

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВУХМАССОВОЙ АЭРОДРОМНОЙ БУКСИРОВОЧНОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УРАВНЕНИЙ КИНЕТОСТАТИКИ

Великанов А. В.

ФГКВБОУ ВПО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», (г. Воронеж)», Россия (394064, Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А), e-mail: vaiu@mil.ru

Проведен анализ взаимодействия двухмассовой аэродромной буксировочной системы тягач – воздушное судно авиационного комплекса с изменяемой точкой приложения горизонтальной связи между ними, выполненной в виде гидравлического цилиндра-амортизатора и вертикальной связью с регулируемой нагрузкой. Рассмотрены основные динамические процессы, протекающие при взаимодействии полноприводного аэродромного тягача – буксировщика, оборудованного автоматическим увеличителем сцепного веса и воздушного судна. Учитывались следующие характеристики буксировочной системы: симметричность в продольном направлении, оба объекта опираются на горизонтальное основание аэродромного покрытия через упруго-диссипативные элементы, сцепка объектов не накладывает геометрических ограничений на перемещение, догружающее устройство рассматривается как часть воздушного судна. Произведен выбор системы координат и составлена расчетная схема буксировочной системы. Анализ взаимодействия элементов системы позволил описать их равновесие уравнениями кинетостатики. Математическое преобразование уравнений позволило получить систему уравнений, моделирующую динамические изменения в процессе работы двухмассовой аэродромной буксировочной системы тягач – воздушное судно. Использование математической модели позволяет на стадии проектирования аэродромной буксировочной системы производить подбор её элементов с целью обеспечения рационального агрегатирования.

Ключевые слова: математическая модель, аэродромный тягач, летательный аппарат.

MATHEMATICAL MODEL OF TWO-MASS AIR FIELD TOWING SYSTEM WITH USE OF THE EQUATIONS OF KINETOSTATIKA

Velikanov A. V.

Military educational scientific center of Military and air forces «Military and air academy of a name of professor N. E. Zhukovskogo and Yu. A. Gagarin», (Voronezh)», Russia (394064, Voronezh, Starykh Bolshevikov St., 54A), e-mail: vaiu@mil.ru

The analysis of interaction of two-mass air field towing system the tractor - the aircraft of aviation complex is carried out. Complex has changeable appendix point of horizontal interaction between them, executed in the form of the hydraulic cylinder shock-absorber and vertical communication with adjustable loading. The main dynamic processes taking place while interaction between aircraft and all-wheel drive air field tractor – a tower of the coupling weight equipped with an automatic enlarger. The following characteristics of towing system were considered: longitudinal symmetry, both objects lean on the horizontal basis of an air field covering through elastic dissipative elements, hitch between them doesn't impose geometrical restrictions on the movement, loading device is considered to be part of the aircraft. The coordinate system and the settlement scheme of towing system were selected. Analysis of interaction between system elements allowed to describe their balance in terms of kinetostatical equations. Their mathematical conversion allowed to receive the system of the equations modeling dynamic changes in process of work of two-mass air field towing system the tractor - the aircraft. Use of mathematical model allows to make at a design stage of air field towing system selection of its elements for the purpose of providing a rational aggregation.

Keywords: mathematical model, the air field tractor, the flying device

Современный авиационный комплекс представляет собой совокупность систем и устройств, предназначенных для решения боевых, разведывательных, транспортных и других задач, в состав которых входят воздушные суда (ВС) и средства наземного обслуживания общего применения. Система средств наземного обслуживания общего применения предназначена для своевре-

менного и полного обеспечения всех видов подготовки и технического обслуживания ВС, их высокой боеготовности и боеспособности, что в значительной степени определяется наличием необходимых средств наземного обслуживания с высокими эксплуатационно-техническими характеристиками. Внедрение новых поколений воздушных судов на вооружение Военно-воздушных сил ставит ещё более высокие требования к системам авиационного комплекса [4].

В современных условиях особое значение приобретает повышение эффективности применения всего комплекса средств аэродромно-технического обеспечения (АТО) полётов, сокращение материальных и трудовых затрат на подготовку ВС к полётам, их обслуживание, хранение и бережение, что существенно влияет на боевую готовность. Обеспечение безопасности полётов неразрывно связано с состоянием, техническими характеристиками и возможностями средств АТО полётов, в частности, средств эвакуации и буксировки ВС. Роль этих средств при ведении боевых действий возрастает в ещё большей степени [5].

В то же время существующий в настоящее время методический аппарат не позволяет в полной мере проводить адекватную оценку эффективности использования разрабатываемых средств наземного транспортирования воздушных судов, что указывает на необходимость его модификации [3].

Конструкция обеспечивает эффективную всепогодную и всепогодную эксплуатацию буксировщика, представлена на рис. 1. Аэродромная буксировочная система с автоматически изменяемым сцепным весом, в зависимости от силы сопротивления качению ВС [1,2], содержит тягово-сцепное устройство, обеспечивает догрузку тягача в зоне опорного периметра, что способствует более равномерному её распределению по ведущим мостам.



Рис.1. Автоматическое тягово-сцепное догружающее устройство

Проведенные экспериментальные исследования и полученные тяговые характеристики агрегата на различных аэродромных покрытиях показали более высокие результаты. При догрузке тягача в зоне опорного периметра весом самолета, приходящимся на его переднюю стойку величиной 30 кН, тяговая мощность агрегата увеличивается в среднем на 56 %.

При этом коэффициент буксования на режиме максимальной тяговой мощности уменьшается на всех покрытиях в среднем на 55,2 %, а удельный эффективный расход топлива уменьшается в среднем на 34,7 %.

Буксировочная система, состоящая из аэродромного тягача и ВС, оборудованная автоматическим увеличителем сцепного веса, является сложной механической системой. Для ее аналитических исследований создана двухмассовая математическую модель, отражающая взаимодействие элементов структурной схемы между собой и поведение системы в целом (рис.2).

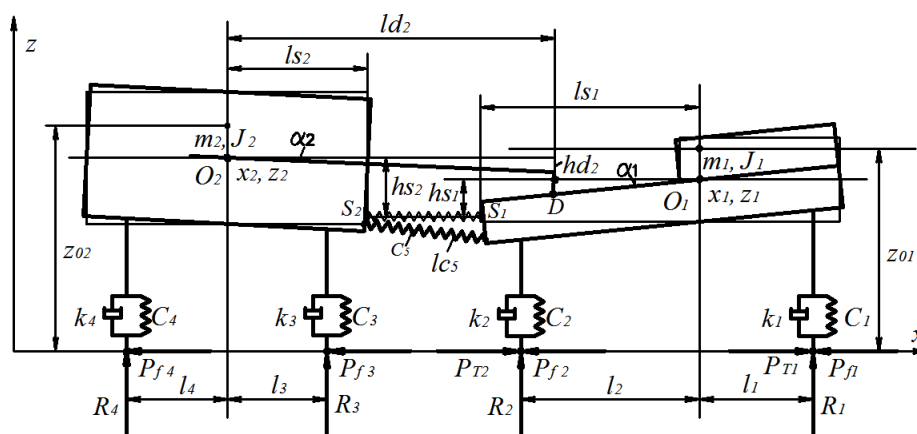


Рисунок 2. Расчетная схема двухмассовой буксировочной системы

С учетом продольной симметрии комплекса принимается плоская расчетная схема. Положение тягача описывается координатами x_1, z_1 его центра масс O_1 и углом наклона α_1 продольной оси к горизонту. Аналогично для летательного аппарата используются координаты x_2, z_2, α_2 . Инерционность элементов буксировочной системы учитывается массами тягача m_1 и летательного аппарата m_2 , а также их моментами инерции относительно центров масс J_1, J_2 .

Оба объекта опираются на горизонтальное основание аэродрома через упруго-диссипативные элементы C_i, k_i ($i = 1...4$), представляющие колеса и подвески тягача и летательного аппарата. Недеформированному состоянию упругих элементов C_i соответствуют высоты центров масс z_{01}, z_{02} и нулевые значения углов наклона рассматриваемых объектов ($\alpha_1 = \alpha_2 = 0$). Взаимодействие тягача и ВС с опорной поверхностью учитывается нормальными реакциями R_{Zi} , силами сопротивления качению P_{fi} и силами тяги ведущих мостов тягача P_{Ti} . Зависимость сил сопротивления качению от нормальных реакций учитывается соотношениями $P_{fi} = R_{Zi} \cdot f_i$, где f_i – коэффициенты сопротивления

качению колес ВС и тягача.

Тягач и ВС взаимодействуют между собой через буксировочное и догружающее устройства.

Буксирующая сцепка представлена на схеме упругим элементом C_5 , шарнирно соединенным с тягачем и буксиром. Точки шарнирного крепления буксирной сцепки к тягачу и воздушному судну обозначены через S_1 и S_2 соответственно. Сцепка не накладывает геометрических ограничений на перемещения и поэтому число степеней свободы системы не снижает.

Догружающее устройство, жестко скрепленное с прицепом (ВС), рассматривается на схеме как часть летательного аппарата, оно контактирует с тягачом в точке D . Этот контакт в процессе буксировки не нарушается, что определяет геометрические ограничения на взаимные перемещения тягача и прицепа. Таким образом, догружающее устройство уменьшает число степеней свободы системы.

Для описания динамики буксировочной системы используются уравнения равновесия тягача и прицепа. Поскольку система оказывается статически неопределимой, то уравнения равновесия дополняются геометрическими взаимосвязями между ее частями и физическими условиями, вытекающими из свойств упругих и диссипативных элементов (рис. 3,4).

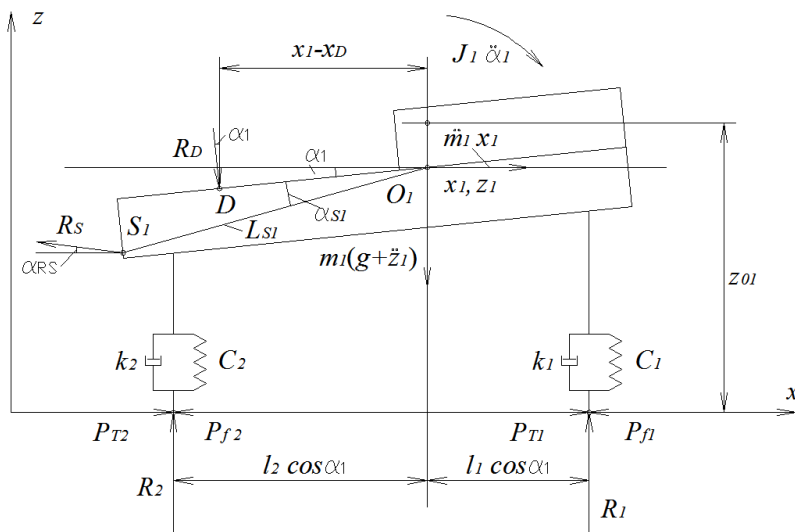


Рисунок 3. Схема сил, приложенных к тягачу

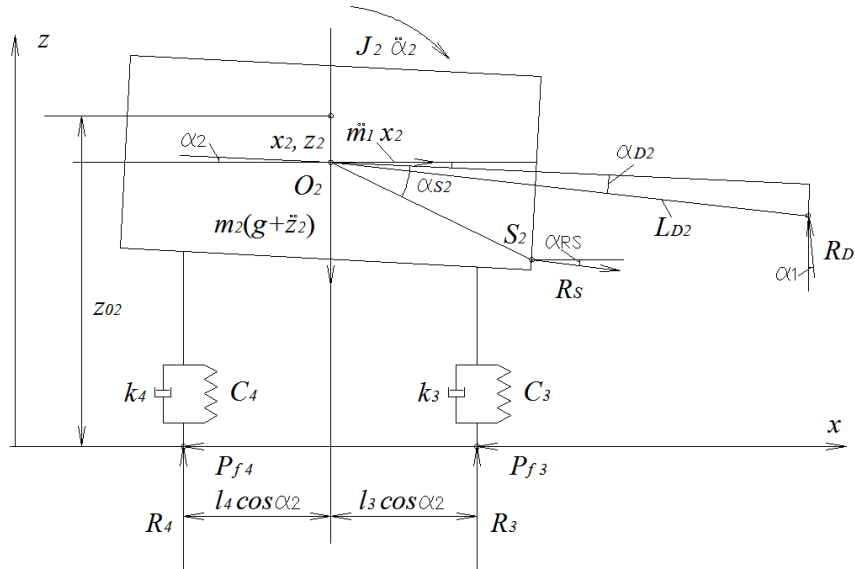


Рисунок 4. Схема сил, приложенных к ВС

Уравнения равновесия тягача, записанные методом кинетостатики, представлены соотношениями (1) – (3) (рис. 3), а ВС – соотношениями (4) – (6) (рис. 4)

$$-m_1 \cdot (\ddot{z}_1 + g) + R_1 + R_2 - R_D \cdot \cos \alpha_1 - R_S \cdot \sin \alpha_{RS} = 0; \quad (1)$$

$$-m_1 \cdot \ddot{x}_1 - R_S \cdot \cos \alpha_{RS} - R_D \cdot \sin \alpha_1 + P_T - R_1 \cdot f_1 - R_2 \cdot f_2 = 0; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & -J_1 \cdot \ddot{\alpha}_1 + R_2 \cdot l_2 \cdot \cos \alpha_1 - R_1 \cdot l_1 \cdot \cos \alpha_1 + R_D \cdot \cos \alpha_1 \cdot (x_1 - x_D) + \\ & + R_D \cdot \sin \alpha_1 \cdot (z_1 - z_D) + z_1 \cdot (P_T - R_1 \cdot f_1 - R_2 \cdot f_2) - \\ & - R_S \cdot L_{S1} \cdot [\sin \alpha_{RS} \cdot \cos(\alpha_1 + \alpha_{S1}) + \cos \alpha_{RS} \cdot \sin(\alpha_1 + \alpha_{S1})] = 0; \end{aligned} \quad (3)$$

$$-m_2 \cdot (\ddot{z}_2 + g) + R_3 + R_4 + R_D \cdot \cos \alpha_1 - R_S \cdot \sin \alpha_{RS} = 0; \quad (4)$$

$$-m_2 \cdot \ddot{x}_2 + R_S \cdot \cos \alpha_{RS} - R_D \cdot \sin \alpha_1 - R_3 \cdot f_3 - R_4 \cdot f_4 = 0; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & -J_2 \cdot \ddot{\alpha}_2 - R_4 \cdot l_4 \cdot \cos \alpha_2 + R_3 \cdot l_3 \cdot \cos \alpha_2 - z_2 \cdot (R_3 \cdot f_3 + R_4 \cdot f_4) - \\ & - R_D \cdot L_{D2} \cdot [\sin \alpha_1 \cdot \sin(\alpha_{D2} - \alpha_2) - \cos \alpha_1 \cdot \cos(\alpha_{D2} - \alpha_2)] + \\ & + R_S \cdot L_{S2} \cdot [\cos \alpha_{RS} \cdot \sin(\alpha_{S2} - \alpha_2) - \sin \alpha_{RS} \cdot \cos(\alpha_{S2} - \alpha_2)] = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

где R_S , R_D – реакции на тягач со стороны буксирующего и догружающего устройств соответственно; X_D – горизонтальное расстояние от центра масс до точки приложения догружающего усилия; $P_T = P_{T1} + P_{T2}$ – суммарная сила тяги переднего (P_{T1}) и заднего (P_{T2}) мостов тягача.

В качестве физических условий используются данные о жесткости и диссипативных свойствах колес и подвесок тягача и ВС. С учетом этих свойств соотношения между вертикальными реакциями и деформацией упругих элементов выражаются формулами

$$R_1 = C_1 \cdot (z_{01} - z_1 - \sin \alpha_1 \cdot l_1) - k_1 \cdot (\dot{z}_1 + \dot{\alpha}_1 \cdot \sin \alpha_1 \cdot l_1); \quad (7)$$

$$R_2 = C_2 \cdot (z_{01} - z_1 + \sin \alpha_1 \cdot l_2) - k_2 \cdot (\dot{z}_1 - \dot{\alpha}_1 \cdot \sin \alpha_1 \cdot l_2). \quad (8)$$

Помимо этого учитывается взаимосвязь между деформацией сцепного устройства и силой R_S

$$R_S = C_5 \cdot \frac{x_{S1} - x_{S2}}{\cos \alpha_{RS}}. \quad (9)$$

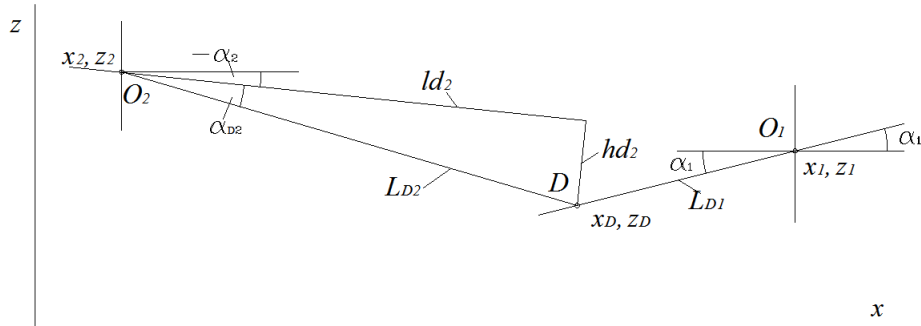


Рисунок 5. Взаимосвязь между положением тягача и прицепа

Соотношение между координатами α_1 , и α_2 , обусловленная наличием догружающего устройства, определяется из геометрических соображений (рис. 5)

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{z_1 - z_2 + L_{D2} \cdot \sin(\alpha_{D2} - \alpha_2)}{x_1 - x_2 - L_{D2} \cdot \cos(\alpha_{D2} - \alpha_2)}, \quad (10)$$

где $\alpha_{D2} = \arctg\left(\frac{h_{d2}}{l_{d2}}\right)$; $L_{D2} = \sqrt{l_{D2}^2 + h_{D2}^2}$.

С учетом малости α_1 и α_2 последнее соотношение приводится к виду

$$\alpha_2 = \frac{\alpha_1 \cdot (x_1 - x_2 - l_{d2}) + z_2 - z_1 - h_{d2}}{\alpha_1 \cdot h_{d2} - l_{d2}}. \quad (11)$$

Анализ динамики буксировочной системы заключается в решении системы уравнений (1) – (11) на характерных режимах работы по транспортировке ВС. Такими характерными режимами являются трогание с места, разгон и торможение. Равномерное движение специально не рассматривается, так как его параметры совпадают с параметрами конца разгона.

Во время трогания с места величина суммарной силы тяги определяется воздействием водителя тягача на педали газа и сцепления. Характер этого воздействия может быть весьма разнообразным, но в целом он приводит к росту P_T , который с приемлемым приближением можно считать линейной функцией времени. То есть на этапе трогания с места за начальные условия принимаются нулевые значения перемещений, скоростей и ускорений, а P_T описывается уравнением вида

$$P_T = a_1 + b_1 \cdot t,$$

где a_1 – константа равная силе сопротивления качению всех колес буксировочной системы в

статическом положении; b_1 – константа, характеризующая интенсивность роста крутящего момента на ведущих колесах тягача.

Трогание с места заканчивается при выходе двигателя тягача на его внешнюю характеристику.

Считается, что разгон происходит при полной подаче топлива, то есть на внешней скоростной характеристике двигателя. Если эту характеристику аппроксимировать линейной функцией, то P_T на этапе разгона примет вид

$$P_T = a_2 + b_2 \cdot \dot{x}_1,$$

где a_2 , b_2 – константы, определяемые параметрами внешней скоростной характеристики двигателя тягача.

За начальные условия разгона принимаются конечные параметры этапа трогания. Этап разгона считается законченным, если продольное ускорение упадет ниже некоторого заданного уровня.

Наибольший интерес представляет экстренное торможение, интенсивность которого определяется условиями сцепления колес с опорой, это позволяет сделать допущение о постоянстве тормозной силы на этом этапе.

$$P_T = a_3.$$

где a_3 – константа, определяемая состоянием поверхности аэродрома.

Начальные условия торможения совпадают с конечными параметрами разгона, а признаком окончания процесса является нулевая скорость движения.

Решение системы уравнений (1) – (11) для тягачей и ВС с различными параметрами позволит правильно определить конструкцию буксировочной системы и определить границы ее эффективного применения.

Список литературы

1. Великанов А. В., Нилов В. А., Лиховидов Д. В., Лазарев С. В., Носов Е. В. Способ буксировки самолётов тягачом с автоматическим увеличителем сцепного веса // Патент России №2335436. 2008. Бюл. № 28.
2. Великанов А. В., Нилов В. А. Тягово-сцепное устройство буксировщика // Патент России №2160690. 2000. Бюл. №35.
3. Канарчук Г. Н. Авиационная наземная техника. М.: Транспорт, 1989. 407 с.
4. Концепция развития системы средств наземного обслуживания летательных аппаратов общего применения. Москва. 30 ЦНИИ МО РФ. 2006.
5. Страхов Л. Н. Справочное пособие по средствам аэродромно-технического обеспечения

полётов. М.: Воениздат, 1980. 318 с.

Рецензенты:

Федюнин П. А., доктор технических наук, профессор, нач. кафедры управления воинскими частями С и РТО Военного Учебно-научного центра Военно-воздушных сил (Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина), г. Воронеж.

Спиридонов Е. Г., доктор технических наук, доц., профессор кафедры криогенной техники, систем кондиционирования и метрологического обеспечения экологии Военного Учебно-научного центра Военно-воздушных сил (Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина), г. Воронеж.