



Научная статья
УДК 631.22, 636.083, 636.084

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СОДЕРЖАНИЯ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА НА ФЕРМЕ (Часть I)

Е.А. Оленев^{1,*}

¹Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир,
Россия

*E-mail: olenevea@mail.ru

Аннотация. Разработана технология, позволяющая автоматизировать на ферме процесс кормления животных, уборку навоза, гигиеническую обработку вымени коровы перед доением и т.д. Возможен учет кормового рациона каждого животного.

Ключевые слова: стебельчатые корма; крупный рогатый скот; ферма.

Для цитирования: Оленев Е.А. Автоматизация процесса содержания крупного рогатого скота на ферме (Часть I) // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2023. Т.9. №4. С. 15–28.

Original article

AUTOMATION OF PROCESS MAINTENANCE ON CATTLE-BREEDING FARM (Part I)

Е.А. Olenev^{1,*}

¹Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai GrigoryevichStoletov, Vladimir, Russia

*E-mail: olenevea@mail.ru

Abstract. Works out technology automation on cattle-breeding farm of process maintenance, harvesting manure, hygienic treatment udder of cow milker etcetera. It is possible calculation fodder ration of every animal.

Keywords: feather fodders; cattle; neat cattle; cattle-breeding farm.

For citation: Olenev E.A. Automation of process maintenance on cattlebreeding farm (Part I). *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2023. V.9. No. 4. pp. 15–28.

Введение

Когда корова питается травами на выпасе или стебельчатым кормом, то она безошибочно языком отделяет сорную траву от кормовой, в результате чего в ее желудок попадает только необходимый и нужный растительный продукт. Измельченный корм, который могут раздавать животным существующие кормораздатчики, содержит в себе смесь кормовой и сорной травы, в результате чего нежелательные компоненты такого корма в конечном итоге в том или ином виде попадают в молоко и вызывают аллергические реакции у некоторых детей и взрослых при употреблении такого молока. Кроме того, процесс измельчения кормов требует больших, неоправданных затрат энергии, усложняет кормодобывающую технику, кормоизмельчающие механизмы часто выходят из строя, из-за попадающих в них инородных предметов. Поэтому очевидна необходимость кормления крупного рогатого скота не-

измельченным кормом в натуральном цельностебельном состоянии, что в полной мере отвечает физиологии крупного рогатого скота и открывает путь к высокоэффективной кормосберегающей технологии. Уборка навоза является достаточно тяжелой и трудоемкой операцией, так как занимает 40 % рабочего времени персонала фермы. Автоматизация этого процесса не только облегчает труд на ферме, но и значительно улучшает санитарно-гигиенический условия на ней.

Наличие на ферме большого числа кровососущих насекомых препятствует комфортному нахождению на ферме как людей, так и животных, поэтому необходимо уничтожать этих насекомых и по возможности ограничивать их проникновение на ферму.

Внедрение инновационных решений приведет к эффективному росту продуктивности и улучшению здоровья крупного рогатого скота при меньших производственных затратах, будет способствовать формированию в организме животных полноценных и экологически чистых молока и мяса, а также облегчит и улучшит труд работников фермы.

Способ раздачи стебельчатых кормов и устройство для его осуществления

Изобретение относится к сельскохозяйственному производству и может быть использовано на животноводческих фермах для автоматической раздачи стебельчатых кормов [1].

Устройство для осуществления способа раздачи стебельчатых кормов содержит грейферный ковш с челюстями 1, установленными с возможностью поворота на осях 2, которые неподвижно закреплены в основании 3, соединенном неподвижными направляющими 4 с платформой 5, через которую с возможностью перемещения пропущена труба 6, на которой неподвижно закреплены каретка 7 с колесами 8, взаимодействующими с направляющей 4, и подвес 9, на котором с возможностью поворота на осях 10 установлены захваты 11. Порция 12 корма, собранного в копну 13, имеет возможность контакта с захватами 11, ножами 14, неподвижно закрепленными на кромках челюстей, и кормушкой 15 животного 16 (коровы). Каретка 7 подвеса может быть выполнена в виде весоизмерительного механизма и состоять из половин 17, имеющими возможность перемещения по ограничителям - направляющим 18, в которых свободно установлено упругое кольцо 19, сцепленное со штифтами 20, неподвижно закрепленными в половинах.

Для формирования порции 12 корма опускают за платформу 5, например с помощью телескопической штанги грейферный ковш на копну 13, причем ковш может находиться как в закрытом, так и в открытом состоянии (рис. 1–4).

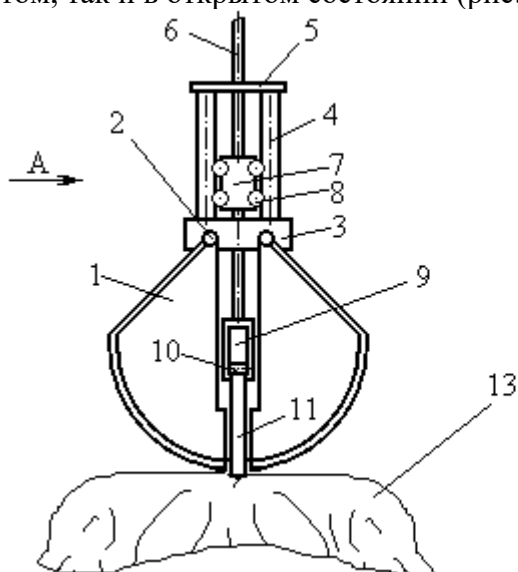


Рис. 1. Схема устройства для осуществления способа раздачи стебельчатых кормов

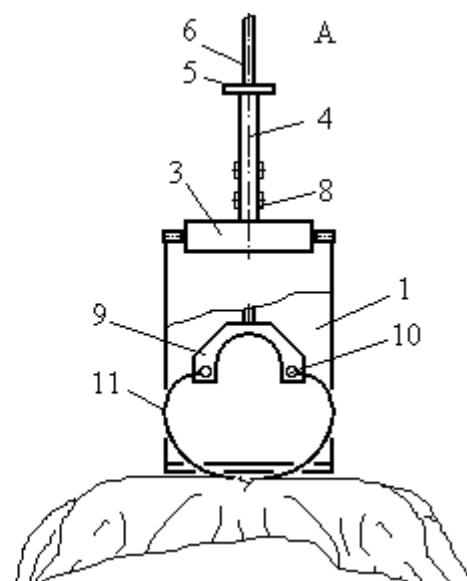


Рис. 2. Вид А устройства

При касании поверхности копы захваты 11 упираются в корм, например в сено, в результате чего подвес 9 затормаживается вместе с нижней половиной 17 каретки 7, а ее верхняя половина продолжает опускаться, что приводит к деформации кольца 19, которое вытягивается вдоль горизонтали. Такая деформация (перемещение) преобразованная с помощью известных устройств, например тензометрических, является сигналом (который может быть использован для автоматического управления) подхода захватов к поверхности копы.

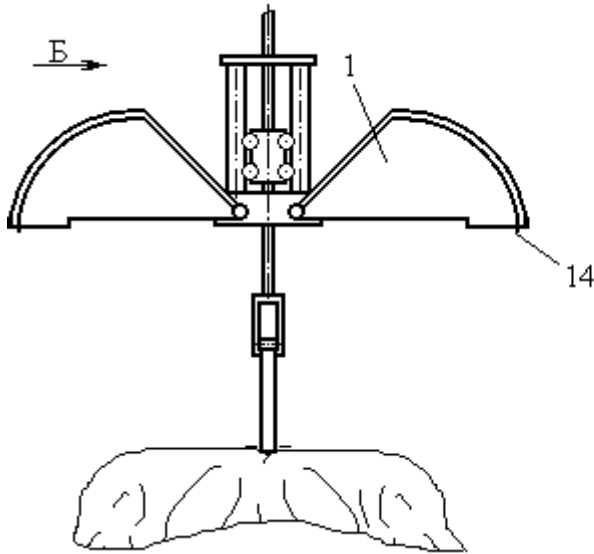


Рис. 3. Схема устройства с открытым ковшом

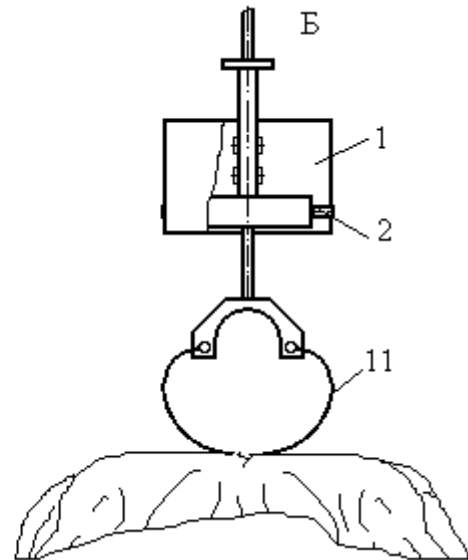


Рис. 4. Вид Б устройства с открытым ковшом

Затем с помощью приводов (не показаны) производят размыкание захватов 11, поворачивая их на осях 10 и опуская их посредством трубы 6 на некоторую величину, зависящую от требуемой массы приготавливаемой порции и известную для данного устройства заранее в зависимости от вида корма и его средней плотности (рис. 5 – 8). Чем ниже захваты, тем больше будет захвачено сена, и наоборот.

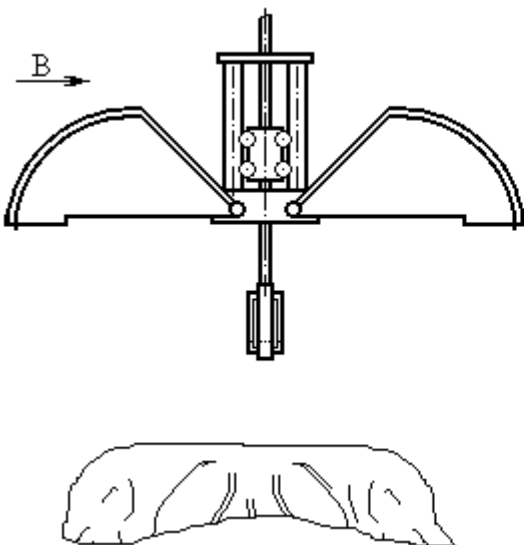


Рис. 5. Схема устройства в момент подготовки к формированию порции корма

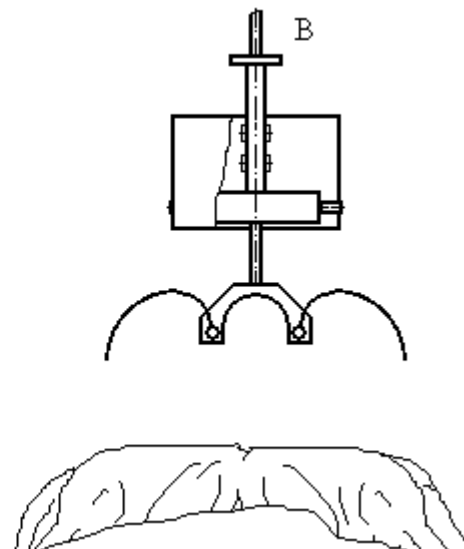


Рис. 6. Вид В устройства в момент подготовки к формированию порции корма

Заметим, что формирование в копне порции корма, которую потом приподнимают и отделяют путем отрезания стеблей, соединяющих порцию с копной, упрощает конструкцию устройства и делает его менее энергоемким, поскольку исключается операция выдергивания порции корма из копны и, следовательно, энергия затрачивается только на подъем этой порции, причем на небольшую высоту, достаточную для разделения порции и копны.

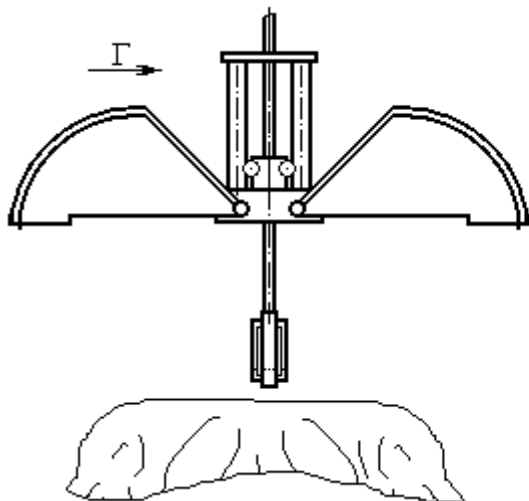


Рис. 7. Схема устройства в момент начала формирования порции корма

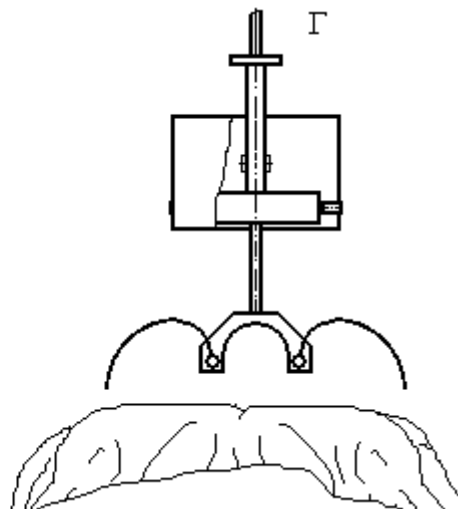


Рис. 8. Вид Г устройства в момент начала формирования порции корма

Далее смыкают захваты 11 путем поворота их в противоположную сторону (рис. 9, 10). При этом попавшее между захватами сено составляет основу будущей порции 12 корма.

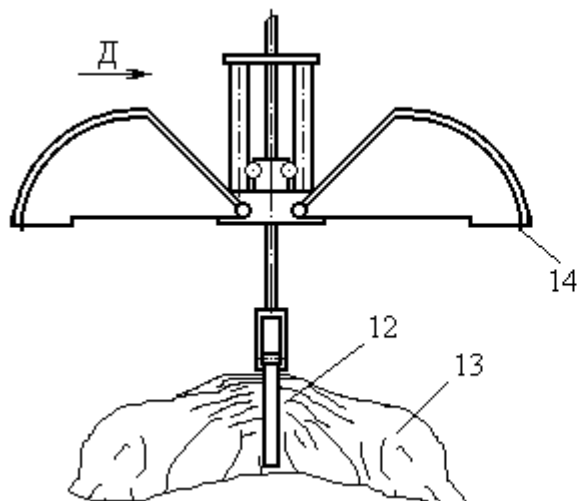


Рис. 9. Схема устройства в момент формирования порции корма

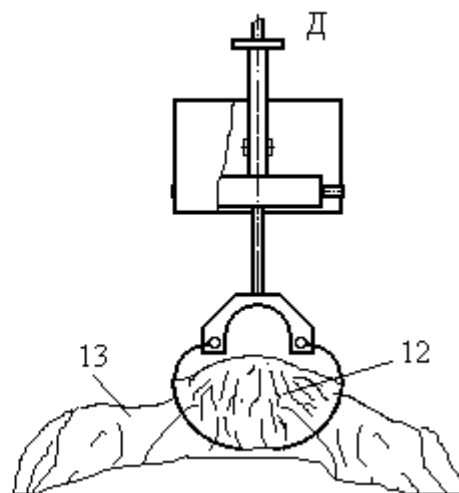


Рис. 10. Вид Д устройства в момент формирования порции корма

При определенной величине момента (усилия), приложенного к захватам, фиксируют угол их поворота (рис. 11, 12). Чем больше угол поворота захватов 11, т.е. чем больше они сомкнулись, тем меньше плотность сена и меньше его в формируемой порции, и наоборот. Таким образом, если захваты 11 повернулись на угол, который больше ожидаемого (расчетного), то для получения требуемой массы порции 12 захваченное им сено нужно выше под-

нять над поверхностью копны 13, и наоборот. Варьируя высотой подъема захватов с сеном, можно корректировать дозу порции корма.

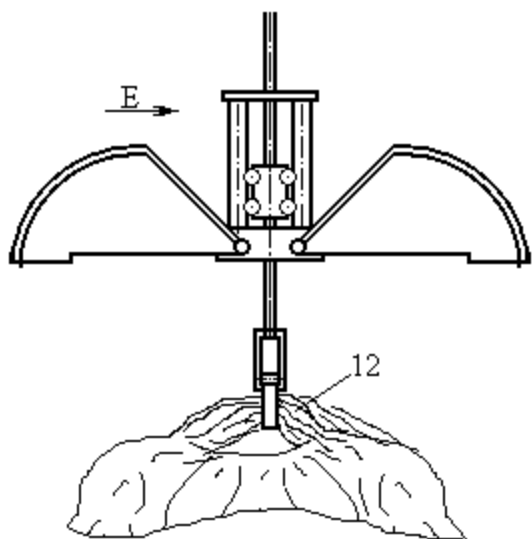


Рис. 11. Схема устройства в момент приподнимания порции корма

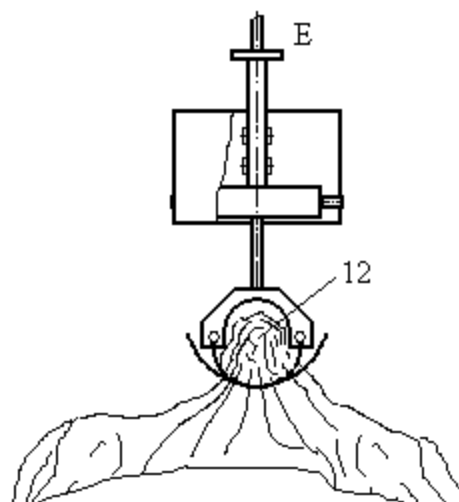


Рис. 12. Вид Е устройства в момент приподнимания порции корма

Заметим, что в процессе подъема действующая со стороны сена сила сопротивления может превышать силу веса максимальной порции корма. В этом случае кольцо 19 деформируется, вытягивается посредством штифтов 20 по вертикали до определенного значения, определяемого длиной ограничителей - направляющих 18 (рис. 13, 14). Совмещение отделения порции с ее дозированием, взвешиванием и коррекцией снижает время приготовления порции заданной массы.

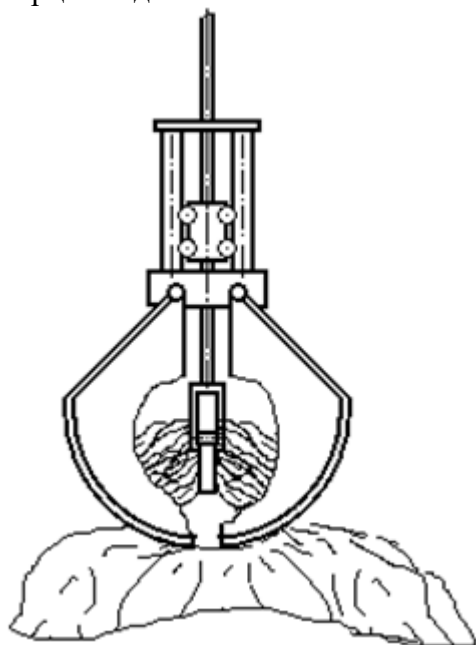


Рис. 13. Схема устройства в момент отделения порции корма

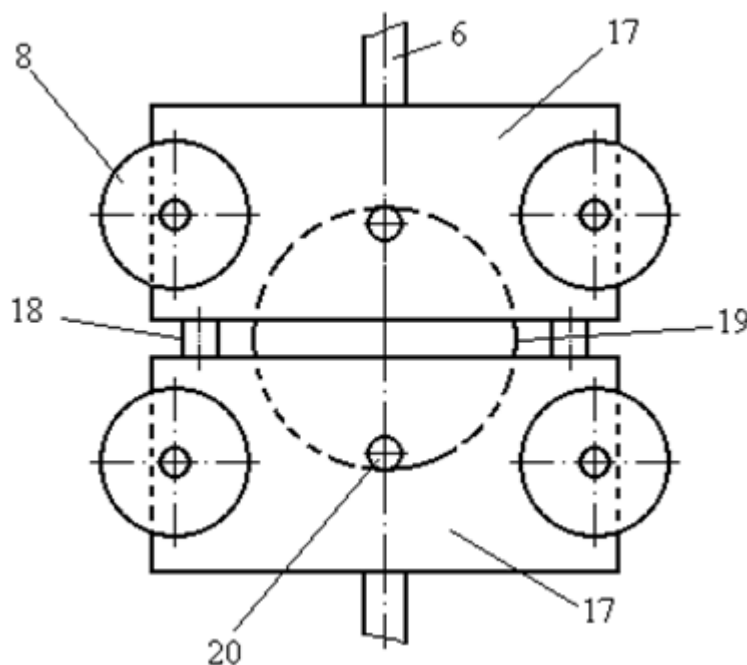
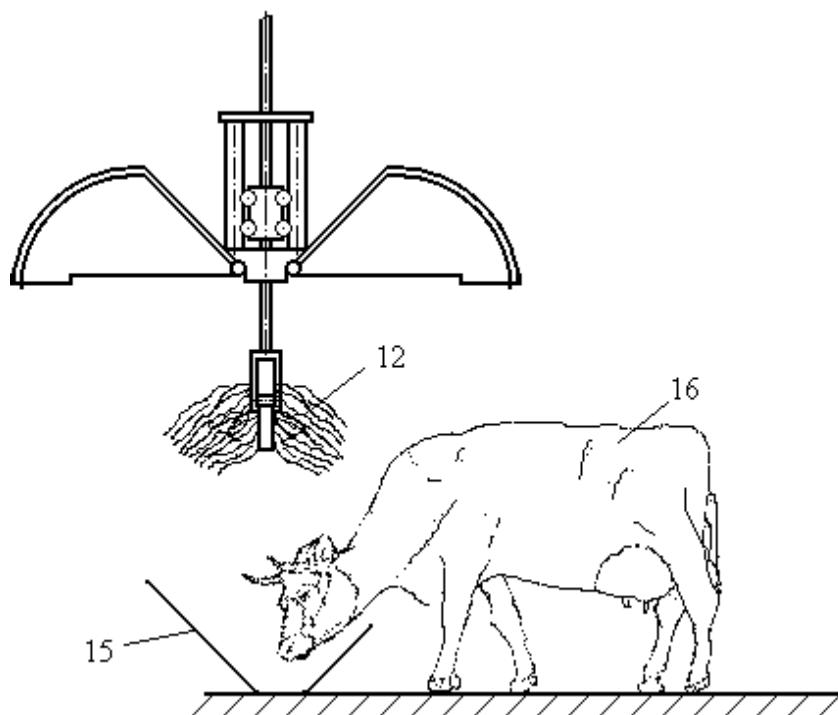


Рис. 14. Схема весоизмерительного механизма подвеса

После подъема захватов на нужную высоту смыкают челюсти 1 грейферного ковша, в результате чего ножами 14 производится обрезка стеблей, соединяющих порцию 12 корма с копной 13. Обрезанная и сформированная таким образом порция корма оказывается заклю-

ченной в грейферном ковше. Деформация вытянутого вдоль вертикали кольца 19 будет прямо пропорциональна массе сформированной порции корма (рис. 15). Зная массу захватов 11, половины 17 каретки, держателя 9 и трубы 6, соединяющей последние, можно вычислить массу сформированной порции и вести персонифицированный учет съеденного животным



корма. Затем порция транспортируется (по типу работы грейферного крана или монорельса) к назначенному месту, после чего грейферный ковш и захваты размыкаются, и порция падает в кормушку 15 коровы 16.

Рис. 15. Схема устройства в момент окончания транспортирования порции корма к кормушке

Для получения более точных значений съеденного коровой корма, определения остатка корма в кормушке, а также для персонифицированного учета рациона кормления предлагается кормушку выполнять частью колебательной системы, по изменению частоты колебаний которой можно судить о перечисленных параметрах (рис. 16).

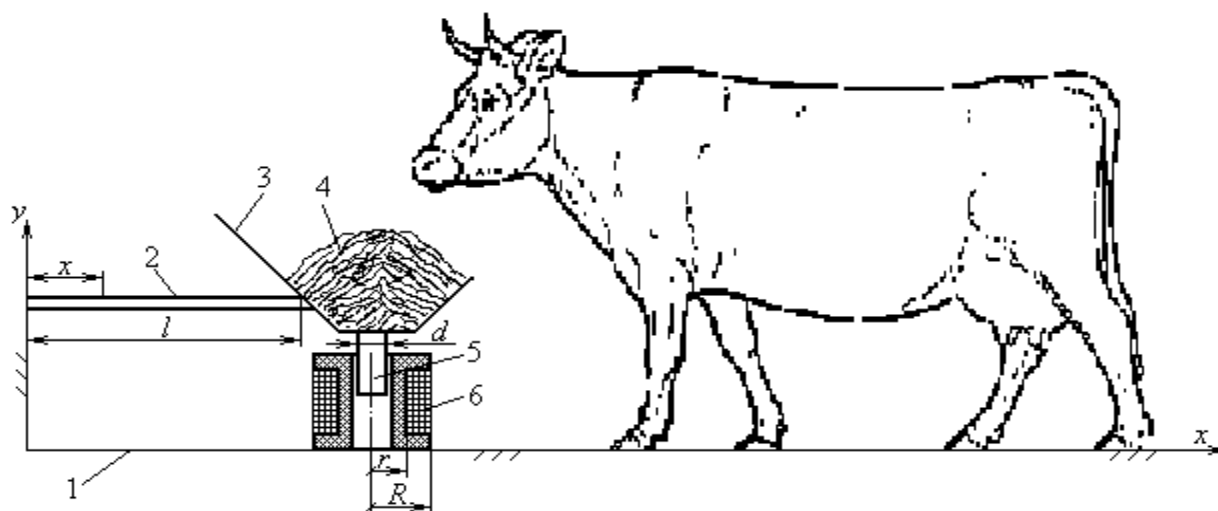


Рис. 16. Схема автоколебательной системы для измерения массы корма

Рассмотри устройство и работу такой системы. Будем полагать, что кормушка с кормом совершает линейное движение по вертикали. Система размещена на основании 1, в котором заземлены концы плоских пружин 2 колебательной системы, другие концы которых закреплены в емкости (кормушке) 3, содержащей корм 4. Снизу к емкости прикреплен якорь 5, выполненный из магнитного материала, расположенный в магнитном поле катушки 6. Катушка выполнена с бифилярной обмоткой, т. е. по существу состоит из двух катушек – катушки привода, намотанной толстым проводом, и катушки освобождения (датчика), выполненной тонким проводом. Катушка освобождения и катушка привода соединены через усилитель-формирователь (не показан). При движении емкости магнитное поле постоянного магнита 5 индуцирует в катушке освобождения напряжение, поступающее на усилитель-формирователь, который формирует в катушке привода импульсы тока и, следовательно, – магнитное поле. При взаимодействии магнитного поля катушки привода с якорем 5 возникает сила импульса, возбуждающая автоколебательное движение системы.

Такая измерительная автоколебательная система работает в условиях переменной массы измеряемой среды (корма). Это обстоятельство требует при проектировании системы учета смещения положения равновесия. Изменение массы приводит к изменениям частоты автоколебаний, величины потерь энергии, следовательно, амплитуды колебаний. При проектировании системы формирования импульса привода, как элемента автоколебательной системы, необходимо учитывать, что наводимое в катушке напряжение пропорционально как частоте, так и амплитуде колебаний. Такая зависимость усложняет задачу формирования в приводе импульса необходимого уровня энергии и с фазовым положением, близким к положению статического равновесия.

Исследуем возможности измерительных автоколебательных систем, для получения основных расчетных зависимостей.

В данной автоколебательной системе действуют следующие силы. Первые две силы вытекают из наличия колеблющейся на пружинах массы, это сила инерции

$$F_y = m\ddot{y}, \quad (1)$$

где $m = m_0 + m_n$: m_0 – приведенная масса колебательной системы, кг; m_n – масса измеряемого корма, кг; \ddot{y} – ускорение м/с².

Восстанавливающая сила пружин, обусловленная их упругими свойствами, которую в общем случае можно записать

$$F_{\varepsilon} = D[y + \varepsilon(y + y_0)^3], \quad (2)$$

где D – жесткость пружин (подвеса), Н/м; y – отклонение емкости от положения равновесия, м; y_0 – начальное отклонение емкости под действием силы тяжести измерительной системы с массой m , м; ε – коэффициент нелинейности, м⁻².

Заметим, что если коэффициент нелинейности мал и им можно пренебречь, то второе слагаемое в формуле (2) будет равно нулю.

На колебательную систему действуют силы трения. Сила сопротивления о воздух F_c может быть записана из двух составляющих: силы, действующей на емкость с кормом

$$F_c^e = c_e A_e \frac{\rho_{\varepsilon}}{2} \dot{y}^2 \quad (3)$$

и силы сопротивления, действующей на пружины

$$F_c^n = c_n A_n \frac{\rho_{\varepsilon}}{2} (\sigma_x \cdot \dot{y})^2, \quad (4)$$

где c_e, c_n – коэффициенты, зависящие от формы емкости и пружин; A_e, A_n – площади наибольших сечений емкости и пружины в плоскости, перпендикулярной вектору скорости колебаний, m^2 ; ρ_v – плотность воздуха, kg/m^3 ; σ_x – коэффициент, учитывающий величину скорости колебаний пружины по координате x ; \dot{y} – скорость колебаний, m/s .

Для нахождения коэффициента σ_x поступим следующим образом. Допустим, что при колебательном движении форма упругой линии пружины такая же, как при изгибе, а текущее значение скорости колебаний каждой точки пружины пропорционально прогибу. Тогда согласно [2]

$$\sigma_x = \frac{3lx^2 - x^3}{2l^3}, \quad (5)$$

где l – длина пружины, m .

Как видно из выражения (5), коэффициент σ_x , величина переменная, зависящая от координаты x . Поэтому в выражении (4) целесообразно произвести замену коэффициента σ_x на коэффициент σ_{cp} , который отражал бы среднюю величину \dot{y} по координате x , т. е.

$$\sigma_{cp} = \frac{1}{l} \int_0^l \frac{3lx^2 - x^3}{2l^3} dx. \quad (6)$$

Решая уравнение (6), получим $\sigma_{cp} = 0,375$. На основании выражений (3), (4) и (6) и с учетом равнодействующей силы, действующую на две пружины, суммарную силу трения о воздух можно записать в виде

$$F_c = \frac{\rho_v}{2} (c_e A_e + 0,28 c_n A_n) \dot{y}^2. \quad (7)$$

В процессе колебаний происходит рассеяние энергии в материале пружин. Зависимость сил внутреннего трения от деформации достаточно сложна [3, 4, 5], поэтому для облегчения теоретического исследования можно воспользоваться эллиптической аппроксимацией петли механического гистерезиса [3]

$$F_r = \phi Y_m^p \sqrt{1 - \frac{y^2}{Y_m^2}}, \quad (8)$$

где ϕ, p – коэффициенты, зависящая от формы, размеров и материала пружин; Y_m – амплитуда (максимальное отклонение) размаха колебаний, m .

В системе возбуждения автоколебаний действует сила освобождения F_o и – сила импульса F_n . Величина и фазовое положение этих сил зависит от ряда конструктивных параметров.

В измерительной системе с магнитоэлектрическим приводом при движении магнитной системы относительно катушек, в последних возникает индукционное напряжение

$$U = \frac{1}{2} B_n \pi (R + r) N_k \dot{y}, \quad (9)$$

где B_n – магнитная индукция, $Tл = B \cdot c/m^2$; N_k – количество витков катушки.

Отметим, что количество витков катушки может быть найдено из выражения

$$N_k = \frac{4H_k(R-r)}{\pi d_n^2} K_3, \quad (10)$$

где H_k – высота катушки, м; d_n – диаметр провода катушки, м; K_z – коэффициент укладки провода катушки.

При прохождении по катушке освобождения управляющего тока возникает сила освобождения

$$F_o = \frac{y}{R_n + R_{вх}} \left[B_H \pi (R + r) \frac{N_k}{2} \right]^2, \quad (11)$$

где R_o , $R_{вх}$ – соответственно, активное сопротивление катушки освобождения и входное сопротивление усилителя-формирователя, Ом.

Если $R_{вх} \gg R_o$, то уравнение (11) принимает вид

$$F_o = \frac{y}{R_{вх}} \left[B_H \pi (R + r) \frac{N_k}{2} \right]^2. \quad (12)$$

В окрестности положения равновесия колебательной системы, в катушке импульса протекает ток J , сформированный усилителем-формирователем. Для магнитоэлектрического привода можно пренебречь индуктивностью этой катушки и принять (полагая, что выходным каскадом указанного усилителя является ключ)

$$J = \frac{U_{ист} - U}{R_H + R_{вых}}, \quad (13)$$

где $U_{ист}$ – напряжение источника питания, В; R_H , $R_{вых}$ – соответственно, активное сопротивление катушки импульса и выходное сопротивление усилителя, Ом.

С учетом (13) сила импульса для магнитоэлектрического привода может быть выражена [3]

$$F_H = \frac{B_H \pi (R+r) N_k}{2(R_H + R_{вых})} \left[U_{ист} - B_H \pi (R+r) \frac{N_k}{2} y \right] = B_H \pi (R+r) \frac{N_k}{2} J - \frac{[B_H \pi (R+r) N_k]^2}{4(R_H + R_{вых})} = B_H \pi (R+r) \frac{N_k}{2} \left(J - \frac{B_H \pi (R+r) \frac{N_k}{2}}{2(R_H + R_{вых})} y \right). \quad (14)$$

В силу недостатка справочных данных составляющие сил трения удобно объединить. Для рассматриваемого типа колебательного звена на ограниченном участке амплитуд колебаний трение можно рассматривать как линейное вязкое, при этом сила трения выражается зависимостью

$$F_{тр} = h_n \dot{y}, \quad (15)$$

где h_n – интегральный коэффициент трения, Н·с/м.

Величину h_n можно определить экспериментально следующим образом. Выбирают ряд значений измеряемой массы m_n . Для каждого значения m_n регистрируют осциллограмму свободных затухающих колебаний. Затем разбивают амплитудный интервал на несколько участков и для каждого участка вычисляют значение интегрального коэффициента трения

$$h_n = \frac{\ln Y_{m1}/Y_{mN} \cdot \sqrt{mD}}{\pi N} = \frac{2 \ln Y_{m1}/Y_{mN} \cdot m}{t_{1-N}}, \quad (16)$$

где Y_{m1} , Y_{mN} – соответственно, начальное и конечное значение амплитуды колебаний для участка, м; N – количество периодов колебаний при изменении амплитуды от Y_{m1} до Y_{mN} ; t_{1-N} – время свободных затухающих колебаний от амплитуды Y_{m1} до амплитуды Y_{mN} , с.



С целью сокращения записи выражений (12) и (14) введем коэффициенты P_o, F_1 и $F_{но}$, с учетом которых указанные уравнения примут вид

$$F_o = P_o \dot{y}, \tag{17}$$

$$F_n = F_1 J - F_{но} \dot{y}, \tag{18}$$

где $P_o = \frac{[B_n \pi (R+r) N_k]^2}{4 R_{вх}}$, Н·с/м; $F_1 = B_n \pi (R+r) \frac{N_k}{2}$, В·с/м; $F_{но} = \frac{[B_n \pi (R+r) N_k]^2}{4 (R_n + R_{вх})}$, Н·с/м.

Тогда уравнение автоколебательного движения емкости с кормом будет представлять собой алгебраическую сумму полученных сил

$$m \ddot{y} + D y = -D \varepsilon (y + y_0)^3 - F_{но} \dot{y} - P_o \dot{y} - h_n \dot{y} + F_1 J \tag{19}$$

или

$$m \ddot{y} + D y = D \left[-\varepsilon (y + y_0)^3 - \frac{F_{но}}{D} \dot{y} - \frac{P_o}{D} \dot{y} - \frac{h_n}{D} \dot{y} + \frac{F_1 J}{D} \right]. \tag{20}$$

Обозначив

$$F(y, \dot{y}) = -\varepsilon (y + y_0)^3 - \frac{F_{но}}{D} \dot{y} - \frac{P_o}{D} \dot{y} - \frac{h_n}{D} \dot{y} + \frac{F_1 J}{D}, \tag{21}$$

получим

$$\ddot{y} + w^2 y = w^2 F(y, \dot{y}), \tag{22}$$

где $w^2 = \frac{D}{m}$.

В обычных условиях при отсутствии больших возмущающих воздействий рассматриваемая система обладает высокой добротностью и близка к линейной консервативной системе. Следовательно, правая часть уравнения (22) мала и период автоколебания будет мало отличаться от периода свободных колебаний консервативной системы.

Для решения уравнения (22) применим метод медленно меняющихся коэффициентов, а также метод гармонической линеаризации [6].

Ищем решение этого уравнения в виде

$$\begin{cases} y = Y_m \sin(wt + \psi); \\ \dot{y} = Y_m w \cos(wt + \psi). \end{cases} \tag{23}$$

где t – время колебаний, с; Y_m – амплитуда колебаний, м; и ψ – начальная фаза медленно меняющейся функции времени, определяемые из уравнений Ван-дер-Поля

$$\begin{cases} \frac{dY_m}{dt} = \frac{w}{2\pi} \int_0^{2\pi} F(Y_m \sin \eta, Y_m w \cos \eta) \cos \eta d\eta; \\ \frac{d\psi}{dt} = -\frac{w}{2\pi Y_m} \int_0^{2\pi} F(Y_m \sin \eta, Y_m w \cos \eta) \sin \eta d\eta, \end{cases} \tag{24}$$

где $\eta = wt + \psi$.

Зависимости (24) обычно приводят к виду

$$\begin{aligned} \frac{dY_m}{dt} &= \frac{w}{2} [h_1(Y_m) + h_2(Y_m) + \dots + h_i(Y_m)]; \\ \frac{d\psi}{dt} &= -\frac{w}{2Y_m} [q_1(Y_m) + q_2(Y_m) + \dots + q_i(Y_m)], \end{aligned} \tag{25}$$

где $h_1(Y_m), q_1(Y_m)$ – коэффициенты гармонической линеаризации отдельных членов нелинейной функции, определяемые по формуле

$$\begin{cases} h_i = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f_i(Y_m \sin \eta, Y_m w \cos \eta) \cos \eta d\eta; \\ q_i = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f_i(Y_m \sin \eta, Y_m w \cos \eta) \sin \eta d\eta, \end{cases} \quad (26)$$

где $f_i(Y_m \sin \eta, Y_m w \cos \eta)$ – i -й нелинейный член функции (21).

Пользуясь уравнением (26), определим коэффициенты гармонической линеаризации нелинейных функций выражения (21). Вычисленные значения коэффициентов приведены в таблице.

Таблица – Вычисленные значения коэффициентов

Наименование функции	Аналитическое выражение	Интервал отклонения емкости с кормом	Коэффициент гармонической линеаризации	
			h_i	q_i
1. Функция, характеризующая нелинейность восстанавливающей силы	$-\varepsilon (y_0 + y)^3$	от $-Y_m$ до Y_m и от Y_m до $-Y_m$	0	$-3\varepsilon Y_m (y_0^2 + \frac{Y_m^2}{4})$
2. Функция, характеризующая силу сопротивления от индукционного напряжения в катушке привода	$-\frac{F_{\text{ин}}}{D} \dot{y}$	То же	$-\frac{F_{\text{ин}} Y_m w}{D}$	0
3. Функция, характеризующая силу освобождения	$-\frac{P_o}{D} \dot{y}$	То же	$-\frac{P_o Y_m w}{D}$	0
4. Функция, характеризующая силу вязкого трения	$-\frac{h_{\text{в}}}{D} \dot{y}$	То же	$-\frac{h_{\text{в}} Y_m w}{D}$	0
5. Функция, характеризующая силу импульса	$\frac{F_1 J}{D}$	от $-y_1$ до y_2	$\frac{F_1 J}{\pi D} \cdot \frac{y_1 + y_2}{Y_m}$	$\frac{F_1 J}{\pi D} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{y_2}{Y_m}\right)^2} - \sqrt{1 - \left(\frac{y_1}{Y_m}\right)^2} \right)$ или при $y_1, y_2 \ll Y_m$ $\frac{F_1 J}{\pi D} (y_1 + y_2) \frac{y_2 - y_1}{2Y_m^2}$

Подставив значения коэффициентов гармонической линеаризации в выражение (25) и учитывая, что за полный период колебания емкости с кормом сообщается два импульса, получим для автоколебательной системы с магнитоэлектрическим приводом

$$\begin{cases} \frac{dY_m}{dt} = \frac{w}{2\pi Y_m} \left[\frac{2F_1 J}{D} (y_1 + y_2) - \frac{\pi F_{\text{ин}} Y_m^2 w}{D} - \frac{\pi P_o Y_m^2 w}{D} - \frac{\pi h_{\text{в}} Y_m^2 w}{D} \right]; \\ \frac{d\psi}{dt} = -w \left[\frac{F_1 J}{\pi D} (y_1 + y_2) \frac{y_2 - y_1}{2Y_m^2} - \frac{3}{2} \varepsilon (y_0^2 + \frac{Y_m^2}{4}) \right]. \end{cases} \quad (27)$$

Уравнение (27) позволяет получить амплитудные характеристики автоколебательной системы, т. е. зависимости амплитуды автоколебаний емкости от измеряемой массы корма. Такие зависимости определяют возможный измерительный диапазон.

Амплитудная характеристика системы для измерения массы отражает энергетические соотношения в измерительной автоколебательной системе. Получить такую характеристику

можно в случае, если имеются сведения о притоке механической энергии к колебательной системе и о потерях энергии в ней.

Рассмотрим построение этой характеристики для системы с магнитоэлектрическим приводом. Стационарный автоколебательный, режим соответствует постоянному значению амплитуды, то есть $\frac{dY_m}{dt} = 0$.

Воспользуемся графоаналитическим методом решения данного выражения. Этот метод отличается высокой наглядностью и позволяет получить ясное представление физической картины практически всех явлений, связанных с динамикой (и статикой) измерительной системы, дает приемлемую для практических расчетов погрешность.

Перепишем уравнение $\frac{dY_m}{dt} = 0$ с учетом выражения (27)

$$\frac{2F_1J}{D}(y_1 + y_2) - \frac{\pi F_{\text{но}} Y_m^2 w}{D} - \frac{\pi P_o Y_m^2 w}{D} - \frac{\pi h_{\text{н}} Y_m^2 w}{D} = 0$$

и после преобразования получим

$$2F_1J(y_1 + y_2) - \pi F_{\text{но}} Y_m^2 w - \pi P_o Y_m^2 w - \pi h_{\text{н}} Y_m^2 w = 0. \quad (28)$$

Введем обозначения: $2F_1J(y_1 + y_2) - \pi F_{\text{но}} Y_m^2 w = W_+$; $\pi P_o Y_m^2 w = W_o$; $\pi h_{\text{н}} Y_m^2 w = W_-$. Тогда уравнение баланса энергии (28) примет вид

$$W_+ = W_o + W_-. \quad (29)$$

Энергия W_+ представляет собой энергию импульса. Первое слагаемое этого выражения физически соответствует случаю прямоугольной формы импульса J , а второе – потери энергии импульса за счет действия силы сопротивления вследствие наведения индукционного напряжения в катушке привода. Численно второе слагаемое существенно меньше первого, поэтому можно принять

$$W_+ = 2F_1J(y_1 + y_2). \quad (30)$$

Энергия освобождения W_o оказывается очень малой, поскольку коэффициент $P_o \ll F_{\text{но}}$, так как сопротивление входа $R_{\text{вх}}$ усилителя-формирователя велико. Поэтому энергией W_o можно пренебречь, следовательно, рассеиваемая энергия с высокой степенью приближения будет определяться энергией W_- от действия сил сопротивления, выраженных через интегральный коэффициент трения.

Окончательно уравнение баланса энергии запишется

$$W_+ = W_-, \quad (31)$$

или

$$2F_1J(y_1 + y_2) = \pi h_{\text{н}} Y_m^2 w. \quad (32)$$

Для получения амплитудной характеристики измерительной автоколебательной системы принятым методом нужно найти точки пересечения кривых рассеиваемой энергии за период колебания и кривых подводимой энергии за тот же интервал времени. Построение амплитудной характеристики показано на рис. 17.

Из точек пересечения линий W_- с линией W_+ проводят горизонталы до пересечения их с вертикалями проведенными из точек оси абсцисс, которые соответствуют значениям массы для кривых W_- . Через полученные точки пересечения проводят кривую, отражающую амплитудную характеристику данной измерительной системы, т. е. зависимость $Y_m = f(m_{\text{н}})$.

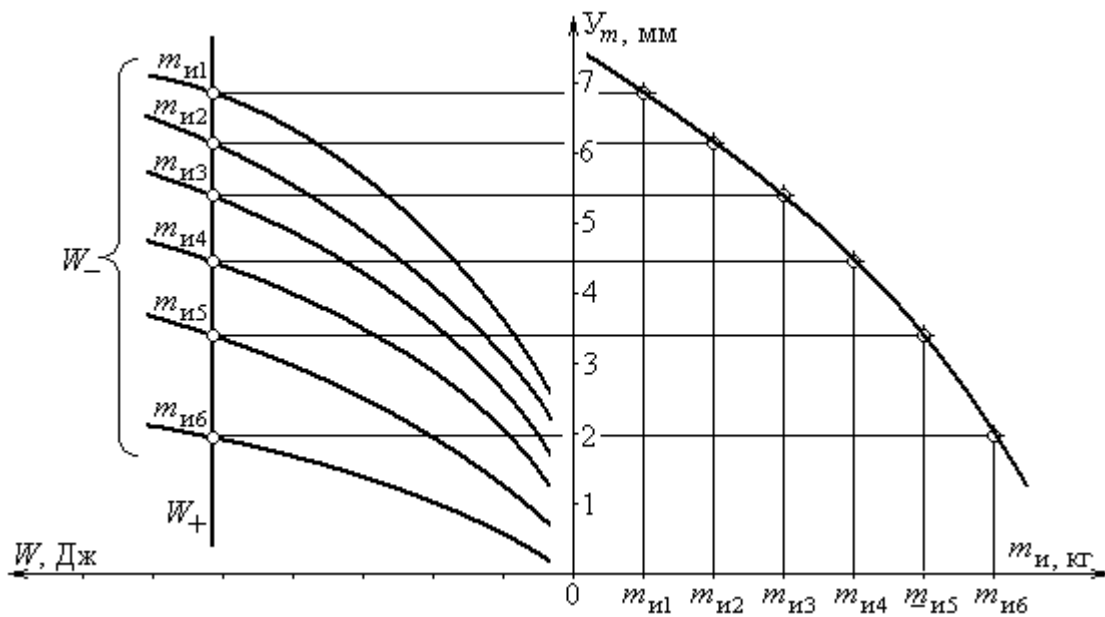


Рис. 17. Амплитудная характеристика измерительной колебательной системы

Зависимость $Y_m = f(m_{и})$ в общем случае имеет экстремум. Этот факт показывает, что для расширения возможного диапазона измерений необходимо, чтобы собственная масса измерительной автоколебательной системы m_0 была минимальной, т. е. чтобы экстремум функции $Y_m = f(m_{и})$ был смещен к центру интервала $m_{и}$. Максимальная амплитуда колебаний зависит от параметров системы формирования импульса привода (в частности, от порога чувствительности) и добротности системы. С уменьшением амплитуды добротность падает, поскольку параболически уменьшается колебательная энергия W_k

$$W_k = \frac{1}{2} m(\omega Y_m)^2.$$

Величина добротности влияет на стабильность частоты автоколебаний. При добротности меньше 0,5 колебательное звено становится аperiodическим. Вместе с тем при низких амплитудах может быть потеря устойчивости автоколебаний. Для исключения этого явления можно применить, например устройство, стабилизирующее амплитуду колебаний [7].

Таким образом, измерение массы корма в кормушке можно производить путем подвешивания последней на пружины с последующим введением получившейся колебательной системы в автоколебательный режим. По изменению частоты колебаний измеряют массу корма, оставшегося в кормушке и съеденного коровой, что позволяет вести персонализированный учет рациона питания последней.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Способ раздачи стебельчатых кормов и устройство для его осуществления. Пат. 2572199 Рос. Федерация: МПК А01К 5/00, А01F 29/00 / Оленев Е.А.; патентообладатель Оленев Е.А. – № 2014145240/13; заявлено 10.11.2014; опубликовано 27.12.2015, Бюл. № 36.
2. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. Москва: Наука, 1976. 608 с.
3. Аксельрод З.М. Проектирование часов и часовых систем. Ленинград: Машиностроение, 1981. 328 с.



4. Пановко Я.Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем. Москва: Физматгиз, 1960. 196 с.
5. Писаренко Г.С. Рассеяние энергии при механических колебаниях. Киев: Изд-во АН УССР, 1962. 436 с.
6. Бутенин Н.В. Элементы теории нелинейных колебаний. Ленинград: Судпромгиз, 1962. 196с.
7. Преобразователь амплитуда-код нестационарных механических колебаний. А.с. 1481888 СССР: МПК Н03М 1/60 / Оленев Е.А., Шарыгин Л.Н., Громов И.Ю.; заявитель: Владимирский политехнический институт. – № 4201252; заявлено 02.03.1987; опубликовано 23.05.1989.

REFERENCES

1. *Sposob razdachi stebel'chatyh kormov i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya* [The method of distribution of stem feeds and the device for its implementation]. Pat. 2572199 Ros. Federaciya: МПК А01К 5/00, А01F 29/00 / Olenov E.A.; patentoobladatel' Olenov E.A. – № 2014145240/13; zayavleno 10.11.2014; opublikovano 27.12.2015, Byul. № 36.
2. Belyaev N.M. *Soprotivlenie materialov* [Resistance of materials]. Moscow: Nauka, 1976. 608 p.
3. Aksel'rod Z.M. *Proektirovanie chasov i chasovyh system* [Design of watches and watch systems]. Leningrad: Mashinostroenie, 1981. 328 p.
4. Panovko Ya.G. *Vnutrennee trenie pri kolebaniyah uprugih system* [Internal friction during vibrations of elastic systems]. Moscow: Fizmatgiz, 1960. 196 p.
5. Pisarenko G.S. *Rasseyanie energii pri mekhanicheskikh kolebaniyah* [Energy dissipation under mechanical vibrations]. Kiev: Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1962. 436 p.
6. Butenin N.V. *Elementy teorii nelinejnyh kolebanij* [Elements of the theory of nonlinear oscillations]. Leningrad: Sudpromgiz, 1962 p.
7. *Preobrazovatel' amplituda-kod nestacionarnyh mekhanicheskikh kolebanij* [The amplitude-code converter of unsteady mechanical vibrations]. A.s. 1481888 SSSR: МПК N03M 1/60 / Olenov E.A., Sharygin L.N., Gromov I.Yu.; zayavitel': Vladimirskij politekhnicheskij institut. – № 4201252; zayavleno 02.03.1987; opublikovano 23.05.1989.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Оленев Евгений Александрович – доктор технических наук, профессор, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых (600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, 87, e-mail: olenevea@mail.ru)

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Olenov Evgeny Alexandrovich – Dr.Sci. (Eng.), Prof., Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov, (600000, Russia, Vladimir, Gorky St. 87, e-mail: olenevea@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 24.10.2023; одобрена после рецензирования 04.11.2023, принята к публикации 14.11.2023.

The article was submitted 24.10.2023; approved after reviewing 04.11.2023; accepted for publication 14.11.2023.