

УДК 636.2.3:637.116

UDC 636.2.3:637.116

**РЕГУЛЯТОР ГЛУБИНЫ ВАКУУМА  
В ПОДСОСКОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ  
ДОИЛЬНОГО СТАКАНА  
С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРИВОДОМ****THE REGULATOR OF VACUUM LEVEL FOR  
A TEAT CUP WITH ELECTROMAGNETIC  
DRIVE**

Машлякевич Александр Анатольевич  
аспирант кафедры ТОЭ и ЭСХ

Mashlyakevich Alexander Anatolievich  
postgraduate student of the Chair of Theoretical Bases  
of Electrical engineers and Electrification of agricul-  
ture

*Азово-Черноморский инженерный институт  
ФБОУ ВПО «Донской государственный аграрный  
университет», г. Зерноград, Россия*

*Azovo-Black Sea engineering institute FBEI HSE  
Don State Agrarian University, Zernograd, Russia*

Рассмотрен регулятор вакуума под соском для адаптивной САУ доения коров с электромагнитным приводом. Приведены дифференциальные уравнения, описывающие рабочий режим регулятора, и его принципиальная и функциональная схемы, а также результаты экспериментальных исследований

This article describes the vacuum regulator of teat cup for automated control of adaptive control system milking cows with electromagnetic drive. There were listed differential equals describing working condition of vacuum regulator and its concept and functional schemes and results of experimental researches

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ, РЕГУЛЯТОР, ПОДСОСКОВОЕ ПРОСТРАНСТВО, ГЛУБИНА ВАКУУМА, АДАПТИВНЫЙ, САУ, ДОЕНИЕ, СТАТИКА, ДИНАМИКА

Keywords: ELECTROMAGNETIC, REGULATOR, TEAT CUP SPACE, VACUUM LEVEL, ADAPTING, AUTOMATIC CONTROL SYSTEM, MILKING, STATICS, DYNAMICS

Многолетнее использование автоматизированных доильных установок, выпускаемых отечественными и зарубежными производителями, показывает, что существенного снижения у коров заболеваний маститами машинного происхождения не произошло. Основная причина этого заключается в том, что от 20 до 70 % коров на различных фермах России имеют неравномерное развитие вымени, и отдельные доли вымени выдаиваются с опасными передержками [2]. Одним из перспективных направлений совершенствования технических средств машинного доения коров остаётся создание адаптивных систем автоматизированного управления доением. В настоящее время предложены способы и алгоритмы молоковыведения по долям вымени адекватного молокоотдаче. Для их реализации необходимы соответствующие технические средства, в частности, уже есть датчики интенсивности потока молока, средства идентификации коров, манипуляторы [6, 7]. Однако пока нет удобного для почетвертного доения регулятора

вакуума в подсосковом пространстве доильного стакана (далее «регулятор»), обеспечивающего необходимый режим доения в соответствии с предложенным алгоритмом [3]. Регулятор должен обеспечить изменение глубины вакуума от 0 до  $1,2 P_n$  (где  $P_n$  – номинальная глубина вакуума в доильном стакане – для аппаратов отсасывающего типа составляет – 48 кПа) и управление от внешнего управляющего устройства – микроконтроллера при небольших габаритах и минимуме коммуникаций.

За основу такого регулятора, принципиальная схема которого приведена на рисунке 1, принят пневматический повторитель [1], имеющий молочную 1 и управляющую 2 камеры, разделённые мембраной 3, которая жёстко соединена с молочным клапаном 4. Для изменения глубины вакуума в управляющей камере используется узел «сопло-заслонка» 5 с электромагнитным приводом 6. Для обеспечения контроля интенсивности молоковыведения и организации обратной связи в управляющей камере размещён ёмкостный датчик перемещения мембраны 7 [4].

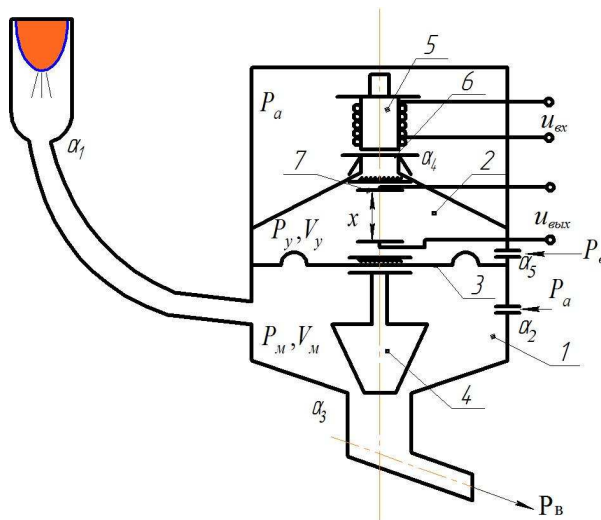


Рисунок 1. Принципиальная схема регулятора вакуума в подсосковом пространстве доильного аппарата:

- 1 – молочная камера; 2 – управляющая камера; 3 – мембрана;
- 4 – молочный клапан; 5 – электромагнитный привод;
- 6 – узел «сопло – заслонка»; 7 – ёмкостный датчик перемещения мембраны

Согласно алгоритму [3], управляющий сигнал на регулятор формирует микроконтроллер, периодически вычисляя по интенсивности молоковыведения динамические характеристики биологической составляющей объекта управления. Для обеспечения необходимого качества регулирования и обоснования конструктивных параметров регулятора необходимо иметь математическое описание самого регулятора.

Поэтому целью настоящей работы является изучение некоторых статических и динамических характеристик предложенного регулятора вакуума.

Для анализа динамики регулятора на основании его принципиальной схемы составлена функциональная схема пневматической составляющей системы (рисунок 2) [5]. Согласно этой схеме была получена система уравнений, описывающая баланс расходов воздуха в камерах регулятора:

$$\begin{cases} \Delta G_1 = G_1 + G_2 - G_3; \\ \Delta G_y = G_4 - G_5, \end{cases} \quad (1)$$

где  $G_1, G_2, G_3, G_4, G_5$  – массовые расходы воздуха через дроссели  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ .

При математическом описании процессов в регуляторе приняты допущения того, что истечения через дроссели  $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$  – имеют турбулентный характер, а через дроссель  $\alpha_1$  – ламинарный [1]. Тогда изменение массового расхода воздуха в молочной камере регулятора вакуума

$$\Delta G_1 = \frac{p_m \cdot V_m}{R \cdot T}, \quad (2)$$

где  $p_m, V_m$  – соответственно давление и объём в молочной камере регулятора;  $R$  – газовая постоянная, для воздуха  $R = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;  $T$  – температура в молочной камере, принимаем  $T = \text{const}$ .

Массовый расход молоковоздушной смеси через сфинктер соска доли вымени – дроссель  $\alpha_1$

$$G_1 = \alpha_1 \cdot (p_c - p_m), \tag{3}$$

где  $p_c$  – давление в соске доли вымени, зависящее от молоковыведения и стадии молокоотдачи (физиологических особенностей животного).

Массовые расходы воздуха через дроссели – жиклёры молочной камеры  $\alpha_2$  и молочного клапана  $\alpha_3$ , соответственно, равны:

$$G_2 = \alpha_2 \cdot \sqrt{P_a - p_m}; \tag{4}$$

$$G_3 = \alpha_3 \cdot \sqrt{p_m - P_b}, \tag{5}$$

где  $P_a$  и  $P_b$  – соответственно, атмосферное давление и давление, создаваемое вакуумной установкой под молочным клапаном.

Изменение массового расхода воздуха в управляющей камере регулятора вакуума

$$\Delta G_y = \frac{p_y \cdot V_y}{R \cdot T}, \tag{6}$$

где  $p_y, V_y$  – соответственно давление и объём в управляющей камере регулятора.

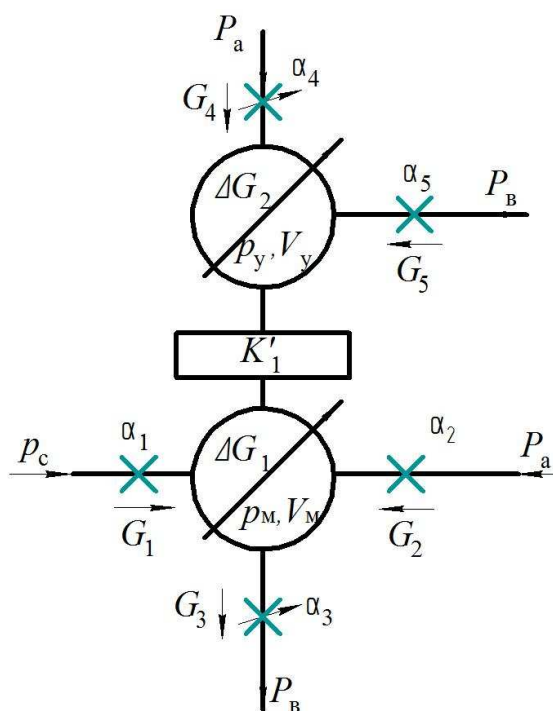


Рисунок 2. Функциональная схема пневматической составляющей системы регулятора вакуума

Дроссель  $\alpha_4$  (узел «сопло – заслонка») имеет ступенчатую характеристику, тогда массовый расход воздуха через него будет определяться системой уравнений:

$$\begin{cases} G_4 = 0 & \text{при } u_{ex} = 0; \\ G_4 = \alpha_4 \cdot \sqrt{P_a - p_y} & \text{при } u_{ex} > 0, \end{cases} \quad (7)$$

где  $u_{ex}$  – напряжение на катушке электромагнита.

Массовый расход воздуха через дроссель  $\alpha_5$  – жиклёр в стенке молочной камере регулятора

$$G_5 = \alpha_5 \cdot \sqrt{p_y - P_b}. \quad (8)$$

Следует также учесть, что корпус регулятора имеет ограниченный объём  $V$  и  $V = V_{y0} + V_{m0} = const$ . Увеличение объёма  $V_m$  при движении мембраны вверх при увеличении потока молока приводит к соответственному уменьшению объёма  $V_y$ . Тогда необходимо учитывать следующее равенство:

$$V_y = (V - V_{m0}) \pm \Delta V; \quad (9)$$

где  $\Delta V = \pm \Delta V_y = \pm \Delta V_m$ .

Предположим, что изменение объёма  $\Delta V$  при перемещении мембраной при прохождении через молочную камеру потока молока представляет собой объём усечённого конуса, высота которого равна перемещению мембраны  $x$ , и описывается уравнением

$$\Delta V = S_m \cdot x \text{ или } \Delta V = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot \left( \frac{D_1^2 + D_2^2 + D_1 \cdot D_2}{4} \right) \cdot x,$$

где  $S_m$  – эффективная площадь мембраны;  $D_1$  и  $D_2$  – диаметры заземления мембраны и жёсткого центра.

Перемещение мембраны (расстояние между обкладками емкостного датчика) зависит от жесткости мембраны и изменения давлений в молочной и управляющей камерах

$$x = c_m \cdot (p_m - p_y), \quad (10)$$

где  $C_m$  – жёсткость мембраны.

После подстановки уравнений расходов воздуха через соответствующие дроссели в уравнения (1), последующих дифференцирования, линеаризации и преобразований были получены уравнения, описывающие динамику регулятора:

$$T_1 \cdot \frac{dp_y}{dt} + p_y = T_2 \cdot \frac{dp_m}{dt} + k_1 \cdot \alpha_4; \quad (11)$$

$$T_3 \cdot \frac{dp_m}{dt} + p_m = T_4 \cdot \frac{dp_y}{dt} + k_2 \cdot \alpha_1 - k_3 \alpha_3 + k_4 \cdot p_c; \quad (12)$$

$$x = k_5 p_m - k_6 p_y; \quad (13)$$

$$u_{\text{СВЫХ}} = \varphi(x); \quad (14)$$

$$\alpha_4 = \varphi(u_{\text{ВХ}}), \quad (15)$$

где  $T_1, T_2, T_3, T_4$  – постоянные времени камер регулятора;  $k_1, k_2, k_3, k_4$  – передаточные коэффициенты;  $u_{\text{СВЫХ}}$  – выходное напряжение на емкостном датчике;  $u_{\text{ВХ}}$  – управляющий сигнал – напряжение, подаваемое на катушку электромагнитного клапана (узла «сопло – заслонка»).

Постоянные времени и передаточные коэффициенты уравнений (11–15) зависят от конструктивных параметров и могут быть вычислены по выражениям:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1 = \frac{V - V_{m0} - S_{\text{эф}} \cdot P_{m0} \cdot C_m}{R \cdot T \cdot A}; T_2 = \frac{S_{\text{эф}} \cdot P_{y0} \cdot C_m}{R \cdot T \cdot A}; \\ T_3 = \frac{V_{m0} - S_{\text{эф}} \cdot P_{y0} \cdot C_m}{R \cdot T \cdot B}; T_4 = \frac{P_{m0} \cdot S_{\text{эф}} \cdot C_m}{R \cdot T \cdot B}; \\ k_1 = \frac{\sqrt{P_a - P_{y0}}}{A}; k_2 = \frac{P_c}{B}; k_3 = \frac{\sqrt{P_{m0} - P_b}}{B}; \\ k_4 = \frac{\alpha_{10}}{B}; k_5 = k_6 = c_m; \\ A = \frac{2 \cdot P_{y0} \cdot S_{\text{эф}} \cdot C_m}{R \cdot T} + \frac{\alpha_{40}}{2 \cdot \sqrt{P_a - P_{y0}}} - \frac{\alpha_5}{2 \cdot \sqrt{P_a - P_{y0}}}; \\ B = \frac{2 \cdot P_{m0} \cdot S_{\text{эф}} \cdot C_m}{R \cdot T} - \alpha_{10} - \frac{\alpha_2}{2 \cdot \sqrt{P_a - P_{m0}}} + \frac{\alpha_{30}}{2 \cdot \sqrt{P_{m0} - P_b}}, \end{array} \right. \quad (16)$$

где «0» в индексах физических величин означает начальные условия интегрирования.

Полученное математическое описание процессов в регуляторе позволяет вычислять постоянные времени и коэффициенты уравнений, за исключением проводимости дросселя  $\alpha_4$ , имеющего ступенчатую характеристику. Из анализа уравнений (10) – (13) также следует, что между управляющей и молочной камерой существует обратная связь, обусловленная взаимным изменением объёмов управляющей и молочной камер.

Для подтверждения адекватности полученной модели регулятора, а также установления некоторых коэффициентов уравнений был изготовлен макетный образец регулятора, и выполнены его исследования на разработанной экспериментальной установке (рисунок 3).

Из уравнений (11) и (12) видно, что при постоянных конструктивных параметрах, изменять давление  $p_m$  в подсосковой камере можно, меняя проводимость дросселя  $\alpha_4$  – узла «сопло – заслонка». Очевидны два варианта регулирования проводимости узла «сопло – заслонка»: аналоговый (за счёт плавного открывания и закрывания заслонки) и дискретный (за счёт периодического открывания заслонки, например электромагнитом, путём управления частотой открывания заслонки  $f$ ).

Аналоговый способ регулирования вакуума предъявляет более жёсткие требования к качеству изготовления узла «сопло – заслонка», к особой конструкции клапана, также следует учитывать, что пружина, удерживающая заслонку в закрытом состоянии, со временем меняет свои характеристики, что приведёт к дополнительным погрешностям регулирования. Дискретный способ предпочтительнее, поскольку устраняет вышеуказанные недостатки и обеспечивает более плавное регулирование глубины вакуума в подсосковой камере. В этом случае при  $u_{ex} = const$  уравнение (12) примет вид

$$T_1 \cdot \frac{dp_y}{dt} + p_y = T_2 \cdot \frac{dp_m}{dt} + k_7 \cdot f, \quad (17)$$

где  $k_7$  – передаточный коэффициент, связывающий изменение давления в управляющей камере с частотой управляющего сигнала;  $f$  – частота управляющего сигнала  $u_{вх}$ .

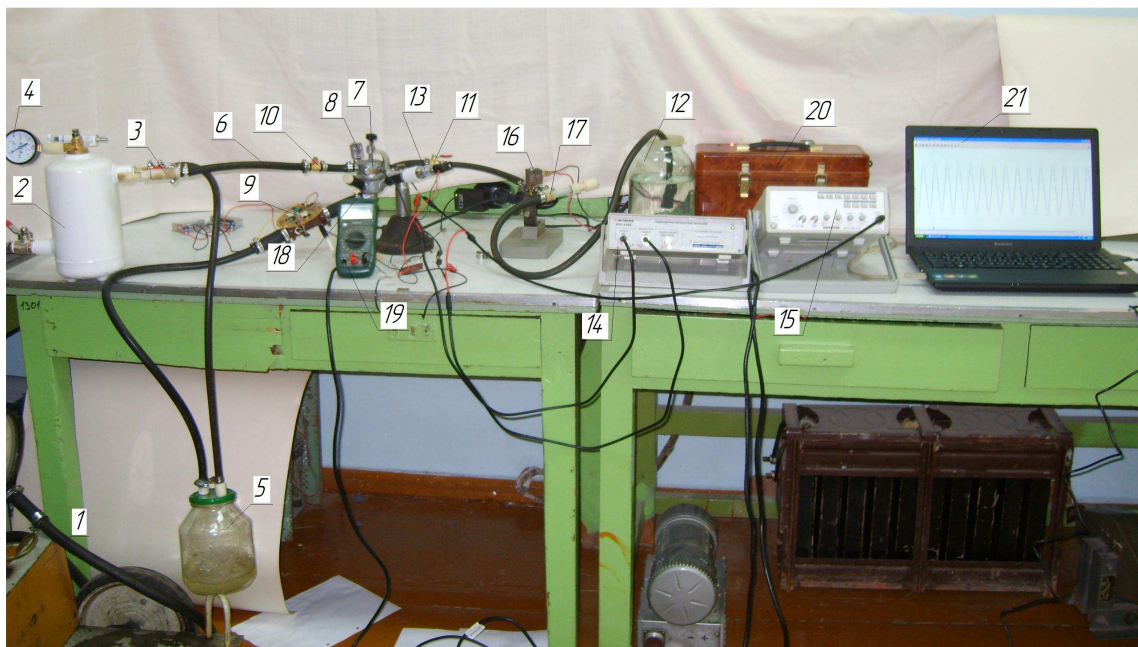


Рисунок 3. Экспериментальная установка для исследований статических и динамических характеристик электромагнитного регулятора вакуума:

- 1 – вакуумная установка агрегата индивидуального доения АИД-2;
- 2 – вакуумный баллон; 3 – регулирующий клапан; 4 – вакуумметр;
- 5 – ёмкость для молока; 6 – гибкий трубопровод; 7 – регулятор вакуума;
- 8 – электропривод регулятора; 9 – датчик расхода молока;
- 10 – регулируемый досель  $\alpha_5$ ; 11 – регулирующий кран; 12 – ёмкость с молоком;
- 13 – датчик вакуумметрического давления; 14 – электронный осциллограф; 15 – генератор гармонических колебаний; 16 – запирающий электромагнитный клапан; 17 – вентиль регулирования потока жидкости;
- 18 – ёмкостный датчик; 19 – мультиметр; 20 – блок питания с таймером;
- 21 – ЭВМ

Теоретическая зависимость напряжения на обкладках емкостного датчика (уравнение (14)) может быть определена по выражению

$$U_{C_{вых}} = \frac{U \cdot x}{\sqrt{R^2 + \frac{x^2}{\omega^2 \cdot S_a^2}}}, \quad (18)$$



где  $U$  – напряжение питания датчика;  $\omega$  – частота подаваемого напряжения;  $R$  – величина сопротивления добавочного резистора емкостного датчика;  $x$  – расстояние между обкладками емкостного датчика.

Полученные экспериментальные зависимости (рисунок 4) подтверждают возможность плавного регулирования глубины вакуума в молочной и подсосковой камере доильного стакана посредством изменения частоты управляющего сигнала, без значительной зависимости от расхода молока.

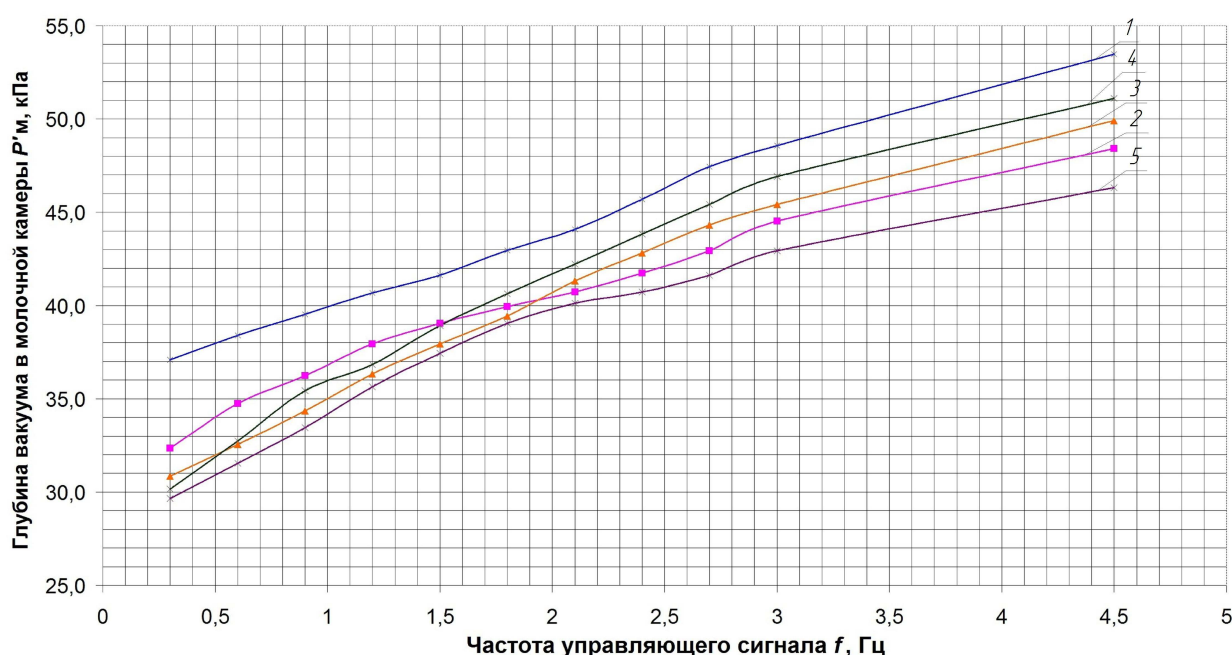


Рисунок 4. Зависимости глубины вакуума в молочной камере от частоты управляющего сигнала электромагнитного клапана  $P'_m = \varphi(f)$ :  
 1 – при  $G = 7,5$  г/с; 2 – при  $G = 9,1$  г/с; 3 – при  $G = 10,39$  г/с; 4 – при  $G = 11$  г/с; 5 – при  $G = 13$  г/с

При проведении экспериментальных исследований была установлена зависимость величины перемещения мембраны от расхода молока  $x = \varphi(G)$  электромагнитного регулятора вакуума в подсосковой камере доильного стакана (рисунок 5). Результаты эксперимента показали, что зависимость перемещения мембраны  $x$  от расхода молока близка к линейной при принятой форме молочного клапана и в рабочей области описы-

ваются уравнением  $x = -0,275G + 8,0167$ , коэффициент детерминации  $R^2 = 0,9734$ .

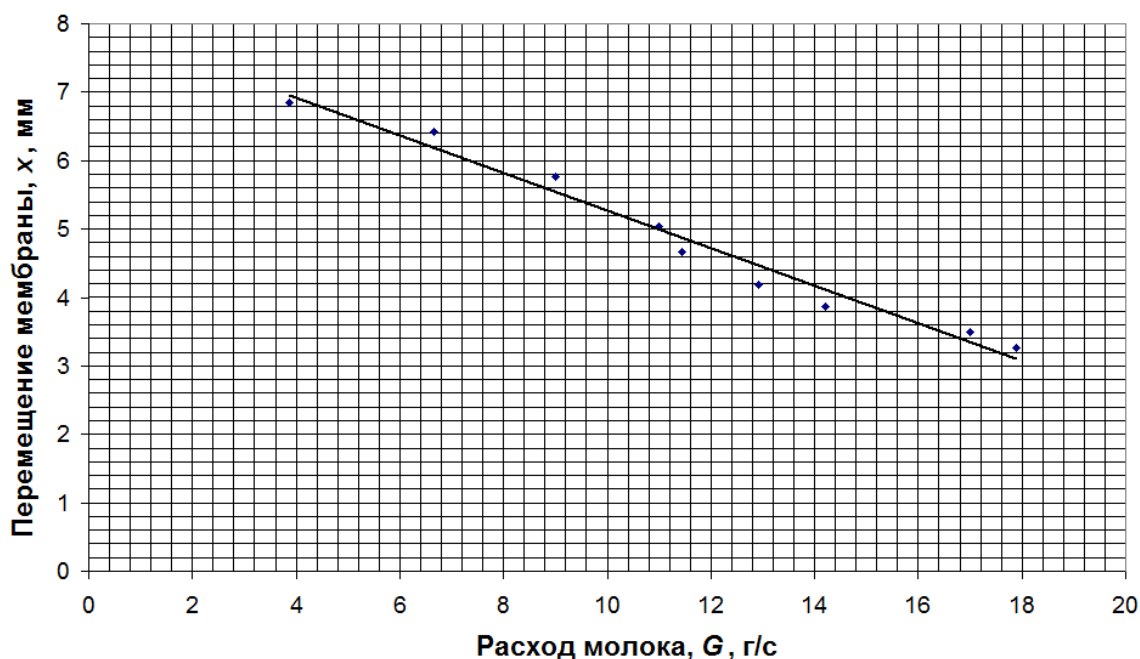


Рисунок 5. Зависимость перемещения мембраны от расхода молока  $x = \varphi(G)$

Установлена также зависимость выходного напряжения на обкладках емкостного датчика от расхода молока  $G$ ,  $U_{\text{СВЫХ}} = \varphi(G)$  (рисунок 6).

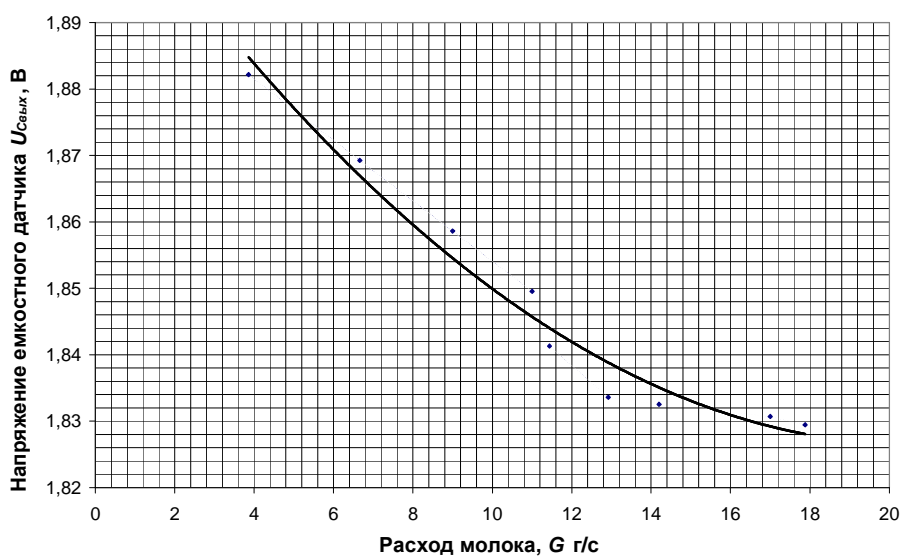


Рисунок 6. Зависимость выходного напряжения на обкладках емкостного датчика от расхода молока  $U_{\text{СВЫХ}} = \varphi(G)$

Результаты эксперимента показали, что напряжение  $U_{\text{Свых}}$  имеет полиномиальную зависимость от расхода молока  $G$  и описывается уравнением  $U_{\text{Свых}} = -0,0002G^2 - 0,0085G + 1,9147$ , коэффициент детерминации  $R^2 = 0,9691$ .

На основании полученных исследований сделаны следующие выводы.

Полученное математическое описание статики и динамики регулятора вакуума в подсосковом пространстве доильного стакана можно использовать для оптимизации его параметров и режимов работы, а также получения его компьютерной модели.

Подтверждена экспериментально возможность регулирования вакуума посредством изменения частоты дросселирования воздуха в управляющую камеру регулятора. Установлено также, что по выходному сигналу емкостного датчика перемещения мембраны в процессе регулирования можно контролировать интенсивность молоковыведения и использовать полученную информацию при управлении САУ доением.

#### Список литературы

1. Винников И.К. Технологии, системы и установки для комплексной механизации и автоматизации доения коров / И. К. Винников, О. Б. Забродина, Л.П. Кормановский: Под ред. Л.П. Кормановского. – Зерноград, 2001. – 354 с.
2. Забродина, О.Б. Доильный аппарат как объект управления // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2001. № 11.
3. Забродина О.Б. Обоснование способа адаптивного управления процессом доения коров / О.Б. Забродина, О.И. Мартыненко // Механизация, электрификация животноводства, растениеводства. 2010. № 1.
4. Машлякевич А.А. Обоснование выбора датчика контроля перемещения мембраны регулятора вакуума для адаптивной САУ доения // Инновации в сельском хозяйстве 1(6)/2014: сборник научных трудов по материалам всероссийской научно-практической конференции ВИЭСХ. – М., 2014 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ej.viesh.ru/wp-content/uploads/2014/04/insel6.pdf>
5. Машлякевич, А.А. Регулятор вакуума под соском для адаптивной САУ доением коров // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК: Материалы Международной научно-практической конференции, посвящённой 60-летию Белорусского государственного аграрного технического университета и памяти первого ректора БИМСХ (БГАТУ), доктора технических

наук, профессора В.П. Сулова (Минск, 4–6 июня 2014 г.). В 2 ч. Ч.2 / Под общей ред. И.Н. Шило, Н.А. Лабушева. – Минск: БГАТУ, 2014.

6. Патент №2315473 U1, МПК А 01 J 5/01. Способ измерения расхода молока и устройство для его осуществления / О.Б. Забродина, С.А. Моренко (РФ) – №2005229218/28; заявл. 21.06.2005; опубликовано 01.07.2008, Бюл. № 34.

7. Ужик В.Ф. Управление режимами доения адаптивными доильными аппаратами // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2008. Т. 18, № 4.

### References

1. Vinnikov I.K. Tehnologii, sistemy i ustanovki dlja kompleksnoj mehanizacii i avtomatizacii doenija korov / I. K. Vinnikov, O. B. Zabrodina, L.P. Kormanovskij: Pod red. L.P. Kormanovskogo. – Zernograd, 2001. – 354 s.

2. Zabrodina, O.B. Doil'nyj apparat kak ob#ekt upravlenija//Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hoz'jajstva, 2001, № 11.

3. Zabrodina O.B. Obosnovanie sposoba adaptivnogo upravlenija processom doenija korov / O.B. Zabrodina, O.I. Martynenko. //Mehanizacija, jelektrifikacija zhivotnovodstva, rastenievodstva, № 1, 2010

4. Mashljakevich, A.A. Obosnovanie vybora datchika kontrolja peremeshhenija membrany reguljatora vakuuma dlja adaptivnoj SAU doenija// Innovacii v sel'skom hoz'jajstve 1(6)/2014: sbornik nauchnyh trudov po materialam vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii VIJeSH. – Moskva, 2014 [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://ej.viesh.ru/wp-content/uploads/2014/04/insel6.pdf>

5. Mashljakevich, A.A. Reguljator vakuuma pod soskom dlja adaptivnoj SAU doeniem korov // Sovremennye problemy osvoenija novoj tehniki, tehnologij, organizacii tehničeskogo servisa v APK: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, posvjashhjonnoj 60-letiju Belorusskogo gosudarstvennogo agrarnogo tehničeskogo universiteta i pamjati pervogo rektora BIMSH (BGATU), doktora tehničeskikh nauk, professora V.P. Suslova (Minsk, 4-6 ijunja 2014 g.). V 2 ch. Ch.2/ pod obshhej red. I.N. Shilo, N.A. Labusheva. – Minsk : BGATU, 2014.

6. Patent №2315473 U1, МПК А 01 J 5/01. Способ измерения расхода молока и устройство для его осуществления / О.Б. Забродина, С.А. Моренко (РФ) – №2005229218/28; заявл. 21.06.2005; опубликовано 01.07.2008, Бюл. №34

7. Uzhik, V.F. Upravlenie rezhimami doenija adaptivnymi doil'nymi apparatami / Vestnik Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mehanizacii zhivotnovodstva, 2008, T.18, №4