

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 004.896:621.865

НЕЙРОСЕТЕВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРОМ ДОИЛЬНОГО РОБОТА

Статья поступила в редакцию 14.03.2018, в окончательном варианте – 23.05.2018.

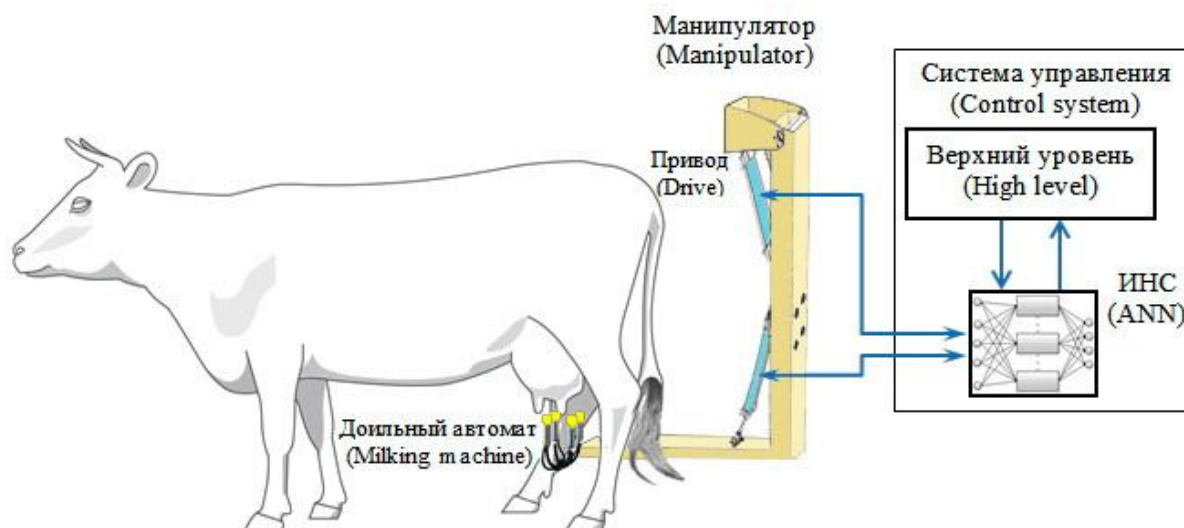
Сироткин Илья Алексеевич, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 105007, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2 Бауманская, 5 студент, e-mail: ilsir95@gmail.com

Воротников Сергей Анатольевич, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 105007, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2 Бауманская, 5 кандидат технических наук, доцент, e-mail: vorotn@bmstu.ru

Показана важность решения задач повышения производительности труда в области молочного животноводства, в том числе за счет автоматизации технологических процессов. Обосновано, что одним из важных направлений автоматизации может быть использование доильных роботов. Описана кинематическая схема трёхзвенного манипулятора такого робота. Представлена многоуровневая система управления указанным манипулятором, построенная по иерархическому принципу. Описан созданный прототип манипулятора. Предложен метод управления манипулятором со следящими пневматическими приводами, основанный на использовании искусственной нейронной сети. Приведен результат моделирования работы такого манипулятора, показаны недостатки использования базового варианта решения. Предложен алгоритм обучения нейронной сети, позволяющий повысить эффективность ее использования при управлении манипулятором. Создана математическая модель следящего пневматического привода в среде MATLAB. Приведены результаты его моделирования, выполнен их содержательный анализ. Результаты анализа доказывают перспективность предложенной кинематической схемы и алгоритмов управления манипулятором доильного робота.

Ключевые слова: манипулятор доильного робота, кинематическая схема, система управления, искусственная нейронная сеть, алгоритм обучения, следящий пневматический привод, математическое моделирование, обобщенные координаты

Графическая аннотация (Graphical annotation)



THE NETWORK CONTROL SYSTEM OF MANIPULATOR OF A MILKING ROBOT

The article was received by editorial board on 14.03.2018, in the final version – 23.05.2018.

Sirotkin Ilya A., Bauman Moscow State Technical University, 5, 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105007, Russian Federation student, e-mail: ilsir95@gmail.com

Vorotnikov Sergey A., Bauman Moscow State Technical University, 5, 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105007, Russian Federation Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, e-mail: vorotn@bmstu.ru

The paper shows the importance of solving the issues of increasing labor productivity in the field of dairy farming, incl. by means of technological processes automation. It is justified that one of the directions of such automation can be the usage of milking robots. A kinematic scheme of a three-link manipulator of such a robot is described. A multi-level hierarchical control system for the manipulator is presented, and the manipulator prototype is described. A method for controlling a manipulator with tracking pneumatic drives based on the use of an artificial neural network is proposed. The paper presents the results of modeling the manipulator work and the drawbacks of using the basic version of the solution. An artificial neural network training algorithm is proposed, which makes it possible to increase the efficiency of its usage for the manipulator control. A mathematical model of a tracking pneumatic drive was created in the MATLAB environment. The results of its modeling are presented, and the content analysis is carried out. The analysis results prove the potential of the proposed kinematic scheme and algorithms for the milking robot manipulator control.

Keywords: milking robot manipulator, kinematic diagram, control system, artificial neural network, training algorithm, tracking pneumatic drive, mathematical modeling, generalized coordinates

Введение. На сегодняшний день сельское хозяйство является одной из ключевых отраслей российской экономики, однако уровень его автоматизации остается достаточно низким [4, 5, 10]. Как следствие производительность труда лиц, занятых в сельском хозяйстве России, в целом является более низкой по сравнению с развитыми странами.

В частности, относительно невысокая производительность наблюдается и в сфере производства молочной продукции, включая получение первичного продукта (молока). Помимо прочего это ухудшает и условия труда персонала, снижает для него привлекательность работы на фермах. Одним из важнейших направлений повышения производительности и улучшения условий труда персонала следует считать автоматизацию технологических процессов. Основные направления автоматизации работы ферм: управление тепловлажностным и световым режимами помещений, в которых содержатся животные; приготовление кормов и их раздача; доение коров; уборка помещений.

При этом с точки зрения автоматизации наиболее сложным процессом является доение коров. Попытки автоматизации процесса доения коров на фермах предпринимались еще во времена СССР, в том числе с привлечением специалистов-разработчиков Минавиапрома.

Однако в настоящее время существующие в России роботизированные фермы используют комплектующие исключительно иностранного производства, и, в частности, компаний как Lelley Austronaut A4 [6], DeLaval VMS [9], GEAFarm Mione [7], SAC RDS Futureline [20]. Такой подход для владельцев ферм является финансово затратным, а в технологическом плане не учитывает сложившиеся традиции производства молока и содержания крупного рогатого скота на фермах России. Кроме того, следует учесть и риски по поставкам запасных частей, связанные с возможным введением различных санкций.

В отечественной литературе есть ряд публикаций по теме использования доильных роботов (ДР) [3, 11, 12]. Однако в них не в полной мере раскрыты вопросы выбора оптимальной кинематической схемы манипулятора ДР и реализации эффективного способа управления ею.

Поэтому целью данной статьи является разработка конструкции и системы управления манипулятором для автоматизированного ДР в условиях беспривязного содержания животных на ферме.

Постановка задачи. Анализ существующих решений в области систем автоматизированного доения показал, что манипуляторы ДР в основном используются для надевания стаканов доильного аппарата на соски вымени коровы. При этом такие манипуляторы, как правило, имеют меньшее число степеней свободы и меньшую зону достижимости объекта, чем манипуляторы промышленного назначения (рис. 1). В то же время для решения задачи автоматизации доения невозможно заранее определить конечную точку позиционирования концевой эффектора (схвата) манипулятора, так как положение коровы относительно него может быть различным (с учетом беспривязного содержания животных). Как следствие целесообразно использование адаптивных алгоритмов и соответствующих принципов самонаведения манипулятора, что не характерно для задач управления промышленными манипуляторами.

Другой особенностью манипулятора ДР является необходимость его непосредственного взаимодействия с животным. Поэтому конструкция манипулятора должна удовлетворять требованиям коллаборативной робототехники, в частности, по экологической чистоте, травмобезопасности и простоте обслуживания [3].

Одним из возможных решений является использование в манипуляторах ДР пневматических следящих приводов. Они достаточно просты и надежны в эксплуатации; сравнительно бесшумны; не осуществляют выбросов вредных веществ в окружающую среду. В то же время, по сравнению с гидравлическими или электрическими приводами аналогичного размера, основным недостатком пневмоприводов является сложность реализации эффективного закона управления. Причиной этой сложности являются существенные нелинейности, связанные со сжимаемостью воздуха, с нелинейными расходными характеристиками пневматических распределителей; со значительным трением штока цилиндра об уплотнительные кольца [17]. Эти обстоятельства приводят к тому, что использование традиционных для промышленных роботов линейных регуляторов, в случае ДР оказывается неэффективным. Поэтому требуются альтернативные методы управления, основанные на использовании искусственных нейронных сетей (ИНС) [2], нечеткой логики [16], скользящих режимов [18] и т.п.

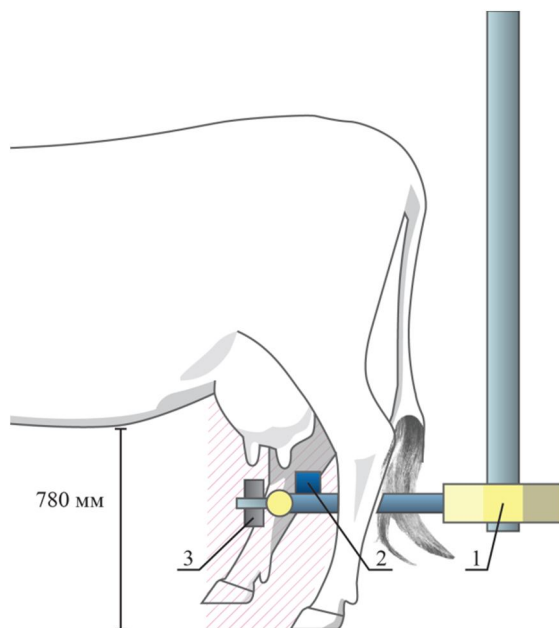


Рисунок 1 – Схема взаимного расположения манипулятора ДР и коровы: 1 – манипулятор, 2 – телекамера, 3 – доильный стакан

Разработка кинематической модели манипулятора. Основной задачей манипулятора ДР является обеспечение технологических процессов обработки вымени и последующего подведения стаканов доильного аппарата к заданной области.

В доильном аппарате обеспечивается пониженное давление в 0,44–0,50 атм. Поэтому строгая соосность стакана и соска коровы не требуется, достаточно подвести стакан на близкое расстояние к точке на кончике соска (затем, за счет пониженного давления, произойдет захват соска стаканом). Это позволяет использовать достаточно простую кинематическую схему манипулятора с тремя поворотными и одной линейной степенями подвижности (рис. 2). Отметим, что сходную кинематическую схему имеют и манипуляторы зарубежного производства, предназначенные для использования на фермах, например [6] и [9].

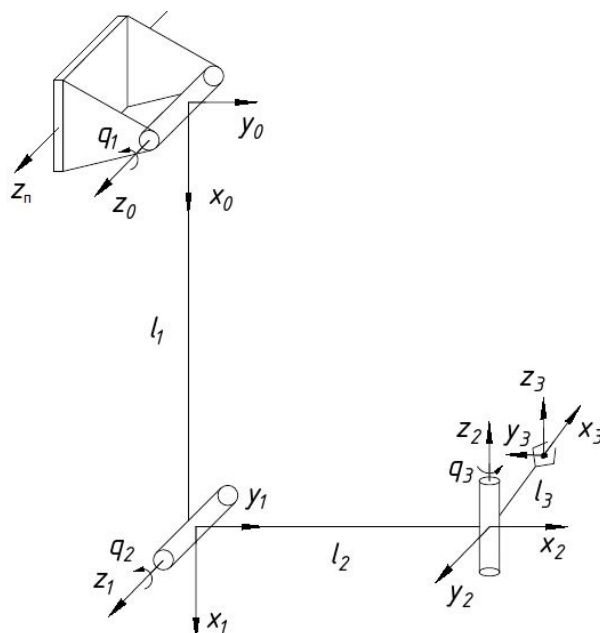


Рисунок 2 – Кинематическая схема манипулятора ДР

Отметим также, что операция надевания стаканов доильного аппарата на соски происходит в одной плоскости $X_0O_0Y_0$. Поэтому при построении управления мы рассматриваем только три вращательных

степени. При решении прямой задачи о положении стакана воспользуемся традиционной методикой выбора параметров Денавита – Хартенберга для данной схемы [1] (см. табл. 1).

Таблица 1. Параметры Денавита – Хартенберга

Звено	Присоединенный угол, θ	Расстояние, d	Линейное смещение, a	Угловое смещение, α
1	q_1	0	l_1	0
2	q_2	0	l_2	$-\pi/2$
3	q_3	0	l_3	0

Как известно, прямая задача о положении позволяет определить положение и ориентацию схвата по заданным значениям обобщенных координат. Выполним решение такой задачи. Матрицы перехода между системами координат 0–3 (рис. 2) имеют следующий вид:

$$T_1^0 = \begin{pmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & l_1 c_1 \\ s_1 & c_1 & 0 & l_1 s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad T_2^1 = \begin{pmatrix} c_2 & 0 & -s_2 & l_2 c_2 \\ s_2 & 0 & c_2 & l_2 s_2 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad T_3^2 = \begin{pmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & l_3 c_3 \\ s_3 & c_3 & 0 & l_3 s_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Здесь использованы такие обозначения: c_i и s_i – $\cos(q_i)$ и $\sin(q_i)$ соответственно, l_i – длина i -го звена, q_i – соответствующая обобщенная координата, $i = (1...3)$.

Перемножив эти три матрицы, определим значения коэффициентов результирующей матрицы перехода T_3^0 из нулевой системы координат $X_0O_0Y_0$ в систему координат схвата $X_3O_3Y_3$:

$$T_3^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 = \begin{pmatrix} c_{12}c_3 & -c_{12}s_3 & -s_{12} & l_2c_{12} + l_1c_1 + l_3c_{12}c_3 \\ s_{12}c_3 & -s_{12}s_3 & c_{12} & l_2s_{12} + l_1s_1 + l_3s_{12}c_3 \\ -s_3 & -c_3 & 0 & -l_3s_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где $c_{ij} = \cos(q_i + q_j)$ и $s_{ij} = \sin(q_i + q_j)$, соответственно.

Данные выражения используем для построения системы обратной связи по положению для схвата манипулятора ДР.

Теперь проведем решение обратной задачи о положении. Это необходимо для определения нужных значений обобщенных координат манипулятора, чтобы достигнуть заданной точки в рабочей зоне. Как уже отмечалось, для надевания стаканов доильного аппарата достаточно использовать три степени подвижности манипулятора ($n = 3$). Поэтому ограничимся управлением по трем линейным координатам схвата (x_3, y_3, z_3). Обозначим перемещения по ним как (p_x, p_y, p_z) .

Тогда получим систему уравнений вида:

$$\begin{cases} l_2c_{12} + l_1c_1 + l_3c_{12}c_3 = p_x \\ l_2s_{12} + l_1s_1 + l_3s_{12}c_3 = p_y \\ -l_3s_3 = p_z \end{cases}$$

Решением данной системы являются следующие зависимости:

$$q_3 = a \sin\left(-\left(\frac{Pz}{l_3}\right)\right), \quad q_2 = a \cos\left(\frac{Px^2 + Py^2 - l_1^2 - a^2}{2l_1a}\right)$$

$$q_1 = \text{atan2}\left(-as_2Px + Py(l_1 + ac_2), \quad as_2Py + Px(l_1 + ac_2)\right),$$

где $a = l_2 + l_3c_3$.

Функция atan2 определяется так:

$$\text{atan2}(a, b) = \begin{cases} \arctg \frac{a}{b}, & b > 0 \\ \arctg \frac{a}{b} + \pi, & b > 0, a < 0 \\ \arctg \frac{a}{b} - \pi, & b < 0, a < 0 \end{cases}$$

Как уже отмечалось, в конструкции манипулятора ДР используются пневмоприводы поступательного перемещения, в которых подвижным элементом является шток. Его перемещение x_i определя-

ется из уравнений вида $x_i = k_i q_i - b_i$, где параметры k_i и b_i зависят от точек закрепления пневмоприводов на звеньях манипулятора.

Совокупность приведенных выше выражений представляет собой решение задачи позиционирования манипулятора ДР, движимого системой пневматических приводов.

Система управления манипулятором. Теперь рассмотрим задачу построения системы управления манипулятором ДР с предложенной кинематической схемой. Повторим, что наличие многочисленных нелинейностей в математической модели пневматических приводов существенно осложняет эту задачу. Как уже отмечалось, одним из подходов может быть использование в системе управления приводами манипулятора ИНС¹. Целью ИНС является реализация такого управления перемещением штоков пневмоцилиндров, при котором достигается вывод схвата манипулятора со стаканом доильного аппарата в заданную точку пространства. Иными словами, обеспечивается необходимая точность регулирования положения каждого пневмоцилиндра.

Эта идея была реализована при создании прототипа манипулятора ДР (рис. 3а). Контур собственно манипулятора, включая пневматические цилиндры, выделен красным цветом (рис. 3б).

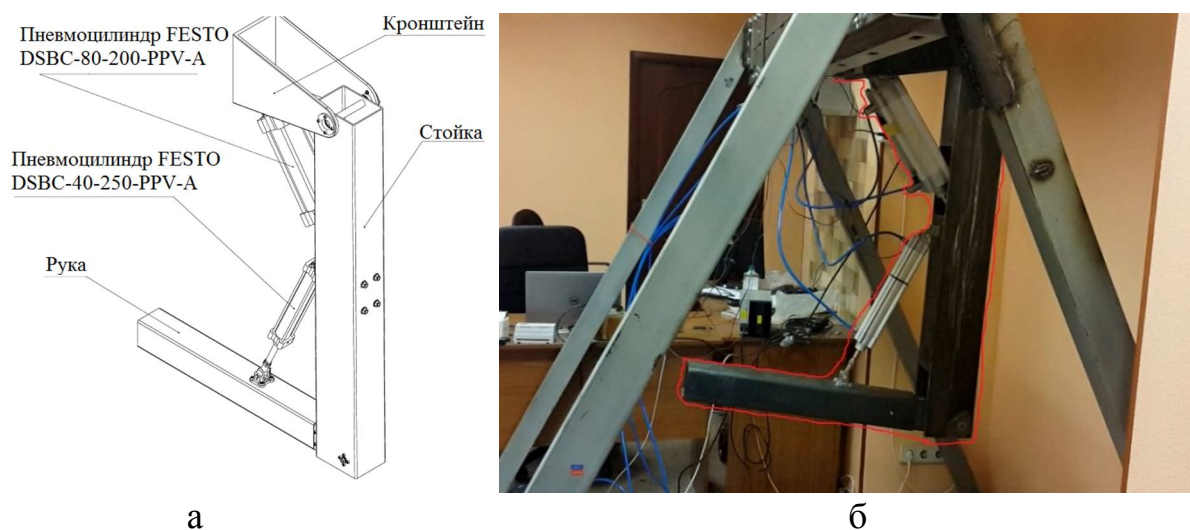


Рисунок 3 – Модель (а) и фотография (б) прототипа манипулятора ДР

Длина руки манипулятора составляла 700 мм, длина стойки – 2000 мм, толщина – 120 мм. В качестве движителей в прототипе использовались пневматические цилиндры FESTO DSBC-80-200-PPV-A (длина штока 200 мм) и FESTO DSBC-40-250-PPV-A с длиной штока 250 мм (далее привод 1 и привод 2 соответственно) с пропорциональными распределителями МРУЕ-5-1/8-LF-010-B. На цилиндрах закреплялись датчики положения серии SICK MPA с разрешением 0,03 % FSR и точностью 0,06 % FSR, где FSR – максимальная измеряемая длина, равная в данном случае длине штока соответствующего цилиндра. В прототипе манипулятора отсутствовал схват с телекамерой. При этом качество процесса управления оценивалось по точности выхода концевой звена прототипа в заданные точки его рабочей области.

Предлагаемая система управления ДР имеет иерархическую структуру и содержит три уровня управления (рис. 4):

1. регулирующий (включает в себя комплекс средств контроля и логического управления ДР);
2. верхний (управляющий);
3. нижний (приводной).

Регулирующий уровень управления выполняет функцию согласования средств управления манипулятором с другим оборудованием фермы и включает в себя «блок контроля технического процесса доения» и «блок логического управления», формирующий текущее задание манипулятору ДР.

Два других уровня образуют систему управления манипулятором ДР.

¹ Данный подход был предложен и реализован нашими коллегами Алексеем Хахуновым и Игорем Рекуном (компания «Р.СЕРПТ») при разработке прототипа манипулятора. Ими было предложено использовать трехслойную рекуррентную нейронную сеть.

Верхний уровень включает в себя блоки выдачи целевых координат, решения обратной задачи о положении, выдачи управляющих команд и распознавания. Блок выдачи целевых координат в соответствии с текущим заданием рассчитывает координаты точки, в которую манипулятор должен вывести схват со стаканом доильного аппарата.

Блок решения обратной задачи о положении вычисляет значения обобщенных координат и передает эти данные в блок выдачи управляющих команд на приводы манипулятора. В процессе наведения манипулятора блок распознавания анализирует данные, полученные от телекамеры, находит в рабочей области изображение сосков коровы и передает данные об их расположении и ориентации в блок выдачи целевых координат.

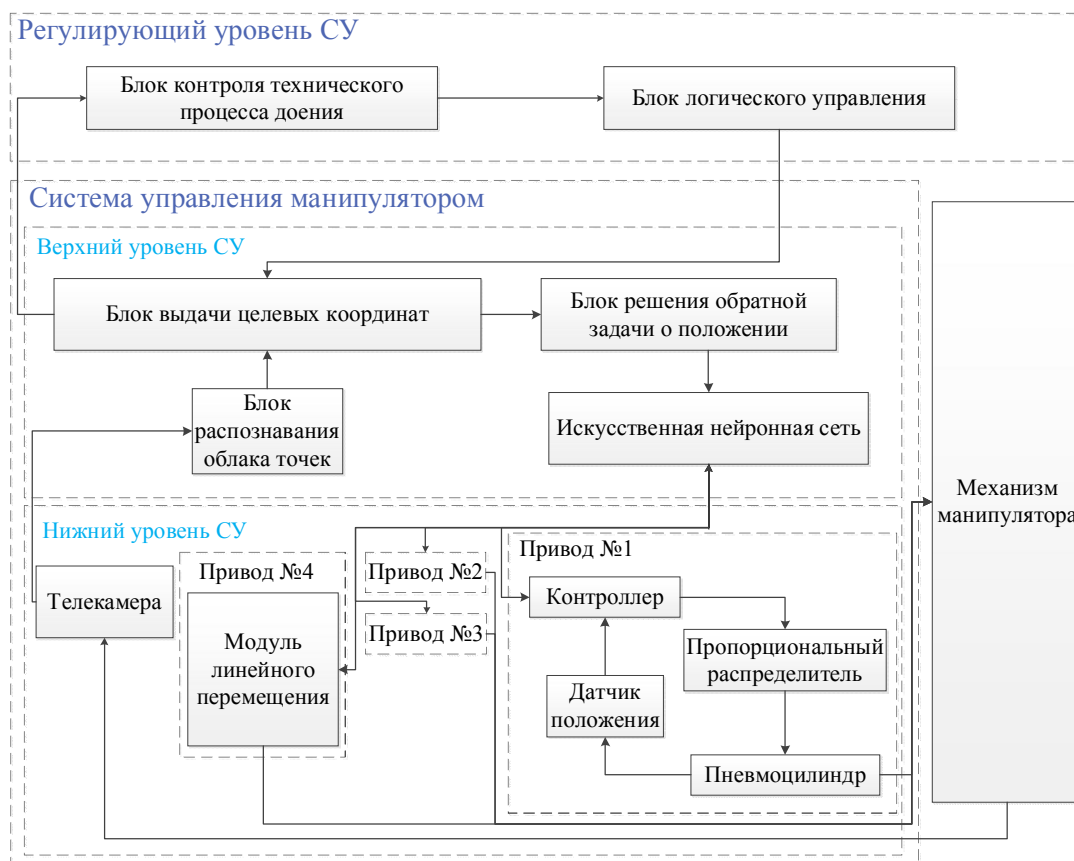


Рисунок 4 – Структура системы управления ДР

Нижний уровень управления манипулятором включает в себя приводы и телекамеру, установленную на схвате. Каждый привод содержит пневматический распределитель и цилиндр с датчиком положения штока, а регулятор выполнен на основе ИНС. Эта сеть обучается формировать управляющие напряжения на пневматические распределители на основе данных о целевых координатах, полученных с верхнего уровня управления. Данные от датчиков положения используются в ИНС для расчета значения ошибки.

ИНС обучалась непосредственно на прототипе манипулятора методом обучения с подкреплением с помощью алгоритма актёра-критика (*Natural Actor-Critic*) [13]. Схема трехслойной рекуррентной ИНС приведена на рисунке 5. При ее обучении использовался компьютер с видеокартой NVIDIA GeForce GTX 960M. Управляющий сигнал передавался по COM-порту на программируемый контроллер на основе платы STM32F407VG¹, связанный с приводами манипулятора.

Процесс обучения ИНС занял 93 часа, в течение которых она выдавала всё более точные значения управляющего напряжения на пневмоприводы манипулятора. Манипулятор при этом совершал тестовые движения значительной амплитуды и скорости, значение которой уменьшалось по мере обучения ИНС. Обучение продолжалось до тех пор, пока ошибка вывода штоков каждого пневмоцилиндра в заданное положение достигла значения в 1 %. Таким образом, большая длительность обучения определялась динамическими характеристиками манипулятора, а не неэффективностью вычислительного алгоритма.

¹ Контроллер разработан Георгием Евдокимовым из компании «Р.СЕПТ».

Эффективность системы управления прототипом манипулятора ДР с обученной ИНС оценивалась по качеству переходных процессов в приводах (рис. 6). Переходные процессы построены на основе данных с датчика положения штока и нормированы по длине.

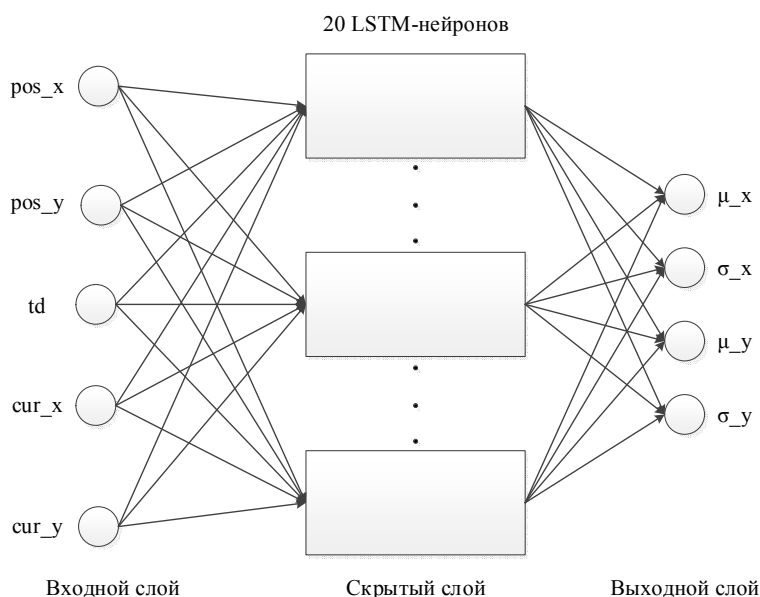


Рисунок 5 – Схема ИНС, использованная в прототипе манипулятора ДР. Обозначения: pos_x – заданное положение штока привода 1, pos_y – заданное положение штока привода 2, cur_x и cur_y – текущие положения штоков привода 1 и 2 соответственно, td – временная разность, μ_x, σ_x, μ_y, σ_y – среднее и стандартное отклонение управляющего напряжения

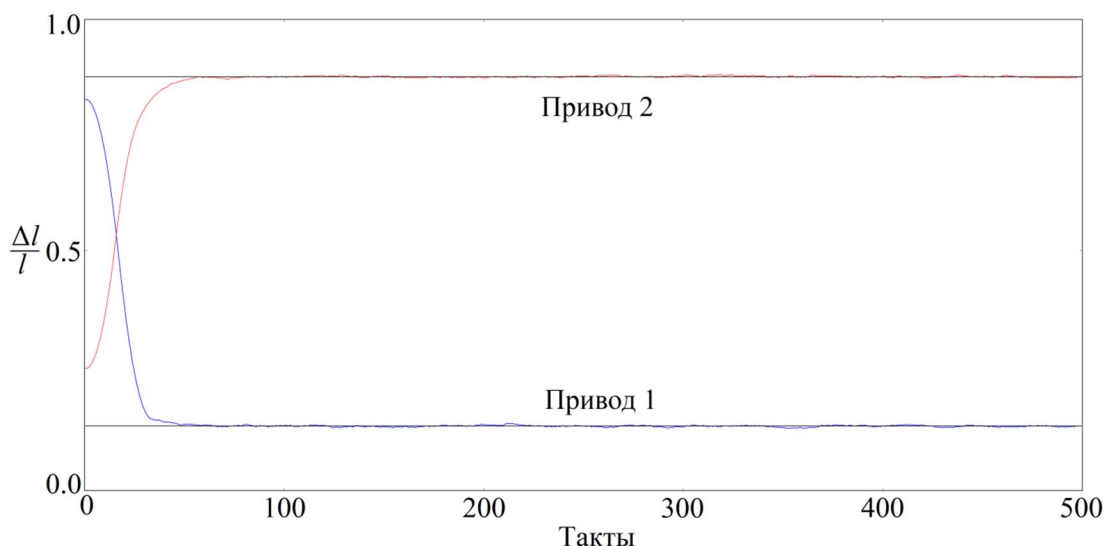


Рисунок 6 – График переходного процесса в приводах. Обозначения: $\Delta l/l$ – относительное перемещение штока пневматического цилиндра, где l – общая длина штока, Такты – такты обмена данными между компьютером, на котором работает ИНС и контроллером, частота обмена 100 Гц

Как следует из графика на рисунке 6, ИНС обеспечивает аperiodический переходный процесс в обоих приводах без перерегулирования, то есть удовлетворяет классическому критерию качества.

В то же время по итогам испытаний прототипа был выявлен ряд недостатков рассмотренной нейросетевой системы управления манипулятором ДР. Отметим, в частности, следующие:

- для обеспечения требуемой точности обработки манипулятором заданных положений требуется слишком долгое обучение ИНС;
- во время обучения ИНС манипулятор испытывал значительные циклические нагрузки на больших скоростях, при том, что в реальной эксплуатации на ферме он таких нагрузок не испытывает.

Отметим, что наибольшие нагрузки на манипулятор действуют на первом этапе обучения, когда точность достижения заданного положения еще низка, и манипулятор вынужденно совершает в области этого положения колебательные движения с большой скоростью. Возникающие при этом знакопеременные ускорения снижают ресурс ДР. Поэтому предлагается проводить первый этап обучения не непосредственно на манипуляторе, а на его математической модели, включающей нелинейные модели пневмоприводов (этап 1 на рисунке 7).

Второй этап обучения (дообучение) ИНС предлагается проводить, когда уровень динамических нагрузок на манипулятор снизится. При этом может быть использован как прототип манипулятора, так и его промышленный образец (этап 2 на рисунке 7).

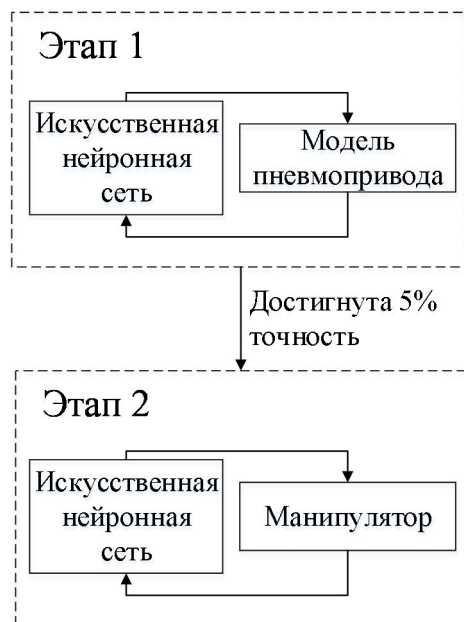


Рисунок 7 – Принцип двухэтапного обучения ИНС

Второй этап обучения продолжается до тех пор, пока ошибка выхода манипулятора в заданную точку достигнет значения в 1 %. Обученную таким образом ИНС можно включать в состав программного обеспечения ДР, использующих манипуляторы со следящими пневматическими приводами.

Математическая модель привода манипулятора. При создании математической модели следящего пневмопривода воспользуемся положениями, изложенными в [14]. Как отмечалось выше, данный привод состоит из пневматического распределителя и пневматического цилиндра с подвижным штоком, а также датчика положения (рис. 8).

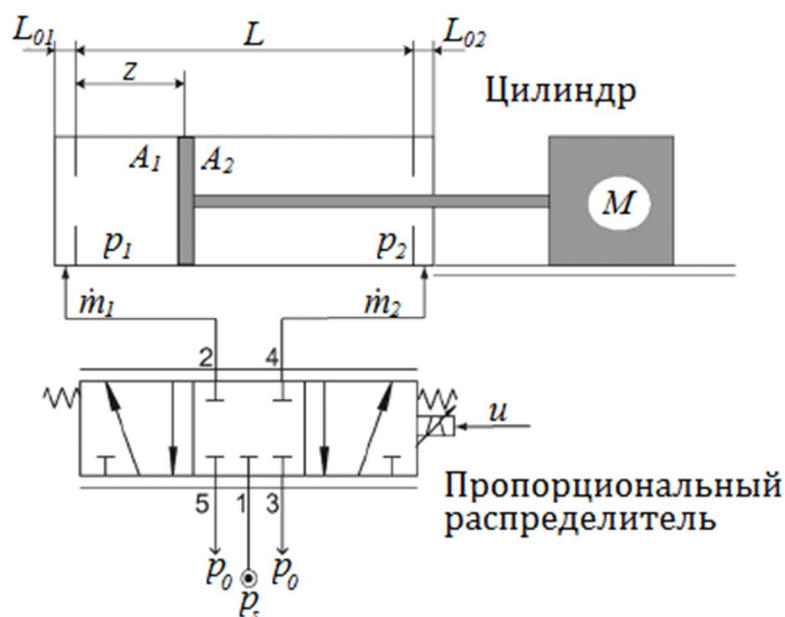


Рисунок 8 – Схема пневматического цилиндра с пропорциональным распределителем

Сила, развиваемая пневмоцилиндром, зависит от перепада давлений в его камерах и трения штока об уплотнительные кольца:

$$M \ddot{z} = A_1 p_1 - A_2 p_2 - \Delta A p_0 - F_F,$$

где z, M – положение и масса нагрузки соответственно, (A_1, A_2) – эффективные площади обеих сторон поршня, ΔA – площадь штока, (p_1, p_2) – давление в камерах цилиндра, p_0 – атмосферное давление, F_F – сила трения.

Примем, что сжатый воздух ведет себя как идеальный газ в политропном процессе. Тогда изменение давления в камерах можно представить соотношениями вида [19]:

$$\dot{p}_1 = \frac{1}{A_1 (L_{01} + z)} (RT \dot{m}_1(u, p_1) - p_1 \dot{z} A_1),$$

$$\dot{p}_2 = \frac{1}{A_2 (L_{02} + L - z)} (RT \dot{m}_2(u, p_2) - p_2 \dot{z} A_2),$$

где p_i – давление в соответствующей камере цилиндра, \dot{p}_i – скорость изменения давления, A_i – площадь поршня, \dot{m}_i – массовый расход в соответствующую камеру цилиндра, z – перемещение штока, \dot{z} – скорость перемещения штока, L – длина штока, L_{0i} – мертвая зона цилиндра, R – универсальная газовая постоянная, T – температура, u – управляющее напряжение.

Массовый расход воздуха описывается сопловой моделью по ISO 6358 [15]:

$$\dot{m}_1 = C_{s1}(u) \rho_0 p_s \Psi\left(\frac{p_1}{p_s}, b\right) - C_{10}(u) \rho_0 p_1 \Psi\left(\frac{p_0}{p_1}, b\right),$$

$$\dot{m}_2 = C_{s2}(u) \rho_0 p_s \Psi\left(\frac{p_2}{p_s}, b\right) - C_{20}(u) \rho_0 p_2 \Psi\left(\frac{p_0}{p_2}, b\right),$$

где C_{ij} – звуковое сопротивление в соответствующем отверстии распределителя, p_0 – атмосферное давление, p_s – давление нагнетания, Ψ – функция потока, ρ_0 – плотность воздуха при нормальных условиях, b – критическое число.

Математическая модель пневмопривода была реализована авторами в среде MATLAB (рис. 9а). Переходный процесс в приводе приведен на рисунке 9б.

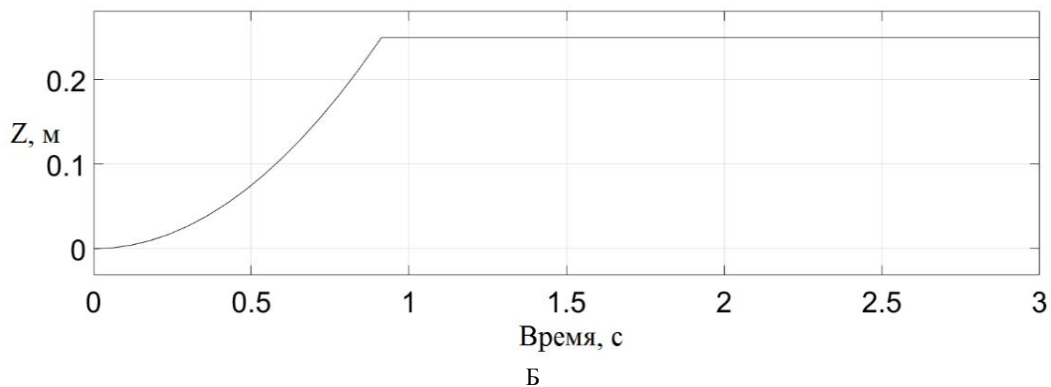
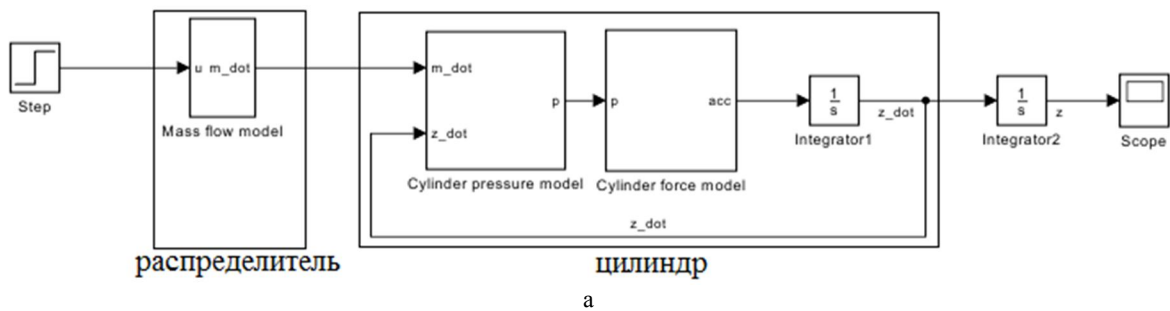


Рисунок 9 – Модель привода (а) и переходный процесс в приводе (б). Обозначение: Z – перемещение штока пневмоцилиндра

Сравним результаты графиков переходных процессов в реальном приводе (рис. 6) и его математической модели (рис. 9б).

1. Из графика на рисунке 6 видно, что шток пневмоцилиндра проходит половину относительно-го перемещения и достигает заданной точки за 50 тактов обмена данными между компьютером и контроллером. При частоте обмена, равной 100 Гц, это соответствует 500 мс.

2. Из рисунка 9 б следует, что на модели пневмопривода шток выдвигается на 250 мм за 0,9 с.

При сравнении графиков на рисунке 6 и 9б, отметим следующее:

- переходные процессы в реальном приводе и в его модели одинаково монотонны;
- быстродействие их также одинаково.

Таким образом, математическое моделирование и натурный эксперимент показали работоспособность разработанной системы управления ДР и обоснованность использования предложенного двухэтапного принципа обучения ИНС.

Заключение. В статье предложена кинематическая схема манипулятора ДР с пневматическими приводами; разработана его двухуровневая система управления, где на верхнем уровне осуществляется решение обратной задачи о положении, а на нижнем – рассчитываются управляющие сигналы для приводов. Пневматический привод является нелинейным объектом управления и для него создана соответствующая математическая модель. Показано, что в качестве регулятора такого привода целесообразно использовать трехслойную рекуррентную ИНС. Для нее предложен двухэтапный подход к обучению: на первом этапе используется математическая модель пневматического привода; на втором – реальный манипулятор или его макет.

Разработана процедура обучения ИНС, целью которой является достижение 5 % ошибки вывода стакана доильного аппарата в заданную точку на первом этапе и уменьшение этого значения до 1 % на втором.

Данный подход является достаточно общим и позволяет включать обученную таким образом ИНС в состав программного обеспечения других ДР, использующих манипуляторы со следящими пневматическими приводами.

В дальнейшем предполагается расширить использование ИНС так, чтобы она решала не только задачу регулирования приводов манипулятора, но и обратную кинематическую задачу. Это позволит с помощью ИНС осуществить полное управление манипулятором ДР.

Список литературы

1. Зенкевич С. Л. Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами : учеб. / С. Л. Зенкевич, А. С. Ющенко. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 400 с.
2. Змеу К. В. Прогнозирующее инверсное нейроуправление позиционно-следящим пневмоприводом / К. В. Змеу, Н. А. Марков, Б. С. Ноткин // Интеллектуальные системы. – 2011. – Т. 29, № 3. – С. 104–117.
3. Кирсанов В. В. Концепция создания доильного робота, совместимого с отечественным доильным оборудованием / В. В. Кирсанов, Ю. А. Цой, Л. П. Кормановский // Вестник ВНИИМЖ. – 2016. – № 3 (23). – С.13–20.
4. Коротков В. И. Управление мобильным манипуляционным роботом в задаче адаптивной обработки зеленых насаждений / В. И. Коротков, С. А. Воронников, Н. А. Выборнов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2016. – № 2 (34). – С. 48–58 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2\(34\)/48-58.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2(34)/48-58.pdf)).
5. Королев В. А. Робот для промышленных теплиц / В. А. Королев, С. А. Воронников, В. А. Польский, Ш. Ш. Гемуев, Е. Л. Ищук // Инновации в сельском хозяйстве. – 2016. – № 6 (21). – С. 73–80.
6. Пат. РФ 2473211. Приспособление для автоматической дойки молочного скота / Ванн Ден Берг К. Оpubл. 27.01.13, Бюл. № 3.
7. Пат. 2555910 Российская Федерация. Доильный аппарат и доильная установка, имеющая данный доильный аппарат и способ размещения доильного аппарата / Кроне О. и др. – Оpubл. 10.07.15, Бюл. № 19.
8. Попов Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления : учеб. пос. / Е. П. Попов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Наука, 1989. – 301 с.
9. Практический опыт внедрения и эксплуатации системы добровольного доения VMS. – Режим доступа: http://www.delaval.ru/Global/Russia/89697101VMSbestPractiseFINAL_rus.pdf, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 10.03.2016).
10. Скворцов Е. А. Применение доильной робототехники в регионе / Е. А. Скворцов, Е. Г. Скворцова, В. И. Набоков, П. С. Кривоногов // Экономика региона. – 2017. – Т. 13, вып. 1. – С. 249–260.
11. Скворцов Е. А. Необходимость инновационного развития сельского хозяйства на основе применения робототехники / Е. А. Скворцов, Е. Г. Скворцова, А. А. Орешкин // Вестник ВНИИМЖ. – 2016. – № 1 (21).
12. Текучев И. К. Методология разработки наукоемких технологий производства молока / И. К. Текучев, Л. П. Кормановский // Вестник ВНИИМЖ. – 2017. – № 1 (25).
13. Asynchronous Methods for Deep Reinforcement Learning. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1602.01783>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 16.05.2016).
14. Hildebrandt A. Optimal System Design of SISO-Servo-pneumatic Positioning Drives / A. Hildebrandt, R. Neumann, O. Sawodny // IEEE Transactions on Control System Technology. – 2010. – Vol. 18 (1). – P. 35–44.
15. Kawashimav K. Determination of flow rate characteristics of pneumatic solenoid valves using an isothermal chamber / K. Kawashimav, Y. Ishii, T. Funaki, T. Kagawa // Journal of Fluids Engineering. – 2004. – Vol. 126. – P. 273–279.

16. Mattiazzo G. Control of a six-axis pneumatic robot / G. Mattiazzo, S. Mauro, T. Raparelli, M. Velardocchia // *J. Robotic Syst.* – 2002. – Vol. 19, no. 8. – P. 363–378.
17. Nouri B. M. Y. Modelling a pneumatic servo positioning system with friction / B. M. Y. Nouri, F. Al-Bender, J. Swevers, P. Vanherck, H. van Brussel // *Proc. Amer. Contr. Conf.* – 2000. – Vol. 2. – P. 1067–1071.
18. Paul A. K. Reduced order sliding mode control for pneumatic actuator / A. K. Paul, J. K. Mishra, M. G. Radke // *IEEE Transactions on Control System Technology.* – 1994. – Vol. 2, no. 3. – P. 271–276.
19. Richer E. A high performance pneumatic force actuator system: Part I – Nonlinear mathematical model / E. Richer, Y. Hurmuzlu // *Trans. ASME.* – 2000. – Vol. 122. – P. 416–425.
20. SAC RDS FUTURELINE ELITE (All-In-One solution for optimizing profits and lowering costs). – Режим доступа: http://issuu.com/sacmilking/docs/sac_rds_futureline_elite_gb_2016_we?e=26620590/40593774, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 10.03.2016).

References

1. Zenkevich S. L., Yushchenko A. S. *Upravlenie robotami* [Robotics control], Moscow, MSTU Bauman Publ., 2000. 400p.
2. Zmey K. V., Markov N. A., Notkin B. S. Prognoziryushee inversnoe neyroupravlenie positionno-sledyashchim pnevmoprivodom [Predictive inverse neural control by position-tracking pneumatic actuator], *Intelektualnye sistemy* [Intelligent Systems], 2011, vol. 29, no. 3, pp. 104–117.
3. Kirsanov V. V., Tsoy Yu. A., Kormanovskiy L. P. Kontseptsiya sozdaniya doilnogo robota, sovместимого s otechestvennym doilnym oborudovaniem [The concept of creating a milking robot compatible with domestic milking equipment]. *Vestnik VNIIMZH* [Bulletin of the All-Russian Research and Design Institute of Livestock Mechanization], 2016, issue 3 (23), pp. 13–20.
4. Korotkovs V. I., Vorotnikov S. A., Vybornov N. A. Upravlenie mobilnym manipulyatsionnym robotom v zadache adaptivnoy obrabotki zelenykh nasazhdeniy [Adaptive processing of green planting with a mobile manipulator robot]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2016, no. 2 (34), pp. 48–58 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2\(34\)/48-58.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2(34)/48-58.pdf)).
5. Korolev V. A., Vorotnikov S. A., Pol'skiy V. A., Gemuev Sh. Sh., Ishuk Ye. L. Robot dlya promyshlennykh teplits [Robot for industrial greenhouses]. *Innovatsii v selskom khozyaystve* [Innovations in Agriculture], 2016, no. 6 (21), pp. 73–80.
6. Van Den Berg K. Patent RF, no 2473211. Device for automatic milking of dairy cattle. 27.01.13, bulletin no. 3.
7. Krone O., et al. Patent RF, no 2555910. The milking machine and the milking machine, which has this milking machine and the method of placing the milking machine. 10.07.15, bulletin no. 19.
8. Popov Ye. P. *Teoria lineynykh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya i upravleniya* [Theory of linear systems of automatic regulation and control]. 2nd ed. Moscow, Nauka Publ., 1989. 301 p.
9. *Prakticheskiy opyt vnedreniya i ekspluatatsii sistemy dobrovol'nogo doeniya VMS* [Practical experience of implementation and operation of the voluntary milking system VMS]. Available at: http://www.delaval.ru/Global/Russia/89697101VMSbestPractiseFINAL_rus.pdf (accessed: 10.03.2016).
10. Skvortsov Ye. A., Skvortsova Ye. G., Nabokov V. I., Krivonogov P. S. Primeneniye doilnoy robototekhniki v regione [The use of milking robotics in the region]. *Ekonomika regiona* [Economy of the Region], 2017. vol. 13, no. 1, pp. 249–260.
11. Skvortsov Ye. A., Skvortsova Ye. G., Oreshkin A. A. *Neobkhodimost innovatsionnogo razvitiya selskogo khozyaystva na osnove primeneniya robototekhniki* [The need for innovative development of agriculture based on the use of robotics]. *Vestnik VNIIMZH* [Bulletin of the All-Russian Research and Design Institute of Livestock Mechanization], 2016, issue 1 (21).
12. Tekuchev I. K., Kormanovskiy L. P. Metodologiya razrabotki naukoemkikh tekhnologiy proizvodstva moloka [Methodology for development of high technology milk production technologies]. *Vestnik VNIIMZH* [Bulletin of the All-Russian Research and Design Institute of Livestock Mechanization], 2017, issue 1 (25).
13. Asynchronous Methods for Deep Reinforcement Learning. Available at: <https://arxiv.org/abs/1602.01783> (accessed: 16.05.2016).
14. Hildebrandt A., Neumann R., Sawodny O. Optimal System Design of SISO-Servopneumatic Positioning Drives. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2010, vol. 18 (1), pp. 35–44.
15. Kawashimav K., Ishii Y., Funaki T., Kagawa T. Determination of flow rate characteristics of pneumatic solenoid valves using an isothermal chamber. *Journal of Fluids Engineering*, 2004, vol. 126, pp. 273–279.
16. Mattiazzo G., Mauro S., Raparelli T., Velardocchia M. Control of a six-axis pneumatic robot. *J. Robotic Syst.*, 2002, vol. 19, no. 8, pp. 363–378.
17. Nouri B. M. Y., Al-Bender F., Swevers J., Vanherck P., van Brussel H. Modelling a pneumatic servo positioning system with friction. *Proc. Amer. Contr. Conf.*, 2000, vol. 2, pp. 1067–1071.
18. Paul A. K., Mishra J. K., Radke M. G. Reduced order sliding mode control for pneumatic actuator. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 1994, vol. 2, no. 3, pp. 271–276.
19. Richer E., Hurmuzlu Y. A high performance pneumatic force actuator system: Part I – Nonlinear mathematical model. *Trans. ASME*, 2000, vol. 122, pp. 416–425.
20. SAC RDS FUTURELINE ELITE (All-In-One solution for optimizing profits and lowering costs). Available at: http://issuu.com/sacmilking/docs/sac_rds_futureline_elite_gb_2016_we?e=26620590/40593774 (accessed: 10.03.2016).