

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК: 636.084.743

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-31-36>

## Автоматическая система позиционирования колёсных роботизированных технических средств, обслуживающих кормовой стол

*Е.А. Никитин*

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия  
evgeniy.nicks@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>

**Аннотация.** Качество и доступность корма на кормовом столе повышают продуктивность коров. Обеспечить доступность корма можно за счёт увеличения длины кормового стола и применения средств роботизации. Колёсное роботизированное техническое средство, применяемое при раздаче кормов, повышает производительность труда и снижает влияние человеческого фактора на процесс кормления. С целью повышения эффективности процесса раздачи кормов разработаны и испытаны автоматическая система позиционирования и роботизированное устройство для обслуживания кормового стола. Представлено математическое описание кинематических зависимостей движения колёсных роботизированных технических средств. Разработан алгоритм работы автоматической системы позиционирования, учитывающий обеспечение алгоритмической связи исполнительных механизмов электропривода ведущих колёс и системы технического зрения, где обработка изображений осуществляется по интеллектуальному алгоритму распознавания фронта кормления. Разработан принцип построения маршрута движения роботизированного устройства по кормовому столу. Испытания подтвердили соответствие выходных реакций исполнительных устройств роботизированного устройства входным командам автоматической системы позиционирования.

**Ключевые слова:** животноводческий комплекс, раздача корма, автоматическая система позиционирования, роботизированное техническое средство, кормовой стол, фронт кормления, система технического зрения

**Для цитирования:** Никитин Е.А. Автоматическая система позиционирования колёсных роботизированных технических средств, обслуживающих кормовой стол // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 1. С. 31-36. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-31-36>

## ORIGINAL PAPER

## Automatic positioning system of wheeled robotic technical means servicing the feed table

*E.A. Nikitin*

Federal Scientific Agroengineering Centre VIM; Moscow, Russia  
evgeniy.nicks@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>

**Abstract.** The quality and availability of forage on the feed table increase cow productivity. Feed availability can be ensured by increasing the length of the feed table and using robotic tools. The use of a wheeled robotized device in feed distribution increases labour productivity and reduces the influence of the human factor on the feeding process. To improve the efficiency of the feed distribution process, the author has developed and tested an automatic positioning system and a robotic device for servicing the feed table. The article presents a mathematical description of the kinematic relationships of movement of wheeled robotic devices. The author has developed an algorithm of the automatic positioning system operation, which takes into account the algorithmic connection between the electric drive actuators of the driving wheels and the vision system, where the image is processed according to the intellectual algorithm of the feeding area recognition. The author has developed the principle of constructing the route travelled by the robotic device along the feed table. Tests have confirmed the conformity of output reactions of the robotic device actuators to the input commands of the automatic positioning system.

**Keywords:** livestock breeding unit, feed distribution, automatic positioning system, robotic device, feed table, feeding alley, vision system

**For citation:** Nikitin E.A. Automatic positioning system of wheeled robotic technical means servicing the feed table. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(1):31-36. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-1-31-36>

## Введение

Цифровизация технологических процессов в животноводстве позволяет вести учёт надоев на ферме, осуществлять автоматизированную сортировку животных, использовать станции докорма концентратами, роботизированные доильные установки, системы автоматического выявления половой охоты и др. [1, 2].

Продуктивность коров и их продуктивное долголетие [3, 4] зависят от состояния кормового стола животноводческого комплекса [5, 6]. Качество полнорационных кормовых смесей, приготовленных в миксере-кормораздатчике, зависит от очередности загрузки компонентов [7].

Круглогодичный монорацион позволяет избегать расстройств ЖКТ и перепадов показателей продуктивности при смене стойлового и пастбищного рациона, а также поддерживать постоянный видовой состав симбиотической микрофлоры рубца у животных [8]. Кроме качественных показателей кормовой смеси, важно обеспечивать её вкусовую привлекательность [9].

При раздаче кормовой смеси необходимо учитывать особенности животных. Коровы, имеющие более высокий ранг в стаде, едят первыми и часто разбрасывают приготовленный рацион. Животные с низким рангом едят последними, поскольку более сильные животные отодвигают их от фронта кормления [10, 11].

Анализ исследований зарубежных учёных выявил, что животные, имеющие более низкий ранг в стаде, физиологически предрасположены к большей молочной продуктивности, поэтому важно обеспечить доступность корма подобным животным [12, 13]. Эту

проблему можно решить за счёт увеличения длины кормового стола и применения средств роботизации.

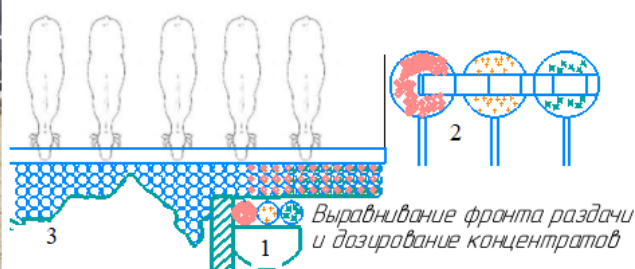
**Цель исследований:** разработка и испытание роботизированного устройства и его автоматической системы позиционирования для обслуживания кормового стола.

## Материалы и методы

Роботизированное устройство предполагает автономное обслуживание кормового стола на животноводческом комплексе. Роботизированное устройство 1 подталкивает расположенную на кормовом столе массу к ограждению, обеспечивая доступность корма животным. В специальной зоне 2 осуществляются зарядка аккумуляторной батареи и пополнение накопительного бункера концентрированными кормами, которые дозируются роботом по ходу движения. Построение маршрута вдоль ограждения кормового стола осуществляется автономно системой технического зрения, автоматически определяющей границу разброса корма 3 (рис. 1).

В алгоритм автоматического позиционирования заложена технология машинного зрения, основанная на интеллектуальном выделении областей интереса в зоне сканирования маршрута с использованием RGB-камеры и программных светофильтров.

Площадь сканирования кормового стола имеет постоянное значение, при этом полученные снимки разбиваются на бинаризованное изображение (двухцветное). Чтобы описать бинаризованное изображение размером  $[X, Y]$ , мы используем матрицу  $p(i, j)$  для представления каждого пикселя с его координатами  $(i, j)$  на изображении, заданными  $0 \leq i < N$  и  $0 \leq j < M$ . Пиксель  $p(i, j)$  имеет четыре



**Рис. 1. Принцип обслуживания кормового стола на животноводческом комплексе:**

- 1 – роботизированное устройство для обслуживания кормового стола;  
2 – зарядная станция с накопительными бункерами кормовых добавок; 3 – фронт кормления

**Fig. 1. Principle of feed table servicing at the livestock breeding unit:**

- 1 – robotic device for servicing the feed table; 2 – charging station with storage bunkers of feed additives; 3 – feeding alley

смежных пикселя, а именно  $p(i-1, j)$ ,  $p(i, j-1)$ ,  $p(i+1, j)$  и  $p(i, j+1)$ , и вместе с  $p(i-1, j-1)$ ,  $p(i+1, j-1)$ ,  $p(i-1, j+1)$  и  $p(i+1, j+1)$  они образуют восемь соседних пикселей  $p(i, j)$ . Две точки объекта, обозначаемые как «s» и «t», считаются четырехсвязными (восьмисвязными), если существует траектория, состоящая из точек объекта  $a_1, a_2, \dots, a_n$ , – такая, что  $a_1 = s$  и  $a_n = t$  и для всех  $1 \leq k \leq n-1$  и  $a_k$  и  $a_{k+1}$  являются четырьмя соседними (восьмью смежными) друг с другом. Четырехсвязный (восьмисвязный) компонент в двоичном изображении определяется как облако точек объекта таким образом, что любые два пикселя в наборе являются четырехсвязными (восьмисвязными), а связанный компонент является желаемым объектом (составной канал). Площадь объекта  $O$ , обозначаемая как  $S_o$ , определяется как количество пикселей в объекте  $O$  и может быть вычислена по формуле:

$$S_o = |\{p(x, y) | p(x, y) \in O\}|. \quad (1)$$

Зона с восемью соединениями имеет более плотную концентрацию кормовой смеси на полу загрузочной дорожки, в то время как зона с четырьмя соединениями имеет меньшее количество смеси, что позволяет распознать крайнюю кромку, которую можно использовать для последующей ориентации робота во время движения. Чтобы определить границу разброса ленты, изображение делится на несколько частей, и площадь интересующих областей (серая) суммируется для определения общей площади пятна:

$$K = \begin{cases} 1, S_i - \sum S_o \leq L \\ 0, S_i - \sum S_o > L, \end{cases} \quad (2)$$

где  $S_i$  – средняя площадь для  $i$ -го бинаризованного изображения;  $K$  – индикатор интересующей области (1 – для кормовой смеси, 0 – для неинтересной области фермы);  $L$  – центр масс робота (расстояние от ограждения кормовой аллеи).

Алгоритм автоматической системы позиционирования обрабатывает изображения одинакового размера, поэтому его сложность является постоянной. Таким образом, для нашего алгоритма потребность в вычислительной мощности центральной платы управления  $g(n) = \text{const}$ .

Для обработки изображений используется инструмент обработки изображений Color Threshold и Image Region Analyzer от Matlab.

Схематично принцип построения маршрута движения по кормовому столу представлен на рисунке 2.

Разработка алгоритма автоматической системы позиционирования была направлена на обеспечение алгоритмической связи исполнительных механизмов электропривода ведущих колёс и системы технического зрения.



Рис. 2. Принцип построения маршрута с использованием системы технического зрения  
 Fig. 2. Principle of designing route using the vision system

**Результаты и их обсуждение**

Согласно разработанному алгоритму точность перемещения робота определяется его кинематическими параметрами, зависящими от размера робота, скорости и координат каждого его элемента.

При расчётах кинематики использовались следующие уравнения:

$$\Delta x_i = \vartheta_{O_i} \cdot t_i \cdot \cos(\varphi_i); \quad (3)$$

$$\Delta y_i = \vartheta_{O_i} \cdot t_i \cdot \sin(\varphi_i); \quad (4)$$

$$\vartheta_{O_i} = r \cdot \omega; \quad (5)$$

$$\vartheta_o = R \cdot \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}, \tag{6}$$

где  $\Delta x_i, \Delta y_i$  – приращения координаты по осям  $x, y$  на  $i$ -том участке пути;  $\vartheta_{oi}$  – линейная скорость центра масс робота на  $i$ -том участке пути;  $t_i$  – время движения на  $i$ -том участке пути;  $r$  – радиус приводных колес робота;  $R$  – радиус траектории движения центра масс робота по окружности.

Динамическое управление разработанным роботизированным устройством устанавливается через взаимосвязь габаритных размеров робота, скоростью движения, действующими силами, приложенными к его элементам, и значением вращающего момента ведущих колёс.

При рассмотрении динамических характеристик роботизированного устройства решалась задача управления вращающим моментом каждого электропривода ведущего колеса при нормальном и смещённом центре масс.

Итоговые уравнения, полученные в ходе решения:

$$M_1 = \frac{\lambda m_1 g}{R} \cdot c; \tag{7}$$

$$M_2 = \lambda g \cdot \left( \frac{m_2}{R} + \frac{m_3}{r} \right) \cdot b \tag{8}$$

$$m_1(m_2, m_3) = a + b \cdot m_2 + c \cdot m_2^2 + d \cdot m_2^3 + e \cdot m_2^4 + f \cdot m_3 + g \cdot m_3^2 + h \cdot m_3^3 + i \cdot m_3^4 + j \cdot m_3^5, \tag{9}$$

где  $M_1, M_2$  – моменты двигателей, управляющих соответственно вращением правого и левого приводного колёс;  $\lambda$  – коэффициент трения (шина – асфальт);  $R$  – радиус приводных колес;  $r$  – радиус переднего вспомогательного колеса;  $m_1, m_2, m_3$  – массы,

соответственно приходящиеся на правое приводное, левое приводное и переднее вспомогательное колёса;  $b, c$  – расстояния от края робота до центра масс (рис. 3).

Эмпирически получена матрица значений  $m_1, m_2, m_3$  при изменении положения центра масс робота (табл.). Каждая ячейка содержит данные в долях от всей массы робота  $m$  (рис. 3). При оцифровке матрицы выведены уравнения:

$$m = m_1 + m_2 + m_3; \tag{10}$$

$$m_1' = \frac{m_1}{m}; m_2' = \frac{m_2}{m}; m_3' = \frac{m_3}{m}; \tag{11}$$

$$m' = m_1' + m_2' + m_3' = 1. \tag{12}$$

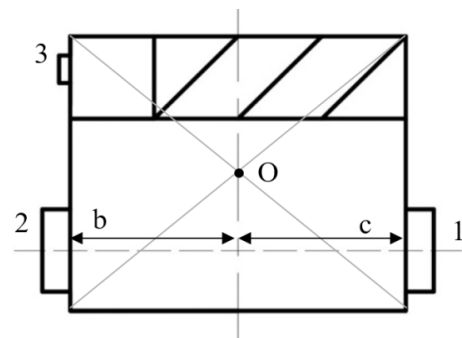


Рис. 3. Условная схема подравнивателя кормосмеси на кормовом столе:

- 1 – правое приводное колесо; 2 – левое приводное колесо;
- 3 – переднее вспомогательное колесо;
- O – условный центр масс робота

Fig. 3. Conditional operation scheme of the feed mixture leveler on the feed table:

- 1 – right drive wheel; 2 – left drive wheel;
- 3 – front auxiliary wheel;
- O – conditional center of mass of the robot

Таблица

Матрица распределения масс на точки опоры робота при отработке поворота

Table

Matrix of mass distribution on the robot support points when working out a turn

№ сценария Scenario number	Структура ячеек таблицы / Table cell structure									
	Точка опоры 3 (рис. 3) / Support point 3 (Fig. 3)					Точка опоры 3 (рис. 1) / Support point 3 (Fig. 1)				
	Точка опоры 3 (рис. 2) / Support point 3 (Fig. 2)					Точка опоры 3 (рис. 1) / Support point 3 (Fig. 1)				
1	0,6993		0		0	0	0	0	0	0
	0	0,3024	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,6033		0,5747		0	0	0	0	0	0
	0,0975	0,3007	0	0,4268	0	0	0	0	0	0
3	0,5103		0,5096		0,5053	0	0	0	0	0
	0,1850	0,3042	0,0709	0,4211	0	0,4967	0	0	0	0
4	0,4165		0,4065		0,4243	0,4196	0	0	0	0
	0,2871	0,2969	0,1714	0,4228	0,0719	0,5055	0	0,5812	0	0
5	0,3052		0,3074		0,3067	0,2994		0,2961		
	0,4015	0,2929	0,2813	0,4118	0,1956	0,4987	0,1262	0,5749	0	0,7046

Анализ таблицы показал, что при попадании центра масс на главную диагональ представленной матрицы (выделено зелёным цветом в таблице 1 и на рисунке 4) робот находится в состоянии равновесия, опираясь лишь на правое приводное и переднее вспомогательное колёса. На левое приводное колесо нагрузка не оказывается.

У реального робота нормальное расположение центра масс смещено в область под главной диагональю, поэтому необходимо приложить большое усилие на свободный угол, чтобы робот завалился.

По матрице данных построена плоскость (рис. 5). В программе TableCurve 3D v4.0 найдены коэффициенты выведенной зависимости (9):

$a = -0.105492992154444937$ ;  $b = -0.968638565161313026$ ;

$c = -0.493010767949052054$ ;  $d = 2.00651268530310107$ ;

$e = -2.50891795828501917$ ;  $f = 10.8902880333221492$ ;

$g = -49.8677123663848979$ ;  $h = 102.298062603272588$ ;

$i = -102.835458681764415$ ;  $j = 40.589025566643145$ .

Уравнения (1)-(3) описывают вращающие моменты шаговых двигателей. Рассчитав эти значения для конкретных параметров, можно обеспечить алгоритмическую связь между системой позиционирования и платой управления электродвигателем.

Разработанный робот и система автоматического позиционирования были испытаны на базе ЗАО «Совхоз имени Ленина» в 4 квартале 2022 г. В ходе испытаний установлено соответствие выходных реакций исполнительных устройств роботизированного устройства входным командам автоматической системы позиционирования.

### Выводы

Разработанная автоматическая система позиционирования позволяет построить маршрут роботизированного технического средства с учётом границы разброса кормовой смеси на кормовом столе. При этом распределение мощности на электропривод ведущих колёс происходит с учётом распределения масс робота в момент поворота.

### Список литературы

1. Tian F., Wang X., Yu S., Wang R., Song Zh., Yan Y., Li F., Wang Zh., Yu Zh. Research on navigation path extraction and obstacle avoidance strategy for pusher robot in dairy farm. *Agriculture*. 2022;12(7):1008. <https://doi.org/10.3390/agriculture12071008>
2. Tian F., Hu G., Yu S., Wang R., Song Zh., Yan Y., Li F., Wang Zh., Yu Zh. Navigation path extraction and experimental research of pusher robot based on binocular vision. *Applied Sciences*. 2022;12(13):6641. <https://doi.org/10.3390/app12136641>
3. Hou P., Pan H., Guo Ch. Simulation research for mobile robot path planning based on improved artificial potential field method

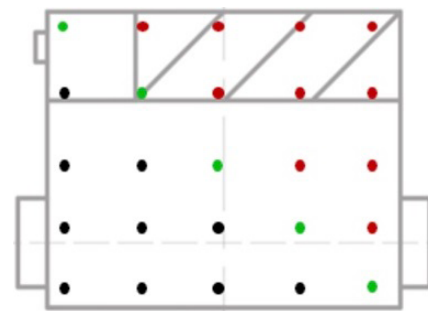


Рис. 4. Схематическое распределение масс на точки опоры робота

Fig. 4. Schematic distribution of masses on the robot's support points

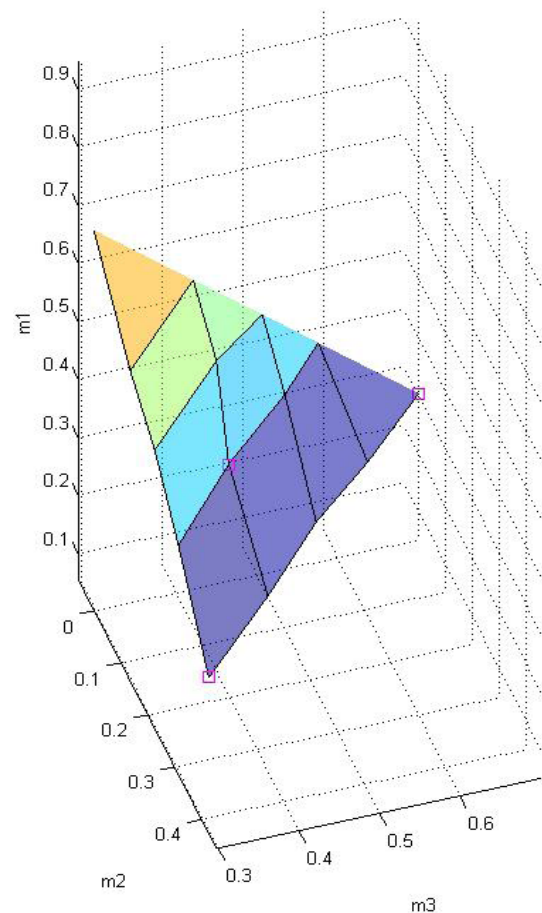


Рис. 5. Плоскость, характеризующая зависимость масс

Fig. 5. Plane characterizing the relationship of masses

### References

1. Tian F., Wang X., Yu S., Wang R., Song Zh., Yan Y., Li F., Wang Zh., Yu Zh. Research on navigation path extraction and obstacle avoidance strategy for pusher robot in dairy farm. *Agriculture*. 2022;12(7):1008. <https://doi.org/10.3390/agriculture12071008>
2. Tian F., Hu G., Yu S., Wang R., Song Zh., Yan Y., Li F., Wang Zh., Yu Zh. Navigation path extraction and experimental research of pusher robot based on binocular vision. *Applied Sciences*. 2022;12(13):6641. <https://doi.org/10.3390/app12136641>
3. Hou P., Pan H., Guo Ch. Simulation research for mobile robot path planning based on improved artificial potential field method

recommended by the AsiaSim. *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*. 2017;8(2):1750046. <https://doi.org/10.1142/S1793962317500465>

4. Zhang C., Yong L., Chen Y., Zhang S., Ge L., Wang S., Li W. A Rubber-tapping robot forest navigation and information collection system based on 2D LiDAR and a gyroscope. *Sensors*. 2019;19(9):2136. <https://doi.org/10.3390/s19092136>

5. Yang Sh., Liang Sh., Zheng Y., Tan Y., Xiao Zh., Li B., Liu X. Integrated navigation models of a mobile fodder-pushing robot based on a standardized cow husbandry environment. *Transactions of the ASABE*. 2020;63(2):221-230. <https://doi.org/10.13031/trans.13365>

6. Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., Mikhailichenko S.M., Kuznetsov Y.A., Kravchenko I.N., Kalashnikova L.V. Modeling of mobile TMR mixer operation. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020;61(2):193-198. <https://doi.org/10.35633/inmateh-61-21>

7. Купреенко А.И., Исаев Х.М.О., Михайличенко С.М. Настройка автоматического кормового вагона на заданную норму выдачи // Агроинженерия. 2020. № 4 (98). С. 20-25. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-4-20-25>

8. Булатов С.Ю., Зыкин А.А., Миронов К.Е., Сергеев А.Г., Шкилев Н.П. Смеситель-дозатор сухих сыпучих материалов // Техника и оборудование для села. 2023. № 1 (307). С. 30-32. EDN: ECOOWY

9. Булатов С.Ю., Зыкин А.А., Нечаев В.Н., Сергеев А.Г., Шамин А.Е. Модель приготовления кормов в условиях малых форм хозяйствования // Техника и оборудование для села. 2023. № 4 (310). С. 26-30. EDN: LIHQST

10. Алешкин А.В., Булатов С.Ю., Нечаев В.Н., Низовцев С.Л. Обоснование конструкционных и технологических параметров рабочего органа фрезерного измельчителя зерна // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 1. С. 37-51. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.037-051>

11. Pavkin D., Nikitin E., Shilin D., Belyakov M., Golyskov I., Mikhailichenko S., Chepurina E. Development results of a cross-platform positioning system for a robotics feed system at a dairy cattle complex. *Agriculture*. 2023;13(7):1422. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071422>

12. Pavkin D.Yu., Shilin D.V., Nikitin E.A., Kiryushin I.A. Designing and simulating the control process of a feed pusher robot used on a dairy farm. *Applied Sciences*. 2021;11(22):10665. <https://doi.org/10.3390/app112210665>

13. Никитин Е.А., Дорохов А.С. Модернизация технологических процессов в животноводстве путём использования малогабаритных роботизированных машин // Аграрная наука – сельскому хозяйству: Сборник материалов XV Международной научно-практической конференции: В 2 кн. Барнаул, 2020. С. 59-61.

#### Сведения об авторе

**Никитин Евгений Александрович**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5, строение 1; <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>; [evgeniy.nicks@yandex.ru](mailto:evgeniy.nicks@yandex.ru)

Статья поступила в редакцию 20.07.2023; поступила после рецензирования и доработки 14.11.2023; принята к публикации 14.11.2023

recommended by the AsiaSim. *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*. 2017;8(2):1750046. <https://doi.org/10.1142/S1793962317500465>

4. Zhang C., Yong L., Chen Y., Zhang S., Ge L., Wang S., Li W. A Rubber-tapping robot forest navigation and information collection system based on 2D LiDAR and a gyroscope. *Sensors*. 2019;19(9):2136. <https://doi.org/10.3390/s19092136>

5. Yang Sh., Liang Sh., Zheng Y., Tan Y., Xiao Zh., Li B., Liu X. Integrated navigation models of a mobile fodder-pushing robot based on a standardized cow husbandry environment. *Transactions of the ASABE*. 2020;63(2):221-230. <https://doi.org/10.13031/trans.13365>

6. Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., Mikhailichenko S.M., Kuznetsov Y.A., Kravchenko I.N., Kalashnikova L.V. Modeling of mobile TMR mixer operation. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020;61(2):193-198. <https://doi.org/10.35633/inmateh-61-21>

7. Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., Mikhailichenko S.M. Adjusting the automatic feed wagon to the selected feeding rate. *Agricultural Engineering*. 2020;4(98):20-25. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-4-20-25>

8. Bulatov S.Yu., Zykin A.A., Mironov K.E., Sergeev A.G., Shkilev N.P. Dosing mixer for dry bulk materials. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;1:30-32. (In Rus.)

9. Bulatov S.Yu., Zykin A.A., Nechaev V.N., Sergeev A.G., Shamin A.E. Model of Feed Preparation in the Conditions of Small Farms. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;4:26-30. (In Rus.)

10. Aleshkin A.V., Bulatov S.Yu., Nechaev V.N., Nizovtsev S.L. Substantiation of the structural and technological parameters of the working body of the milling grain shredder. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(1):37-51. (In Rus.). <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.037-051>

11. Pavkin D., Nikitin E., Shilin D., Belyakov M., Golyskov I., Mikhailichenko S., Chepurina E. Development results of a cross-platform positioning system for a robotics feed system at a dairy cattle complex. *Agriculture*. 2023;13(7):1422. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071422>

12. Pavkin D.Yu., Shilin D.V., Nikitin E.A., Kiryushin I.A. Designing and simulating the control process of a feed pusher robot used on a dairy farm. *Applied Sciences*. 2021;11(22):10665. <https://doi.org/10.3390/app112210665>

13. Nikitin E.A., Dorokhov A.S. Modernization of technological processes in livestock farming through the use of small-sized robotic machines. In: *Agricultural science's contribution to agriculture. Proceedings of XV International Scientific and Practical Conference in 2 books*. Barnaul, 2020:59-61. (In Rus.)

#### Author Information

**Evgeniy A. Nikitin**, CSc (Eng), Senior Research Engineer; Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 1st Institutsky Proezd Str., 5, Moscow, 109428, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>; [evgeniy.nicks@yandex.ru](mailto:evgeniy.nicks@yandex.ru)

Received 20.07.2023; revised 14.11.2023; accepted 14.11.2023