



Имитационное моделирование роботизированного устройства для обслуживания кормового стола на животноводческих комплексах КРС

© 2022. Е. А. Никитин ✉

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Российская Федерация

Настоящее исследование проведено в 2020-2021 гг. В ходе выполнения работы проанализирована российская и зарубежная литература, посвященная технологическим особенностям кормления крупного рогатого скота, исследован опыт производства технических средств для кормления КРС молочного и мясного животноводства компаниями АО «Слободской МСЗ», Wasserbauer, Delaval, Afimilk, GEA Farm, Lely и др. Исследование направлено на имитационное моделирование роботизированного устройства для обслуживания кормового стола на животноводческих комплексах с использованием инструментов Simulink в среде Matlab, чтобы облегчить модернизацию устройства или оптимизировать стоимость элементов системы и снизить производственные затраты. На этапе проектирования робота произведен кинематический анализ движения с построением математических зависимостей и отображением расчетной схемы. Для описания динамических характеристик устройства использовали уравнение Аппеля, представленное в матричной форме, теоретически была задана траектория перемещения робота и отслежено отклонение его центра масс от реперных точек. Максимальный уровень отклонения составил 0,03 м. На основе имитационной модели был разработан экспериментальный образец с управляемым дозатором кормовых добавок, который может значительно облегчить процесс кормления и оптимизировать дозирование концентрированных добавок. В настоящее время экспериментальный образец готовится к испытанию на молочной ферме.

Ключевые слова: цифровое животноводство, системы автоматизированного кормления, оборудование для кормления КРС, роботизация животноводства

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (тема № 0581-2021-0009).

Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Никитин Е. А. Имитационное моделирование роботизированного устройства для обслуживания кормового стола на животноводческих комплексах КРС. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2022;23(1):117-125. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.1.117-125>

Поступила: 29.04.2021

Принята к публикации: 17.01.2022

Опубликована онлайн: 25.02.2022

Simulation of a robotic device for maintenance of the feed table at cattle breeding complexes

© 2022. Evgeniy A. Nikitin ✉

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

This study was conducted in 2020-2021. During the research, the Russian and foreign literature devoted to the technological features of cattle feeding was analyzed, the experience of the production of technical facilities for feeding dairy and meat cattle by the companies of JSC "SMZ-Slobodskoy", Wasserbauer, Delaval, Afimilk, GEA Farm, Lely, etc. was studied. This research is aimed at simulation modeling of a robotic device for feed table maintenance at livestock complexes, using Simulink tools in the Matlab environment, in order to facilitate the modernization of the device or optimize the cost of system elements and reduce production costs. At the stage of designing the robot, a kinematic analysis of motion was performed with the construction of mathematical dependencies and displaying of the calculation scheme. To describe the dynamic characteristics of the device, the Appel equation was used, presented in matrix form, the trajectory of the robot's movement was theoretically set, and the deviation of its center of mass from the reference points was tracked. The maximum deviation level was 0.03 m. Based on the simulation model, an experimental sample with a controlled feed additive dispenser was developed, which can significantly facilitate the feeding process and optimize the dosing of concentrated additives. Currently, the experimental sample is being prepared for testing on a dairy farm.

Keywords: digital animal husbandry, automated feeding systems, cattle feeding equipment, robotization of animal husbandry

Acknowledgments: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (theme No. 0581-2021-0009).

The author thanks the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the author stated no conflict of interest.

For citations: Nikitin E. A. Simulation of a robotic device for maintenance of the feed table at cattle breeding complexes. *Agrarnaya nauka Euro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2022;23(1):117-125. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.1.117-125>

Received: 29.04.2021

Accepted for publication: 17.01.2022

Published online: 25.02.2022

Рацион крупного рогатого скота (КРС) принято подразделять на объемистые компоненты (силос, сенаж, свежескошенная трава или сено) и концентрированные (зерновой размол, жмыхи и шроты масличных культур), также в виде смешанного комбикорма и минеральных добавок, содержащих рекомендуемую массовую долю от 0,5 до 2,0 % (Ca, K, Na, Mg, P, S и пр.), которые могут подаваться в виде сбалансированного премикса или входить в состав комбикорма.

В настоящее время рентабельность производства молока во многом определяется продуктивностью и продуктивным долголетием животного, что в 50 % случаев достигается за счет составления сбалансированного рациона и качественного приготовления кормовых смесей [1, 2, 3, 4].

Аналитической компанией ЭР-ТЕЛЕКОМ, которая проводит исследования различных секторов экономики предприятий по всему миру, в том числе в сфере АПК, было выявлено, что в структуре рациона КРС массовая доля комбикормов в среднем составляет около 18 %, в свою очередь в стоимостном выражении их доля достигает 63 %¹.

На сегодняшний день на всех современных животноводческих комплексах по содержанию КРС используются различные автоматизированные системы составления рационов: Коралл-АГРО, Белкофф, АМТС, РАЦИОН, НУВРИМІN Futter и другие, что позволяет составить рацион, максимально удовлетворяющий потребности животного для достижения определенного уровня продуктивности по молоку или мясу [5, 6, 7, 8, 9].

В ранее проведенных исследованиях [10, 11] на основе протоколов автоматической системы весового дозирования «Daily TMR Manager», устанавливаемой на миксер-кормораздатчик, было выявлено, что оператором

совершается большая погрешность дозирования, приводящая к несоответствию составленного и приготовленного рационов, а также зачастую к удорожанию кормовой смеси.

Цель исследования – разработка имитационной модели роботизированного устройства для обслуживания кормового стола на животноводческих комплексах с оценкой взаимодействия систем позиционирования и электропривода.

Научная новизна:

– расширенные функциональные возможности роботизированного устройства для обслуживания кормового стола на животноводческом комплексе;

– математическая модель и алгоритм управления роботизированным устройством для обслуживания кормового стола на животноводческом комплексе.

Материал и методы. Для определения актуальности исследования изучался зарубежный и отечественный опыт проектирования технологических решений и технических средств для кормления КРС молочного и мясного животноводства: АО «Слободской МСЗ»², Wasserbauer³, Delaval⁴, GEA Farm⁵, Lely⁶ и другие.

Исследования проводили на базе ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» в период с 2020 по 2021 год.

Разработка экспериментального образца роботизированного устройства для обслуживания кормового стола включала теоретический этап работ (подготовительный). С помощью инструментов искусственной среды Matlab/Simulink разработана имитационная модель экспериментального образца, что позволило смоделировать взаимодействие кинематических пар электропривода с системой автоматического позиционирования и оценить эффективность этого взаимодействия.

¹Презентация ЭР-Телеком «Цифровые решения в АПК». [Электронный ресурс]. URL: <https://ertelecom.ru/> (дата обращения: 28.04.2021).

²Официальный сайт АО «Слободской МСЗ». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.smsz.ru> (дата обращения: 10.05.2020).

³Официальный сайт Wasserbauer. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.wasserbauer.at/en/all-products.html> (дата обращения: 10.05.2020).

⁴Официальный сайт DeLaval. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.delaval.com/ru/our-solutions/feeding/> (дата обращения: 10.05.2020).

⁵Официальный сайт ГЕА Фарм Технолоджиз Рус. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gea.com/ru/products/milking-farming-barn/dairyfeed-feeding-systems/index.jsp?i=dairy-farming> (дата обращения: 10.05.2020).

⁶Официальный сайт Lely [Электронный ресурс]. URL: <https://www.lely.com/ru/solutions/feeding/vector/> (дата обращения: 10.05.2020).

Анализ эффективности взаимодействия автоматической системы позиционирования и исполнительных устройств производили с учетом изученных методов математического моделирования, а также кинематических и динамических процессов движения мобильных роботов [12, 13, 14, 15, 16].

Практическая часть исследования предполагала изготовление оригинальных деталей

экспериментального образца и системы управления, в частности платы для управления драйвером шаговыми электродвигателями.

Результаты и их обсуждение. На рисунке 1 представлена траектория движения экспериментального образца, которая описывает характер перемещения роботизированного устройства по кормовому столу на животноводческом комплексе.

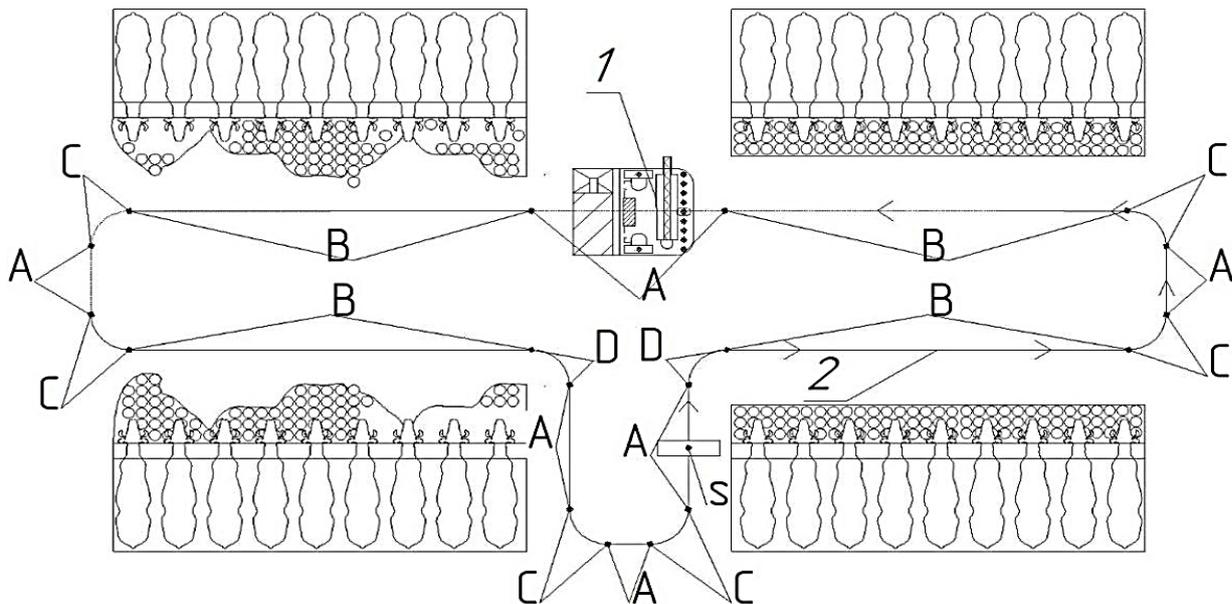


Рис. 1. Принципиальная схема перемещения роботизированного устройства для обслуживания кормового стола: 1 – робот-толкатель, 2 – траектория движения робота /

Fig. 1. Schematic diagram of movement of the robotic device for maintenance the feed table: 1 – pusher robot, 2 – robot movement trajectory

Движение роботизированного устройства начинается с точки S, изображенной на принципиальной схеме движения, этот участок является местом зарядки аккумуляторной батареи робота и местом наполнения бункера-дозатора кормовыми добавками. Участок А – робот движется по прямой, в этот момент привод шнека-толкателя и дозатора отключены, привод правого и левого колес вращается с постоянной скоростью.

Участок D – робот осуществляет поворот направо таким образом, что привод правого колеса зафиксирован, а привод левого колеса осуществляет вращение с постоянной скоростью до момента полного поворота на 90°. При выполнении поворотов привод дозатора и шнека толкателя отключены.

Участок В – робот движется по прямой вдоль кормового стола с незначительными отклонениями в зависимости от степени разброса корма животными. В процессе движения

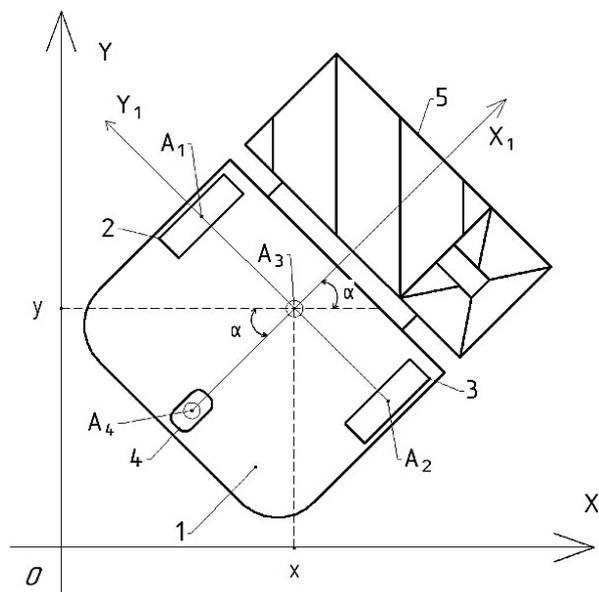
на участке В шнек-толкатель вращается с частотой от 80 до 120 об/мин., а также осуществляется процесс дозирования кормовых добавок из бункера дозатора. Привод ведущих колес вращается с одинаковой частотой вращения.

Участок С – робот осуществляет поворот налево таким образом, что привод левого колеса зафиксирован, а привод правого колеса осуществляет вращение с постоянной скоростью до момента полного поворота на 90°.

На этапе создания имитационной модели роботизированного устройства для обслуживания кормового стола на животноводческих комплексах был проведен анализ взаимодействия кинематических пар при движении разрабатываемого экспериментального образца.

Кинематическая схема (рис. 2) состоит из мобильной платформы 1 с двумя ведущими 2, 3 и одним опорным 4 колесами. Ведущие колеса располагаются на одной оси, и центр

каждого колеса обозначается буквой A_1 и A_2 соответственно, при этом $|A_1A_3| = |A_1A_2| = L$. Устройство перемещается по поверхности, которая находится в плоскости Oxy . Центр тяжести мобильного робота предположительно заключен в точке A_3 , через которую проходит система координат $A_3x_1y_1$. На корпусе робота



закреплен шнек 5, предназначенный для подталкивания разбросанного корма к ограждению кормового стола. Ось A_3x_1 жестко связана с роботом и является вертикалью подвижного основания. Угол поворота вертикали основания относительно оси Ox обозначается α , а угловая скорость платформы $\dot{\alpha}$ [17, 18].

Рис. 2. Кинематическая схема движения роботизированного устройства для обслуживания кормового стола на животноводческих комплексах / Fig. 2. Kinematic motion diagram of a robotic device for feed table maintenance at livestock complexes

Скорости перемещения точки вдоль координаты Ox и Oy равны $\dot{x} = dx/dt$ и $\dot{y} = dy/dt$. Справедливо равенство $\dot{x} \cdot \sin(\alpha) = \dot{y} \cdot \cos(\alpha)$. Скорость v точки A_3 равна

$$v = \dot{x} \cdot \cos(\alpha) + \dot{y} \cdot \sin(\alpha).$$

Углы поворота ведущих колес (с центрами в точках A_1 и A_2) относительно горизонтальных плоскостей равны β_1 и β_2 , тогда угловая скорость будет равна $\dot{\beta}_1$ и $\dot{\beta}_2$. Скорость перемещения точки A_3 равна

$$v = -L \cdot \dot{\alpha} + R \cdot \dot{\beta}_1 = L \cdot \dot{\alpha} + R \cdot \dot{\beta}_2,$$

где R – радиус ведущих колес.

Система уравнений движения роботизированной установки примет вид:

$$\begin{cases} \dot{x} \cdot \sin(\alpha) = \dot{y} \cdot \cos(\alpha), \\ \dot{x} \cdot \cos(\alpha) + \dot{y} \cdot \sin(\alpha) = -L \cdot \dot{\alpha} + R \cdot \dot{\beta}_1, \\ \dot{x} \cdot \sin(\alpha) = \dot{y} \cdot \cos(\alpha) = L \cdot \dot{\alpha} + R \cdot \dot{\beta}_2. \end{cases} \quad (1)$$

Для описания динамических характеристик устройства использовалось уравнение Аппеля, представленное в матричной форме [13, 14]

$$\left(\frac{\partial S}{\partial \pi} \right)^T = \Pi, \quad (2)$$

где $\Pi = (\Pi_v, \Pi_{\dot{\alpha}})$ – вектор псевдообобщенных сил.

Далее были выведены компоненты вектора псевдообобщенных сил, которые определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \Pi_v &= \frac{1}{R} \cdot (M_{дв1} + M_{дв2}); \\ \Pi_{\dot{\alpha}} &= \frac{1}{R} \cdot (M_{дв1} - M_{дв2}), \end{aligned} \quad (3)$$

где $M_{дв1}$, $M_{дв2}$ – моменты, развиваемые шаговыми электроприводами колес.

На основе проведенных предварительных расчетов в Matlab/Simulink была разработана имитационная модель (рис. 3) роботизированного устройства, включающая мобильную платформу с двумя приводными независимыми колесами, расположенными на одной оси с опорным колесом.

Данная имитационная модель содержит источники сигнала $\dot{\beta}_1$, $\dot{\beta}_2$, которые проходят через преобразователь (драйвер шагового электродвигателя) для каждого приводного колеса отдельно, которые имеют выходы А+, А-, В+, В-, передающие импульсы на шаговые электродвигатели приводных колес для изменения конкретных параметров (угловая скорость вала, угол поворота вала). Выходные каналы \dot{x} и \dot{y} характеризуют изменение траектории перемещения имитационной модели в пространстве относительно сигналов $\dot{\beta}_1$, $\dot{\beta}_2$.

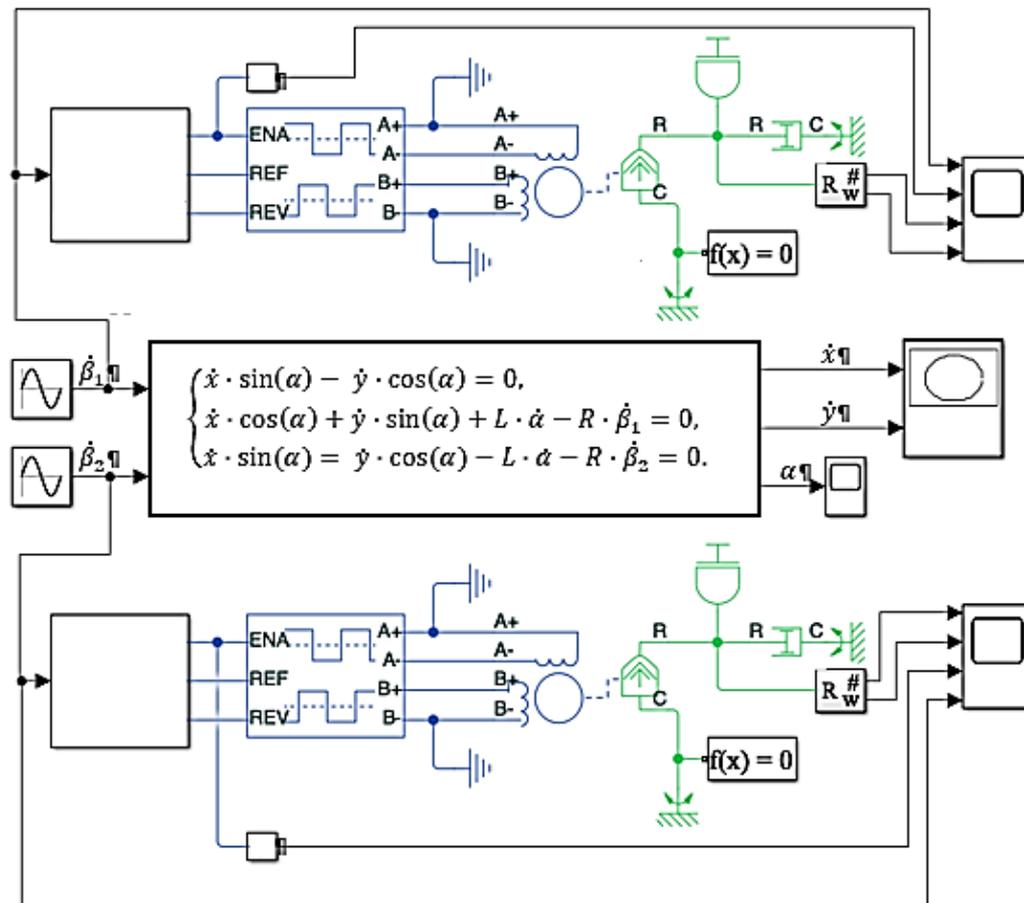


Рис. 3. Имитационная модель мобильной платформы с приводными колесами / Fig. 3. Simulation model of a mobile platform with driven wheels

На рисунке 4 представлен процесс обработки траектории движения имитационной модели роботизированного устройства. Во время инициализации процесса движения роботизированное устройство в начале произвело разворот, так как было ориентировано в противоположенную сторону, что подтверждает способность аппаратно-программного комплекса осуществлять автономное определение позиции в пространстве.

Траектории перемещения приводных колес отображены линиями розового и зеленого цветов. Алгоритм управления имитационной моделью смоделирован таким образом, что система стремилась позиционироваться центром масс роботизированного устройства на черной линии, изображенной на рисунке 4, которая соответствует предполагаемой траектории перемещения роботизированного устройства по кормовому столу на животноводческом комплексе (линия 2, рис. 1).

На рисунке 5 представлены траектории перемещения координат x и y центра тяжести

имитационной модели экспериментального образца. Пунктирными линиями представлены заданные траектории, сплошными – результаты моделирования работы разработанного интеллектуального алгоритма. Максимальная ошибка рассогласования между заданным значением и реальной траекторией перемещения при моделировании процесса движения с автоматическим позиционированием составила $\sigma \approx 0,03$ м, что подтверждает достаточную точность автоматической системы позиционирования и позволит перемещаться разрабатываемому роботизированному устройству по кормовому столу животноводческого комплекса автономно, согласно необходимой траектории.

Дальнейшие работы были направлены на изготовление роботизированного устройства для обслуживания кормового стола на животноводческих комплексах на основе элементной базы, подобранной при имитационном моделировании экспериментального образца, согласно функциональной схеме, представленной на рисунке 6.

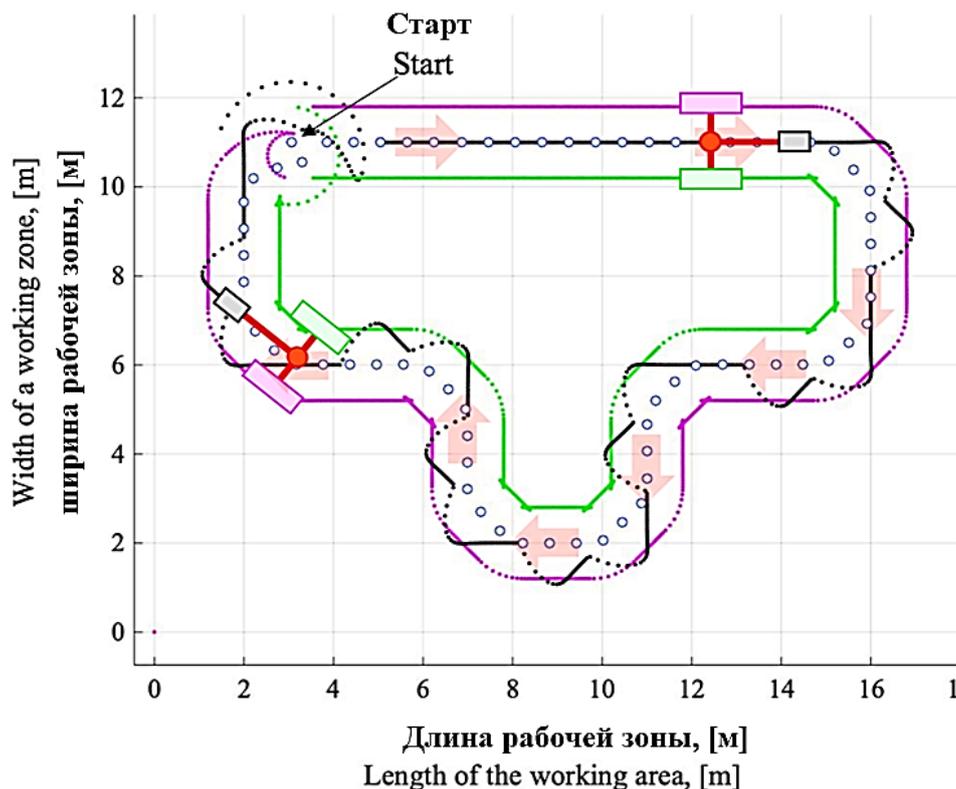


Рис. 4. Процесс автономного перемещения экспериментального образца при имитационном моделировании в среде Matlab / Simulink /

Fig. 4. The process of autonomous movement of an experimental sample during simulation in the environment Matlab / Simulink

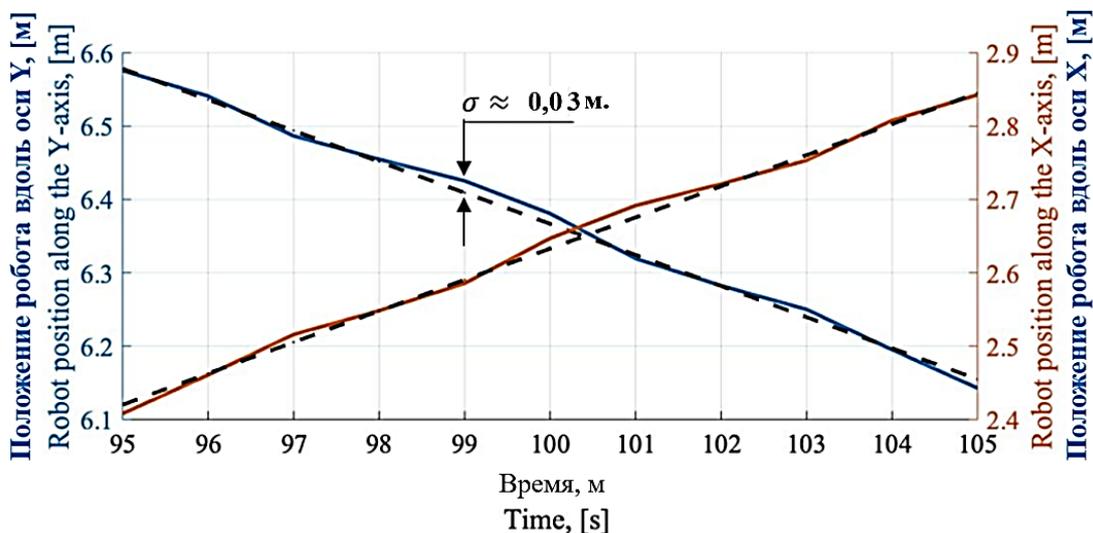


Рис. 5. Отклонение центра масс робота от заданной траектории перемещения /

Fig. 5. Deviation of the robot mass center from the specified trajectory of the robot movement

Согласно функциональной схеме исполнительным механизмом автоматической системы позиционирования может являться трехмерный лидар, который осуществляет картирование пространства и по алгоритмам машинного обучения позволяет выстраивать необходимую траекторию движения. Или наиболее дешевое решение посредством

индуктивных датчиков, которые сканируют контур металлической полосы на поверхности движения роботизированного устройства и подают сигналы на плату управления и драйверы электродвигателей приводных колес, которые устанавливают необходимый режим работы приводных колес для отработки заданной траектории.

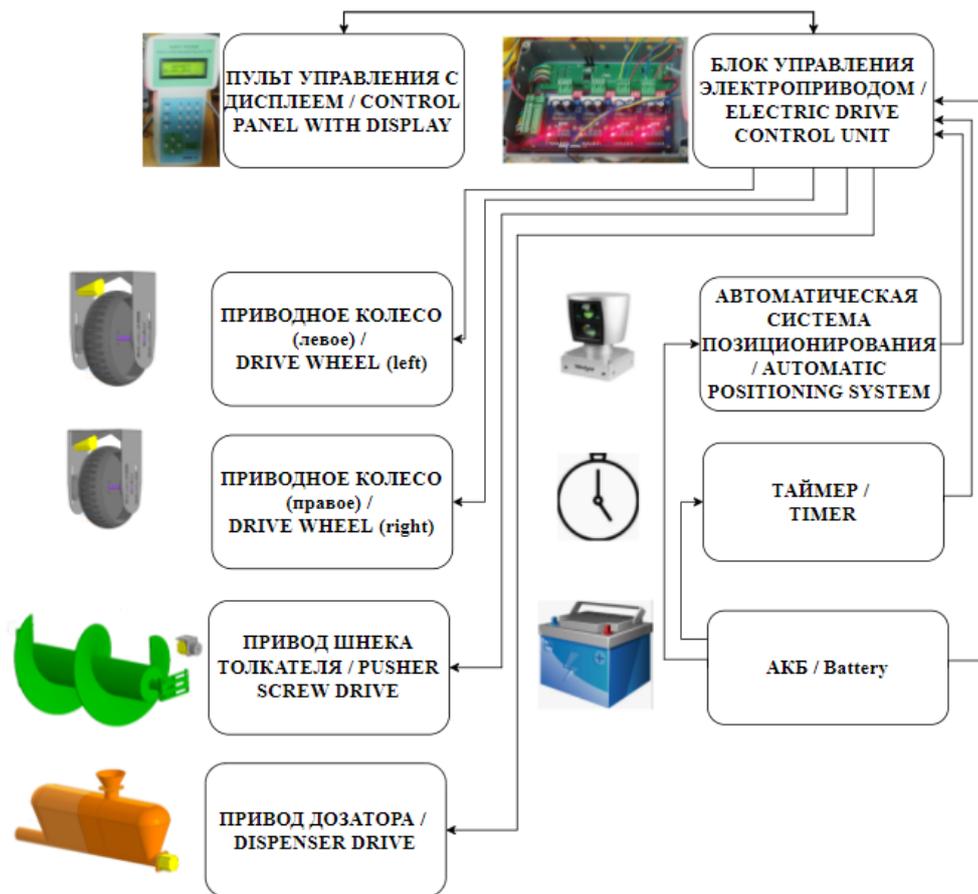


Рис. 6 – Функциональная схема роботизированного устройства для обслуживания кормового стола на животноводческих комплексах /
 Fig. 6 – Functional diagram of a robotic device for maintenance of the feed table at livestock complexes

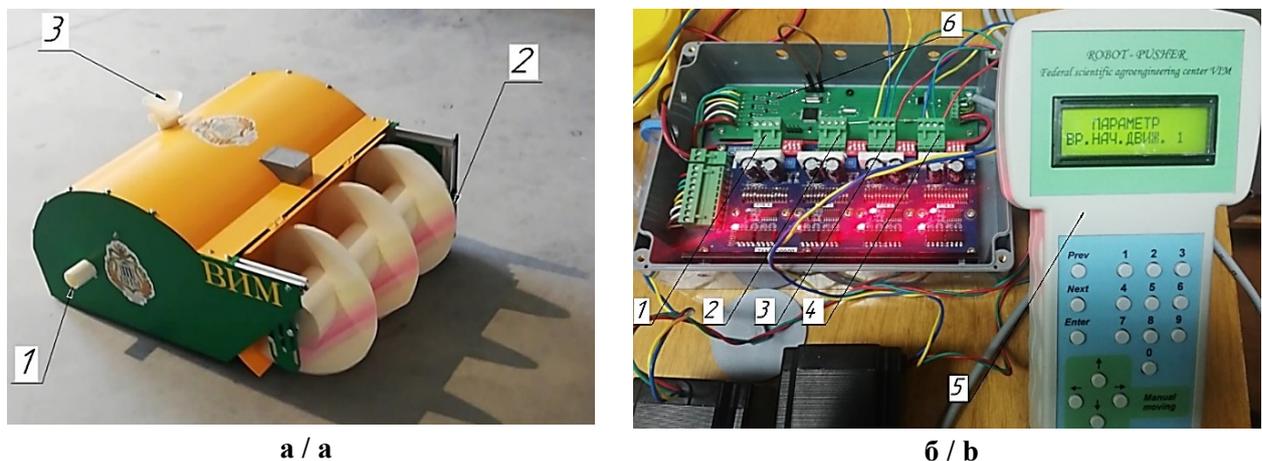


Рис. 7. Роботизированное устройство для обслуживания кормового стола на животноводческих комплексах (а): 1 – выходное отверстие дозатора концентрированных кормов; 2 – шнек, осуществляющий подталкивание кормов к ограждению кормового стола; 3 – засыпная горловина бункера-дозатора с шиберной заслонкой; элементная база системы управления устройством (б): 1, 2 – выходные каналы управления приводами ведущих колес; 3 – выходной канал управления приводом дозатора; 4 – выходной канал управления приводом шнека; 5 – пульт ввода данных с дисплеем; 6 – плата управления драйвером /

Fig. 7. Robotic device for maintenance of the feed table at livestock complexes (a): 1 – outlet of the concentrated feed dispenser; 2 – the auger that pushes the feed to the fence of the feed table; 3 – filling mouth of the dispenser hopper with slide gate; element base of the device control system (b): 1, 2 – output channels for controlling the drive of the driving wheels; 3 – output channel for controlling the dispenser drive; 4 – output channel for controlling the screw drive; 5 – data entry panel with display; 6 – driver management board

Ввиду ограниченности финансовых возможностей для управления роботизированным устройством предполагается в качестве системы позиционирования использование только индуктивных датчиков. Результаты изготовления роботизированного устройства представлены на рисунке 7.

В настоящее время ведутся работы по подготовке разработанного экспериментального образца к производственным испытаниям на животноводческом комплексе.

Выводы.

1. Разработанная имитационная модель (рис. 3) позволяет в среде Matlab/Simulink имитировать процесс движения робота и устанавливать различную нагрузку на электропривод (момент вращения, контролируемый

угол поворота вала для обеспечения точности позиционирования).

2. Моделирование процесса движения мобильной платформы по численно-заданной траектории показало, что максимальная погрешность позиционирования не превышала 0,03 м.

3. С учетом выявленных особенностей погрешностей позиционирования (отклонения центра масс от заданной траектории), при имитационном моделировании был разработан экспериментальный образец роботизированного устройства для обслуживания кормового стола на животноводческих комплексах, оснащенный платой управления и шаговыми электродвигателями для обеспечения автономного перемещения.

Список литературы

1. Nabokov V. I., Novopashin L. A., Denyozhko L. V., Sadov A. A., Ziablitskaia N. V., Volkova S. A., Speshilova I. V. Applications of feed pusher robots on cattle farmings and its economic efficiency. International transaction journal of engineering management & applied sciences & technologies. 2020;11(14):11A14D. DOI: <https://doi.org/10.14456/itjemast.2020.270>
2. Bargo F., Muller L. D., Delahoy J. E., Cassidy T. W. Milk response to concentrate supplementation of high producing dairy cows grazing at two pasture allowances. Journal of dairy science. 2002;85(7):1777-1792. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74252-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74252-5)
3. Никитин Е. А. Система роботизированного обслуживания кормового стола на животноводческих комплексах. Техника и оборудование для села. 2020;(6 (276)):26-30. DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-6-26-30>
4. Bach A., Cabrera V. Robotic milking: Feeding strategies and economic returns. Journal of dairy science. 2017;100(9):7720-7728. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11694>
5. Кузьмина И. Ю., Игнатович Л. С. Обогащение рационов молодняка крупного рогатого скота натуральной биологически активной кормовой добавкой. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2021;22(1):94-103. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.1.94-103>
6. Каракчиева Е. Ф., Лобанов А. Ю. Создание травосмесей для повышения продуктивности и питательной ценности в полевом кормопроизводстве в условиях Республики Коми. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2017;(4):30-32. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2017.59.4.30-32>
7. Miller-Cushon E. K., DeVries T. J. Feed sorting in dairy cattle: Causes, consequences, and management. J. Dairy Sci. 2017;100(5):4172-4183. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11983>
8. Bloch V., Levit H., Halachmi I. Assessing the potential of photogrammetry to monitor feed intake of dairy cows. Journal of Dairy Research. 2019;86(1):34-39. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022029918000882>
9. Halachmi I., Meir Y. B., Miron J., Maltz E. Feeding behavior improves prediction of dairy cow voluntary feed intake but cannot serve as the sole indicator. Animal. 2016;10(9):1501-1506. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1751731115001809>
10. Никитин Е. А., Семенов В. С. Анализ проблем эффективного приготовления кормовой смеси в современном животноводстве. Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2019;(2 (34)):158-163. Режим доступа: <http://imzhpro.ru/wp-content/uploads/n34.pdf>
11. Никитин Е.А. Технично-технологический анализ систем приготовления кормовой смеси для КРС. Инновации в сельском хозяйстве. 2019;(2(31)):53-61. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38583647>
12. Dorokhov A. S., Sibirev A. V., Aksenov A. G. Dynamic systems modeling using artificial neural networks for agricultural machines. Inmateh-Agricultural Engineering. 2019;58(2):63-74. URL: <https://oaji.net/articles/2019/1672-1567792772.pdf>
13. Rumba R., Nikitenko A. Development of free-flowing pile pushing algorithm for autonomous mobile feed-pushing robots in cattle farms. Engineering for Rural Development. 2018. pp. 958-963. DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N477>
14. Грибков А. М., Шилин Д. В. Математическое моделирование манипулятора типа трипод на базе бесштоковых пневматических приводов. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011;(9):3-10. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17051611>
15. Tsai S. H., Kao L. H., Lin H. Y., Lin T. C., Song Y. L., Chang L. M. A sensor fusion based nonholonomic wheeled mobile robot for tracking control. Sensors. 2020;20(24):7055. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20247055>
16. Wang F. J., Qin Y., Guo F., Ren B., Yeow J. T. W. Adaptive visually servoed tracking control for wheeled mobile robot with uncertain model parameters in complex environment. Complexity. 2020;2020:8836468. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/8836468>
17. Xin L. J., Wang Q. L., She J. H., Li Y. Robust adaptive tracking control of wheeled mobile robot. Robotics and Autonomous Systems. 2016;78:36-48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2016.01.002>

18. Shtessel Y., Taleb M., Plestan F. A novel adaptive-gain supertwisting sliding mode controller: Methodology and application. *Automatica*. 2012;48(5):759-769. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2012.02.024>

Reference

1. Nabokov V. I., Novopashin L. A., Denyozhko L. V., Sadov A. A., Ziablitskaia N. V., Volkova S. A., Speshilova I. V. Applications of feed pusher robots on cattle farmings and its economic efficiency. *International transaction journal of engineering management & applied sciences & technologies*. 2020;11(14):11A14D. DOI: <https://doi.org/10.14456/itjemast.2020.270>
2. Bargo F., Muller L. D., Delahoy J. E., Cassidy T. W. Milk response to concentrate supplementation of high producing dairy cows grazing at two pasture allowances. *Journal of dairy science*. 2002;85(7):1777-1792. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74252-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74252-5)
3. Nikitin E. A. *Sistema robotizirovannogo obsluzhivaniya kormovogo stola na zhivotnovodcheskikh kompleksakh*. [Food table robotic maintenance system at animal production units]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela = Machinery and Equipment for Rural Area*. 2020;(6 (276)):26-30. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-6-26-30>
4. Bach A., Cabrera V. Robotic milking: Feeding strategies and economic returns. *Journal of dairy science*. 2017;100(9):7720-7728. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11694>
5. Kuzmina I. Yu., Ignatovich L. S. *Obogashchenie ratsionov molodnyaka krupnogo rogatogo skota natural'noy biologicheski aktivnoy kormovoy dobavkoy*. [Enriching the diets of young cattle with a natural biologically active feed additive]. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*. 2021;22(1):94-103. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.1.94-103>
6. Karakchieva E. F., Lobanov A. Yu. *Sozdanie travosmesey dlya povysheniya produktivnosti i pitatel'noy tseennosti v polevom kormoproizvodstve v usloviyakh Respubliki Komi*. [Creation of grass mixtures for increasing productivity and nutritional value in the field fodder production in conditions of Republic of Komi]. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*. 2017;(4):30-32. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2017.59.4.30-32>
7. Miller-Cushon E. K., DeVries T. J. Feed sorting in dairy cattle: Causes, consequences, and management. *J. Dairy Sci.* 2017;100(5):4172-4183. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11983>
8. Bloch V., Levit H., Halachmi I. Assessing the potential of photogrammetry to monitor feed intake of dairy cows. *Journal of Dairy Research*. 2019;86(1):34-39. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022029918000882>
9. Halachmi I., Meir Y. B., Miron J., Maltz E. Feeding behavior improves prediction of dairy cow voluntary feed intake but cannot serve as the sole indicator. *Animal*. 2016;10(9):1501-1506. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1751731115001809>
10. Nikitin E. A., Semenyuk V. S. *Analiz problem effektivnogo prigotovleniya kormovoy smesi v sovremennom zhivotnovodstve*. [Analysis of feed mixture effective preparation's problems in the modern farming]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva*. 2019;(2 (34)):158-163. (In Russ.). URL: <http://imzhpro.ru/wp-content/uploads/n34.pdf>
11. Nikitin E. A. *Tekhniko-tekhnologicheskii analiz sistem prigotovleniya kormovoy smesi dlya KRS*. [Technological analysis of systems of preparation of feed mixtures for cattle]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2019;(2(31)):53-61. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38583647>
12. Dorokhov A. S., Sibirev A. V., Aksenov A. G. Dynamic systems modeling using artificial neural networks for agricultural machines. *Inmateh-Agricultural Engineering*. 2019;58(2):63-74. URL: <https://oaji.net/articles/2019/1672-1567792772.pdf>
13. Rumba R., Nikitenko A. Development of free-flowing pile pushing algorithm for autonomous mobile feed-pushing robots in cattle farms. *Engineering for Rural Development*. 2018. pp. 958-963. DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N477>
14. Gribkov A. M., Shilin D. V. *Matematicheskoe modelirovanie manipulyatora tipa tripod na baze besshtokovykh pnevmaticheskikh privodov*. [Mathematical modelling of tripod type manipulator based on rodless pneumatic actuators]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2011;(9):3-10. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17051611>
15. Tsai S. H., Kao L. H., Lin H. Y., Lin T. C., Song Y. L., Chang L. M. A sensor fusion based nonholonomic wheeled mobile robot for tracking control. *Sensors*. 2020;20(24):7055. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20247055>
16. Wang F. J., Qin Y., Guo F., Ren B., Yeow J. T. W. Adaptive visually servoed tracking control for wheeled mobile robot with uncertain model parameters in complex environment. *Complexity*. 2020;2020:8836468. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/8836468>
17. Xin L. J., Wang Q. L., She J. H., Li Y. Robust adaptive tracking control of wheeled mobile robot. *Robotics and Autonomous Systems*. 2016;78:36-48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2016.01.002>
18. Shtessel Y., Taleb M., Plestan F. A novel adaptive-gain supertwisting sliding mode controller: Methodology and application. *Automatica*. 2012;48(5):759-769. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2012.02.024>

Сведения об авторе

✉ **Никитин Евгений Александрович**, аспирант, младший научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, д. 5, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0918-2990>, E-mail: evgeniy.nicks@yandex.ru

Information about the author

✉ **Evgeniy A. Nikitin**, postgraduate, junior researcher, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 5, 1st Institutsky proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>, e-mail: evgeniy.nicks@yandex.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author