

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МЕМБРАННОГО ПРИВОДА

М. В. Чкалова, В. Д. Павлидис

SIMULATION OF AN OSCILLATORY SYSTEM OF A DIAPHRAGM DRIVE

M. V. Chkalova, V. D. Pavlidis

Аннотация. *Предмет и цель работы.* Актуальность исследования обусловлена необходимостью автоматизации процессов сельскохозяйственного производства. Его развитие характеризуется интенсивным внедрением робототехнических комплексов, что предполагает внесение изменений в технико-эксплуатационные параметры технологических линий. В качестве основной цели работы выступает построение универсальной математической модели пневматического привода мембранного типа, параметризация которой позволит учесть любые его конструктивные и технологические изменения. *Методы.* Авторами построена теоретическая модель пневматического привода мембранного типа при заданных начальных и граничных условиях с использованием методов теории дифференциальных уравнений в частных производных. Получено параметрическое решение составленного уравнения, которое полностью задает и описывает вынужденные колебания кольцевой мембраны с заданными параметрами (R_0 , ρ_m , r_m , T), закрепленной по контуру в корпусе пневмопривода дозатора сыпучих ультрадисперсных материалов как физической модели. *Результаты и выводы.* Разработана методика расчета колебательной системы пневматического дозатора, включающей кольцевую мембрану с закрепленными краями, основанная на эквивалентной замене системы с распределенными параметрами (мембрана) на систему с сосредоточенными параметрами. Такой подход позволяет заменить модель колебательного на модель поступательного движения. В результате проведенных исследований построена теоретическая модель мембранного привода и определены ее основные параметры. Разработана методика перехода от универсальной теоретической модели мембранного привода к изоморфной ей модели линейного осциллятора, построенной при тех же начальных условиях и допущениях.

Ключевые слова: колебательная система, мембранный привод, изоморфные модели, распределенные параметры, сосредоточенные параметры, инженерно-технические расчеты, пневматический дозатор.

Abstract. *Subject and goals.* The actuality of the research is determined by the need for automation of agricultural production processes. Its development is characterized by intensive introduction of robotic systems that include changes in technical and operational parameters of production lines. The main purpose of the article is the construction of a universal mathematical model of the pneumatic actuator of the diaphragm type, the parameterization of which will allow taking into account any structural and technological changes. *Methods.* The authors constructed a theoretical model of a pneumatic membrane-type drive under given initial and boundary conditions using the methods of the theory of partial differential equations. The obtained parametric solution of the equations completely defines and describes the forced oscillations of circular membranes with the specified parameters (R_0 , ρ_m , r_m , T), fixed along the contour in the housing of the actuator of the dis-

penser of bulk ultrafine materials as physical model. *Results and conclusions.* The authors developed a method of calculating the pneumatic dispenser oscillatory system comprising a circular membrane with clamped edges which is based on the equivalent replacement of the system with distributed parameters (membrane) by a system with lumped parameters. This approach allows the replacement of the model of the vibration by the model of translational motion. As a result of the research, a theoretical model of diaphragm actuator is constructed and its main parameters are identified. As a result of the research, there has been developed a method of transition from the universal theoretical model of the membrane drive to the isomorphic model of the linear oscillator constructed with the same initial conditions and assumptions.

Keywords: vibrating system, diaphragm actuator, isomorphic models, distributed parameters, concentrated parameters, engineering calculations, pneumatic dispenser.

Введение

Пневматические приводы получили широкое применение в промышленном производстве, прежде всего, в силу надежности функционирования, которая играет важную роль в современных АСУТП (автоматизированных системах управления технологическими процессами). Простота конструкции, легкость эксплуатации и довольно низкая себестоимость дают возможность рассматривать пневмосистемы как гибкое средство в автоматизации процессов сельскохозяйственного производства [1, 2]. Пневматические приводы мембранного типа обладают рядом дополнительных преимуществ, которые могут быть использованы в модернизации промышленного производства комбинированных кормов: нечувствительность к длительным перегрузкам, высокая скорость срабатывания, возможность воспроизведения поступательного движения без каких-либо передаточных механизмов. Необходимость регулировать энергозатраты и ресурсы эксплуатации в случае включения пневматических приводов мембранного типа в устройства дозирования, смешивания, финишного напыления требует построения универсальной математической модели, параметризация которой позволит учесть любые конструктивные и технологические изменения [1–3].

Материал и методика

В качестве физической модели мембранного привода рассмотрим пневматический дозатор сыпучих ультрадисперсных материалов авторской конструкции, предназначенный для внесения микроэлементов и ультрадисперсных материалов в рабочую кормовую смесь [4]. Устройство (рис. 1) работает следующим образом. Дозирование осуществляется посредством открытия электромагнитного клапана 2 на строго определенное время. Сыпучий ультрадисперсный материал из расходной емкости 1 перемещается через калиброванное отверстие в дозирующую камеру 3. При подаче воздуха в пневмопривод мембрана 4 деформируется и перемещает шток 5 вправо. Дозирующая камера 3 перекрывается внутренней сферической поверхностью корпуса пневмопривода. При дальнейшем перемещении штока вправо клапан 6 открывает проход для сжатого воздуха через полый канал 7 в дозирующую камеру 3. Сжатый воздух оказывает давление на сыпучий ультрадисперсный материал, находящийся в дозирующей камере, и перемещает его по каналу 7 вправо. Под действием смеси сжатого воздуха и сыпучего ультрадисперсного материала открывается запорный клапан 8. Дозирующая камера

3 и полый канал 7 очищаются от сыпучего ультрадисперсного материала, который поступает в приемную камеру 9 для дальнейшего использования по назначению. При прекращении подачи воздуха в пневмопривод запорный клапан 8 закрывается.

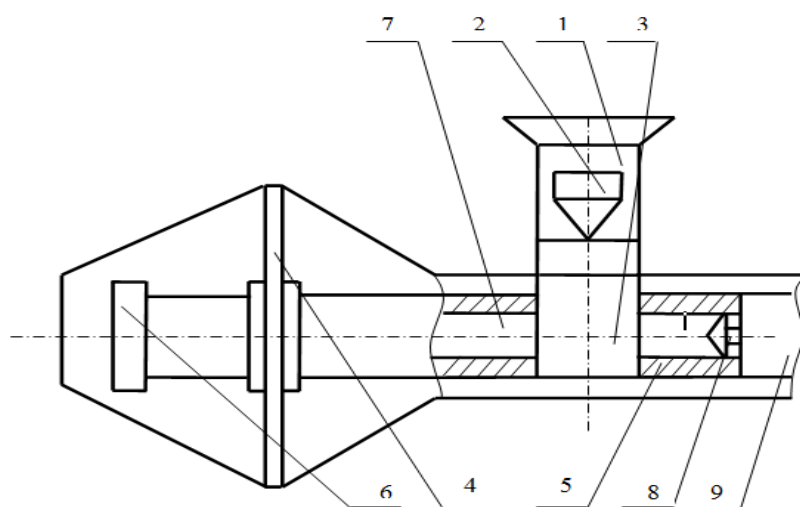


Рис. 1. Принципиальная схема пневматического дозатора сыпучих ультрадисперсных материалов:

- 1 – расходная емкость; 2 – электромагнитный клапан;
3 – дозирующая камера; 4 – мембрана; 5 – шток; 6 – клапан полого канала;
7 – полый канал; 8 – запорный клапан; 9 – приемная камера

Опишем вынужденные колебания кольцевой мембраны с закрепленными краями в корпусе пневмопривода и проведем расчет колебательной системы пневматического дозатора, включающей данную мембрану. Теоретическая модель предполагает дальнейшую верификацию и поэтому не содержит конкретных значений параметров и импедансных характеристик [4].

Закрепленная по контуру кольцевая мембрана, расположенная в корпусе пневмопривода, совершает вынужденные колебательные движения под действием воздушного давления. По другую сторону мембраны воздушная среда остается невозмущенной. Воздушное давление создается с помощью воздушного потока, нагнетаемого компрессором, и меняется по определенному закону, равномерно распределяясь по всей площади мембраны. Будем стандартно считать, что сопротивление движению мембраны пропорционально скорости этого движения [3–5].

Вынужденные колебания кольцевой мембраны с закрепленными краями в корпусе пневмопривода создают изменение воздушного давления в рабочей камере. Следовательно, функция, описывающая изменение воздушного давления в рабочей камере пневмопривода в условиях минимизации диссипативных потерь при использовании именно мембранного привода, относится к классу гармонических [3–5].

Применяя волновое дифференциальное уравнение в частных производных II порядка гиперболического типа [6], описывающее свободные колебания мембраны, и учитывая технические характеристики компрессора, определяющие функцию давления, получим:

$$\rho_m \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + r_m \frac{\partial U}{\partial t} - T \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} \right) = \rho_0 e^{i\omega t}, \quad (1)$$

где $U = U(r, t)$ – отклонение кольцевого сечения мембраны радиуса r в момент времени t ; ρ_m – поверхностная плотность материала мембраны (константа); r_m – коэффициент сопротивления единицы поверхности (константа); T – напряжение в заданном кольцевом сечении мембраны (константа); ρ_0 – амплитуда воздушного давления; ω – круговая частота действующей вынуждающей силы. Данное уравнение описывает установившиеся вынужденные колебания кольцевой мембраны с закрепленными краями в корпусе пневмопривода.

В рамках установившихся колебаний задание начальных условий не требуется, граничное условие имеет вид $U(r, t) \Big|_{r=R_0} = 0$, где R_0 – внешний радиус кольцевой мембраны. Ограниченность искомой функции будет учтена далее.

Нетривиальные решения уравнения (1) с заданными граничными условиями будем искать в следующем виде:

$$U(r, t) = U_1(r) e^{i\omega t}, \quad (2)$$

причем граничные условия амплитудной и искомой функций совпадают.

Подставляя выражение (2) в уравнение (1):

$$\frac{\partial U}{\partial r} = \frac{\partial U_1}{\partial r} e^{i\omega t}; \quad \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} = \frac{\partial^2 U_1}{\partial r^2} e^{i\omega t}; \quad \frac{\partial U}{\partial t} = u_1(r) e^{i\omega t} i\omega; \quad \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = -\omega^2 u_1(r) e^{i\omega t}$$

и преобразуя, получим вид уравнения (1) в полярных координатах:

$$\frac{\partial^2 U_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_1}{\partial r} + \kappa^2 u_1 = -\frac{\rho_0}{T}, \quad (3)$$

где $\kappa^2 = \frac{\rho_m \omega^2 - i r_m \omega}{T}$.

С физической точки зрения параметр κ^2 представляет собой обобщенную безразмерную числовую характеристику распространения поперечной волны на поверхности мембраны после подачи воздуха в корпус пневмопривода дозатора сыпучих ультрадисперсных материалов.

Если бы мембрана совершала свободные колебания, то правая часть уравнения (3) была бы равна нулю, а само уравнение классифицировалось как уравнение Бесселя со стандартной записью общего решения. Однако в нашем случае решение уравнения (3) с учетом правой части запишется следующим образом [5]:

$$u_1(r) = -\frac{\rho_0}{\kappa^2 T} + C_1 M_0(\kappa r) + C_2 N_0(\kappa r),$$

где $C_1 M_0(\kappa r) + C_2 N_0(\kappa r)$ – общее решение уравнения Бесселя, а $M_0(\kappa r)$ и $N_0(\kappa r)$ – функции Бесселя I и II рода нулевого порядка от комплексного переменного.

Помимо граничного условия с уравнением (1) связано естественное требование ограниченности искомой функции в центре кольца мембраны, т.е. при $r=0$: $\forall t |u(r,t)| < +\infty$. Из данного условия, которое справедливо и для функции $u_1(r)$, следует, что $C_2=0$ (функция Неймана $N_0(\kappa r) \xrightarrow{r \rightarrow +0} \infty$ учитывает затухание колебаний, линейно-независимая с $M_0(\kappa r)$), а $C_1 = \frac{\rho_0}{\kappa^2 T M_0(\kappa R_0)}$.

Решение уравнения (3) при заданном граничном условии и условии ограниченности искомой функции имеет вид $U_1(r) = \frac{\rho_0}{\kappa^2 T} \left(\frac{M_0(\kappa r)}{M_0(\kappa R_0)} - 1 \right)$, а искомое решение уравнения (1) определяет функцию

$$U(r,t) = \frac{\rho_0}{\kappa^2 T} \left(\frac{M_0(\kappa r)}{M_0(\kappa R_0)} - 1 \right) e^{i\omega t}. \quad (4)$$

Полученное параметрическое решение полностью задает и описывает вынужденные колебания кольцевой мембраны с заданными параметрами (R_0 , ρ_m , r_m , T), закрепленной по контуру в корпусе пневмопривода дозатора сыпучих ультрадисперсных материалов как физической модели.

Сложность верификации полученной теоретической модели связана с идеологией инженерно-технических расчетов. Решение (4) плохо поддается практической параметризации, вследствие чего затрудняется установление взаимосвязей с конструктивными и технологическими параметрами исследуемой физической модели. При этом методика проведения инженерно-технических расчетов строится на аппроксимации экспериментальных зависимостей, отражающих реальное протекание процессов. Это затрудняет практическую интерпретацию полученного решения и выдвигает на первый план при теоретических исследованиях необходимость разработки изоморфной модели, построенной при тех же начальных условиях и допущениях.

Результаты

Авторами разработана методика расчета колебательной системы пневматического дозатора, включающей кольцевую мембрану с закрепленными краями, основанная на эквивалентной замене системы с распределенными параметрами (мембрана) на систему с сосредоточенными параметрами. Такой подход позволяет заменить модель колебательного на модель поступательного движения. Замещение кольцевой мембраны эквивалентной системой с одной степенью свободы, например линейным осциллятором, массовым элементом которого является плоский круглый стержень, существенно упрощает расчеты и позволяет избежать сложных уравнений математической физики.

Тождественность законов движения вынужденных колебаний мембраны и заменяющего поршня того же диаметра, помещенного на ее место, позволяет использовать для моделирования два подхода: энергетический и динамический [3, 7]. В рамках энергетического подхода рассматривается равенство средней за период времени кинетической энергии поршня и мем-

браны, что дает возможность найти массу поршня, а равенство средней за период времени потенциальной энергии поршня и мембраны позволяет определить коэффициент жесткости пружины. В рамках динамического подхода условием является равенство объемов воздуха, вытесняемого при колебаниях мембраны и поступательном движении поршня.

Для дальнейших исследований в рамках динамического подхода найдем отклонения точек мембраны от положения равновесия. Рассуждая индукционно, рассмотрим частный случай отклонения точек мембраны от нейтрального положения под действием статического, равномерно распределенного по площади, давления. Для этого запишем дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} = -\frac{P}{T}, \quad (5)$$

где $u = u(r)$ – поперечное отклонение кольцевого сечения мембраны радиуса r ; T – напряжение в заданном кольцевом сечении мембраны (константа); P – величина статического давления (константа).

Частным решением уравнения (5), удовлетворяющим граничному условию $U(r)|_{r=R_0} = 0$, является функция вида $u(r) = \frac{PR_0^2}{4T} (1 - \frac{r^2}{R_0^2})$, где R_0 – внешний радиус кольцевой мембраны; $\frac{PR_0^2}{4T}$ – величина отклонения внутреннего контура, жестко закрепленного на штоке.

Если использовать полученное параметрическое решение (4), то можно найти среднее отклонение точек кольцевой мембраны от положения равновесия в любой (каждый) момент времени при изменении давления по гармоническому закону:

$$\begin{aligned} u_{cp}(t) &= \frac{1}{\pi(R_0^2 - r_0^2)} \int_{r_0}^{R_0} u(r, t) 2\pi r dr = \left[\int \kappa r M_0(\kappa r) d(\kappa r) = \kappa r M_1(\kappa r) \right] = \\ &= \frac{2\rho_0}{\kappa^2 T (R_0^2 - r_0^2)} e^{i\omega t} \left[\frac{R_0 M_1(\kappa R_0) - r_0 M_1(\kappa r_0)}{\kappa M_0(\kappa R_0)} - \frac{(R_0^2 - r_0^2)}{2} \right] = \\ &= \frac{\rho_0}{\kappa^2 T} \left[\frac{2(R_0 M_1(\kappa R_0) - r_0 M_1(\kappa r_0))}{\kappa M_0(\kappa R_0)(R_0 - r_0^2)} - 1 \right] e^{i\omega t}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $M_1(\kappa r)$ – функция Бесселя первого рода первого порядка; R_0 – внешний радиус кольцевой мембраны; r_0 – внутренний радиус кольцевой мембраны.

Функция $u_{cp}(t)$ задает гармонические колебания, амплитуда и фаза которых определяются частотой возбуждения (давление компрессора) ω . При этом $\frac{\rho_0}{\kappa^2 T} \left[\frac{2(R_0 M_1(\kappa R_0) - r_0 M_1(\kappa r_0))}{\kappa M_0(\kappa R_0)(R_0 - r_0^2)} - 1 \right] e^{i\omega t}$ есть комплексная числовая характеристика, модуль которой совпадает с амплитудой описанных гармонических колебаний, а аргумент – с фазой этих колебаний.

Движение поршня описывается линейным неоднородным дифференциальным уравнением II порядка со специальной правой частью:

$$m_p \frac{d^2 x}{dt^2} + r_p \frac{dx}{dt} + \kappa_{px} = \rho_0 S_p e^{i\omega t}, \quad (7)$$

решение которого имеет вид

$$x(t) = \frac{\rho_0 S_p e^{i\omega t}}{\kappa_p - m_p \omega^2 + i r_p \omega}, \quad (8)$$

где $x(t)$ – отклонение поршня от положения равновесия в любой момент времени; m_p – масса поршня; r_p – коэффициент сопротивления движению поршня; κ_p – жесткость пружины линейного осциллятора; S_p – площадь поршня, равная площади мембраны.

Приравняв правые части уравнений (6) и (8), на основании тождественности законов движения мембраны и эквивалентного ей поршня и после несложных преобразований получим искомые параметры осциллятора, выраженные через параметры кольцевой мембраны:

$$m_p = p_m S_p, \quad (9)$$

$$\kappa_p = m_p \omega^2 + S_p \operatorname{Re} \left[\kappa^2 \left(\frac{2M_1(\kappa R_0)}{\kappa R_0 M_0(\kappa R_0)} - 1 \right)^{-1} \right], \quad (10)$$

$$r_p = \frac{S_p T}{\omega} \operatorname{Im} \left[\kappa^2 \left(\frac{2M_1(\kappa R_0)}{\kappa R_0 M_0(\kappa R_0)} - 1 \right)^{-1} \right], \quad (11)$$

где $\kappa^2 = \frac{\rho_m \omega^2 - i r_m \omega}{T}$.

Таким образом, мы определили параметры линейного осциллятора, поршень которого, с одной стороны, эквивалентен исходной мембране по реакции на внешнее воздействие, а с другой – вследствие того, что наша мембрана окружена конечными полостями, тождественен ей по воздействию на окружающее пространство. Следовательно, мы можем заменить мембрану эквивалентным ей поршнем, в какой бы части колебательной системы она ни находилась, и осуществлять все дальнейшие расчеты с поршнем линейного осциллятора [7]. Равенства (9)–(11) определяют прямое и обратное преобразование параметров исходной и изоморфной моделей.

Обсуждение

В ходе лабораторных экспериментов на базе инженерного факультета Оренбургского государственного аграрного университета получены параметры линейного осциллятора (штока), позволяющие моделировать внесение ультрадисперсных порошков в готовую кормовую смесь. Было принято решение изготовить шток из конструкционной стали, длина штока – 230 мм, диаметр – 20 мм, масса – 344 г, рабочий ход штока – 44 мм. На основании уравнений (9)–(11) математической модели были аналитически определены

параметры мембраны: эффективная площадь – 229 см², толщина – не более 8 мм, поверхностная плотность материала – не более 1,5 г/см².

Экспериментально установлены пределы рабочего давления распыляемой смеси от 202,6 до 810,4 кПа, расход распыляемой смеси от 0,35 до 0,95 см³/с, форма распыла – симметричный факел с углом 120°. На кафедре материаловедения и конструкционных материалов для изготовления распылителя ультрадисперсных материалов была подобрана латунь, обладающая хорошей износостойкостью, антикоррозийными и антифрикционными свойствами.

Опытный образец дозатора сыпучих ультрадисперсных материалов с габаритными размерами 322×200×260 мм и массой 5,48 кг проходит апробацию в ходе производственных экспериментов на базе учебного хозяйства Оренбургского государственного аграрного университета.

Выводы

В результате проведенных исследований построена теоретическая модель мембранного привода и определены ее основные параметры. Авторами проведено преобразование универсальной теоретической модели мембранного привода к изоморфной ей модели линейного осциллятора, массовым элементом которого является плоский круглый стержень. Последняя модель хорошо отвечает требованиям инженерно-технического проектирования и конструирования. Апробация опытного образца дозатора сыпучих ультрадисперсных материалов, разработанного и сконструированного на основе полученных результатов, завершается в учебном хозяйстве Оренбургского государственного аграрного университета.

Адекватность замены модели мембранного привода изоморфной ей моделью линейного осциллятора, массовым элементом которого является плоский круглый стержень, обоснована логикой инженерно-математических расчетов и практикой инженерно-технического проектирования и конструирования. Вопросы оптимизации предложенной модели являются предметом отдельного исследования.

Библиографический список

1. Нормы технологического проектирования предприятий по производству комбикормов / Библиотека гостей, стандартов и нормативов РФ. – URL: <http://info-sait.ru> (дата обращения: 10.12.2020).
2. Герц, Е. В. Расчет пневмоприводов : справ. пособие / Е. В. Герц, Г. В. Крейнин. – Москва : Машиностроение, 1975. – 272 с.
3. Стрелков, С. П. Введение в теорию колебаний / С. П. Стрелков. – Москва : Наука, 1964. – 440 с.
4. Чкалова, М. В. Повышение эффективности приготовления комбинированных кормов на основе применения ультрадисперсных материалов / М. В. Чкалова, В. Д. Павлидис // Актуальные проблемы формирования кадрового потенциала для инновационного развития АПК : сб. науч. тр. – Минск : Белорус. гос. аграр. техн. ун-т, 2018.
5. Павлидис, В. Д. Некоторые аспекты математического моделирования технологических процессов в сельскохозяйственном производстве / В. Д. Павлидис, М. В. Чкалова // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2017. – № 2 (14). – С. 50–53.
6. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1972. – 735 с.

7. Кезик, В. И. Вынужденные осесимметричные колебания круглой мембраны, являющейся элементом акустической колебательной системы / В. И. Кезик // Техническая акустика. – 2013. – № 9. – URL: [http:// www.ejta.org](http://www.ejta.org) (дата обращения: 10.12.2020).

References

1. *Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya predpriyatiy po proizvodstvu kombikormov* [Norms of technological design of enterprises for the production of combi-feeds]. Library of gost, standards and regulations of the Russian Federation. Available at: [http:// infosait.ru](http://infosait.ru) (accessed 10.12.2020). [In Russian]
2. Gerts E. V., Kreynin G. V. *Raschet pnevmoprivodov: sprav. posobie* [Calculation of pneumatic actuators : reference manual]. Moscow: Mashinostroenie, 1975, 272 p. [In Russian]
3. Strelkov S. P. *Vvedenie v teoriyu kolebaniy* [Introduction to the theory of oscillations]. Moscow: Nauka, 1964, 440 p. [In Russian]
4. Chkalova M. V., Pavlidis V. D. *Aktual'nye problemy formirovaniya kadrovogo potentsiala dlya innovatsionnogo razvitiya APK: sb. nauch. tr.* [Actual problems of formation of personnel potential for innovative development of agroindustrial complex : collection of scientific works]. Minsk: Belarus. gos. agrar. tekhn. un-t, 2018. [In Russian]
5. Pavlidis V. D., Chkalova M. V. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proceedings of the Orenburg State Agrarian University]. 2017, no. 2 (14), pp. 50–53. [In Russian]
6. Tikhonov A. N., Samarskiy A. A. *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Equations of mathematical physics]. Moscow: Nauka, 1972, 735 p. [In Russian]
7. Kezik V. I. *Tekhnicheskaya akustika* [Technical acoustics]. 2013, no. 9. Available at: [http:// www.ejta.org](http://www.ejta.org) (accessed 10.12.2020). [In Russian]

Чкалова Марина Викторовна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информатики
и прикладной математики,
Оренбургский государственный
аграрный университет
(Россия, г. Оренбург, ул. Челюскинцев, 18)
E-mail: chkalovamv@mail.ru

Chkalova Marina Viktorovna

candidate of technical sciences,
associate professor,
sub-department of informatics
and applied mathematics,
Orenburg State Agrarian University
(18 Chelyuskintsev street, Orenburg, Russia)

Павлидис Виктория Дмитриевна

кандидат физико-математических наук,
доктор педагогических наук, профессор,
заведующий кафедрой информатики
и прикладной математики,
Оренбургский государственный
аграрный университет
(Россия, г. Оренбург, ул. Челюскинцев, 18)
E-mail: pavlidis@mail.ru

Pavlidis Victoria Dmitrievna

candidate of physical
and mathematical sciences,
doctor of pedagogical sciences, professor,
head of sub-department of informatics
and applied mathematics,
Orenburg State Agrarian University
(18 Chelyuskintsev street, Orenburg, Russia)

Образец цитирования:

Чкалова, М. В. Моделирование колебательной системы мембранного привода / М. В. Чкалова, В. Д. Павлидис // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2020. – № 4 (36). – С. 88–96. – DOI 10.21685/2227-8486-2020-4-9.