В.* Особенности лесозаготовительного процесса при вертикальном изъятии и транспортировке деревьев воздушным способом // Философия современного природопользования в бассейне реки Амур: сб. докл. междунар. экол. семинара, Хабаровск, 6–8 мая 2015 г. / под ред. П.Б. Рябухина. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. С. 67–70.
6. *Абузов А.В., Рябухин П.Б.* Аэростатный транспорт для горных лесозаготовок в условиях Дальнего Востока: моногр. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2013. 199 с.
7. *Голоскоков Д.П.* Уравнения математической физики. Решение задач в системе Maple. СПб.: Питер, 2004. 539 с.
8. *Козловский В.Б., Паршенцев С.А., Ефимов В.В.* Вертолет с грузом на внешней подвеске / под ред. В.Б. Козловского. М.: Машиностроение / Машиностроение-Полет, 2008. 304 с.

9. *Светлицкий В.А.* Механика абсолютно гибких стержней. М.: Изд-во МАИ, 2001. 432 с.
10. *Смирнов В.А.* Висячие мосты больших пролетов. М.: Высш. шк., 1970. 408 с.
11. *Aglietti G.S.* Dynamic Response of a High-Altitude Tethered Balloon System // Journal of Aircraft. 2009. Vol. 46, no. 6. Pp. 2032–2041.
12. *Lambert C.* Dynamics and Control of a Multi-Tethered Aerostat Positioning System. Monreal, Canada, 2006. 184 p. Available at: http://digitool.Library.McGill.CA:80/R/-?func=dbin-jump-full&object_id=1029_94&silos_library=GEN01 (дата обращения: 10.04.18).
13. *Lambert C., Nahon M.* An Aerostat Positioning System with Cable Control // Proc. 17th World Congress of the Intern. Federation of Automatic Control. Seoul, Korea, July 6–11, 2008. Seoul, Korea, 2008. 6 p.
14. *Monagan M.B., Geddes K.O., Heal K.M., Labahn G., Vorkoetter S.M., McCarron J., DeMarco P.* Maple Introductory Programming Guide. Canada: Maplesoft, 2007. 387 p.
15. *Wiley J.A.* Systems and Methods for Aerial Cabled Transportation. Patent US8205835B2. 2012.

Поступила 12.03.18

UDC 634.0.372:628.733.34

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.103

Investigation of Cargo Suspension Oscillations of the Timber-Hauling Aerial Logging System

A.V. Abuzov, Doctor of Engineering Sciences, Professor

P.B. Ryabukhin, Doctor of Engineering Sciences, Professor

Pacific National University, ul. Tikhookeanskaya, 136, Khabarovsk, 680042, Russian Federation; e-mail: ac-systems@mail.ru, PRyabukhin@mail.khstu.ru

One of the main factors constraining the increase in logging volumes in the Far Eastern Federal District in the steep terrain is the complexity of the technological process for primary wood transportation from the point of harvesting to the place of storage and loading. About 30 % of forest areas with a high quality and mature forest stand are located on slopes with the ratio over 20°, where traditional technology is either unable to harvest timber, or performs it with high costs and with clear ecological disturbance. The experience of the use of balloon systems of timber transportation has proved their technological and silvicultural efficiency. However, the method of selective removal of separately growing trees requires additional and comprehensive research, since it is associated with the structural and technological features of balloon systems, primarily with the functioning of a cargo suspension with a gripping mechanism. The paper presents the results of practical and theoretical studies of the oscillation process occurring in the cargo suspension of a trilinear aerial skidding system designed for vertical harvesting of trees with their subsequent transportation. A mathematical model describing the equilibrium of the point of joining of the aerial skidding system and its movement under arbitrary loads is developed. The dependence obtained allows determining the vibration parameters of three interconnected points of the system cargo suspension under various operating conditions and at any given

For citation: Abuzov A.V., Ryabukhin P.B. Investigation of Cargo Suspension Oscillations of the Timber-Hauling Aerial Logging System. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2018, no. 3, pp. 103–116. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.103

time. The calculated values of parameters of the oscillating process of the cargo suspension and the deviations of the load gripping mechanism from the point of tree getting, allow undertaking the design of technical parameters of load gripping and winch mechanisms intended for the air transportation of timber very accurately. On the basis of the obtained results, technological and constructive features of aerial skidding systems can be used in selective logging more efficiently.

Keywords: aerial logging, aerial skidding system, hauling cable oscillation and tension, oscillation process simulation.

REFERENCES

1. Abuzov A.V. Agroekologiya: formirovanie lesozagotovitel'nykh operatsiy s uchetom ekologicheskikh trebovaniy [Agroecology: the Formation of Ecologically Based Timber-Harvesting Operations]. *Inzhenernaya ekologiya* [Engineering Ecology], 2012, no. 1(103), pp. 24–30.
2. Abuzov A.V. Tekhnicheskie i konstruktivnye osobennosti sovremennoy aerostatno-kanatnoy sistemy dlya trelevki drevesiny [Technical and Design Features of the Modern Aero Stately Rope System of Delivery of Wood]. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2013, no. 1(93), pp. 5–9.
3. Abuzov A.V. Matematicheskoe modelirovanie osnovnykh parametrov aerostatno-kanatnoy sistemy dlya trelevki drevesiny AKS-5 [Mathematical Modelling of the Key Parameters of Aerial Skidding System AKS-5]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2014, no. 2(22), pp. 136–140.
4. Abuzov A.V. Metodika opredeleniya usilii, voznikayushchikh v kanatakh trekhlineynoy aerostatno-kanatnoy transportnoy sistemy [Method of Determining the Forces Arising in the Ropes of Trilinear Balloon-Cable Transport System]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2014, vol. 4, no. 3(15), pp. 140–153.
5. Abuzov A.V., Bernotas R.V. Osobennosti lesozagotovitel'nogo protsessa pri vertikal'nom iz'yatii i transportirovke dere'vev vozdushnym sposobom [Features of the Logging Process with Vertical Extraction and Transportation of Trees by Air]. *Filosofiya sovremennoy prirodepol'zovaniya v bassejne reki Amur: sb. dokl. mezhdunar. ekol. seminara, Khabarovsk, 6–8 maya 2015 g.* [Philosophy of Modern Nature Management in the Amur River Basin: Proc. Intern. Ecological Workshop, Khabarovsk, May 6–8, 2015]. Ed. by P.B. Ryabukhin. Khabarovsk, PNU Publ., 2015, pp. 67–70. (In Russ.)
6. Abuzov A.V., Ryabukhin P.B. *Aerostatnyy transport dlya gornykh lesozagotovok v usloviyakh Dal'nego Vostoka: monogr.* [Aerostat Transport for Mountain Logging in the Far East]. Khabarovsk, PNU Publ., 2013. 199 p. (In Russ.)
7. Goloskokov D.P. *Uravneniya matematicheskoy fiziki. Reshenie zadach v sisteme Maple* [Equations of Mathematical Physics. Problem-Solving in the Maple System]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2004. 539 p. (In Russ.)
8. Kozlovskiy V.B., Parshentsev S.A., Efimov V.V. *Vertolet s gruzom na vneshney podveske* [Helicopter with a Load on the External Suspension]. Ed. by V.B. Kozlovskiy. Moscow, Mashinostroenie / Mashinostroenie-Polet Publ., 2008. 304 p. (In Russ.)
9. Svetlitskiy V.A. *Mekhanika absolyutno gibkikh sterzhney* [Mechanics of Absolutely Slender Columns]. Moscow, MAI Publ., 2001. 432 p. (In Russ.)
10. Smirnov V.A. *Visyachie mosty bol'shikh proletov* [Cable Bridges of Large Spans]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1970. 408 p. (In Russ.)
11. Aglietti G.S. Dynamic Response of a High-Altitude Tethered Balloon System. *Journal of Aircraft*, 2009, vol. 46, no. 6, pp. 2032–2041.
12. Lambert C. *Dynamics and Control of a Multi-Tethered Aerostat Positioning System*. Monreal, Canada, 2006. 184 p. Available at: http://digitool.Library.McGill.CA: 80/R/?func=dbin-jump-full&object_id=1029_94&silos_library=GEN01 (accessed 10.04.2018).

13. Lambert C., Nahon M. An Aerostat Positioning System with Cable Control. *Proc. 17th World Congress of the Intern. Federation of Automatic Control. Seoul, Korea, July 6–11, 2008.* Seoul, Korea, 2008. 6 p.

14. Monagan M.B., Geddes K.O., Heal K.M., Labahn G., Vorkoetter S.M., McCarron J., DeMarco P. *Maple Introductory Programming Guide.* Canada, Maplesoft, 2007. 387 p.

15. Wiley J.A. *Systems and Methods for Aerial Cabled Transportation.* Patent US8205835B2, 2012.

Received on March 12, 2018
