

Вестник Курганской ГСХА. 2026. №1 (57). С. 78–88
Vestnik Kurganskoj GSNA. 2026; (1-57): 78–88

Научная статья
УДК 631.22.014
Код ВАК 4.3.2

DOI: 10.52463/2227-4227_2026_57_78_88
EDN: YCMVII

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА АККУМУЛЯТОРНОГО КОРМОРАЗДАТЧИКА

Виктор Васильевич Троценко¹✉, Ирина Викторовна Троценко², Алексей Павлович Епифанов³

^{1, 2, 3} Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Пушкин, Россия

¹ trotsenko@spbgau.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-2772-9657>

² iv.trotsenko@spbgau.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5620-3195>

³ kaf.ee@spbgau.ru

Аннотация. В статье указывается, что для раздачи связанных кормов могут быть использованы аккумуляторные раздатчики. Ранее на базе платформы ЭТ-2040 выпускались кормораздатчики КСА-5А и КСА-5Б с однодвигательным электроприводом битерного отделяющего устройства, продольного и поперечного транспортеров. Если заменить старые щелочные аккумуляторы на современные литий-ионные, то такие кормораздатчики могут получить вторую жизнь. Однако, исходя из предшествующего производственного опыта авторов, данный агрегат характеризуется высокой неравномерностью нормы выдачи корма, а также сложностью ее регулирования. В связи с этим целью исследования явилось теоретическое обоснование целесообразности разделения электропривода рабочих органов. При раздаче корма для привода трех рабочих органов возможно использование привода каждого из указанных механизмов. В данной работе предлагается обеспечить отдельным электроприводом поперечный транспортер, привод же продольного транспортера объединить с приводом битерного отделяющего устройства. Для обоснования использовать методы теоретической механики и теории автоматического управления. Получены математические зависимости, позволяющие по заданной статической ошибке производительности рабочих органов определить параметры систем регулирования обоих электроприводов. С теоретической точки зрения установлено, что автоматизированный двухдвигательный электропривод позволяет повысить точность регулирования нормы выдачи, чем однодвигательный. В частности, указывается, что однодвигательный вариант для повышения точности, требует установки редуктора с переменным передаточным отношением, что повышает инерционность системы и усложняет кинематическую схему. Использование двухдвигательного электропривода раздатчика вместо однодвигательного позволяет облегчить процесс регулирования и повысить точность нормы выдачи корма.

Ключевые слова: аккумуляторный кормораздатчик, норма выдачи, битер, двигатель, электропривод, мощность, производительность, поток возбуждения.

Благодарности: работа финансировалась за счет средств ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет». Дополнительные гранты на проведение данного исследования получено не было.

Для цитирования: Троценко В.В., Троценко И.В., Епифанов А.П. Исследование работы автоматизированного электропривода аккумуляторного кормораздатчика // Вестник Курганской ГСХА. 2026. № 1(57). С. 78–88 DOI: 10.52463/2227-4227_2026_57_78_88. EDN: YCMVII.

Scientific article

STUDYING OPERATION OF THE AUTOMATED ELECTRIC DRIVE OF THE BATTERY FEED DISPENSER

Viktor V. Trotsenko¹✉, Irina V. Trotsenko², Alexey P. Epifanov³

^{1, 2, 3} Saint-Petersburg State Agrarian University, Saint-Petersburg, Pushkin, Russia

¹ trotsenko@spbgau.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-2772-9657>

² iv.trotsenko@spbgau.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5620-3195>

³ kaf.ee@spbgau.ru

Abstract. The article says that battery feed dispensers can be used to distribute cohesive fodders. Previously, the KSA-5A and KSA-5B feed dispensers with a single-motor electric drive of a beater separating device, longitudinal and transverse conveyors were produced on the basis of the ET-2040 platform. If to replace old alkaline batteries with modern lithium-ion batteries, then such feed dispensers can get a 'second life'. However, based on the previous production experience of the authors, this unit is characterized by a high uneven feed distribution rate, as well as by complex adjustment control. In this regard, the purpose of the study was theoretical substantiation of the feasibility of separating the electric drive of the working elements. When distributing feed, for the drive of three working elements, it is possible to use the drive of each of these mechanisms. In this paper, it is proposed to provide a transverse conveyor with a separate electric drive, while the drive of the longitudinal conveyor to combine with the drive of the beater separating device. The methods of theoretical mechanics and the theory of automatic control should be used

for substantiation. Mathematical dependences have been obtained that make it possible to determine the parameters of the control systems of both electric drives based on a given static error in the performance of the working elements. From a theoretical point of view, it has been established that an automated two-motor electric drive makes it possible to increase the accuracy of adjusting the discharge rate in comparison with a single-motor one. In particular, it is indicated that to increase accuracy the single-motor version requires installation of a gearbox with a variable gear ratio, which increases the inertia of the system and makes the kinematic scheme more sophisticated. Dual-motor feed distributor electric drive application instead of a single-motor one makes it easier to adjust and improve the accuracy of the feed delivery rate.

Keywords: battery feed dispenser, discharge rate, beater, motor, electric drive, power, productivity, excitation flow.

Acknowledgments: the work was funded by St. Petersburg State Agrarian University. No additional grants were received for this study.

For citation: Trotsenko V.V., Trotsenko I.V., Epifanov A.P. Studying operation of the automated electric drive of the battery feed dispenser // Vestnik Kurganskoy GSHA. 2026; (1-57): 78–88. DOI: 10.52463/2227-4227_2026_57_78_88. EDN: YCMVII. (In Russ).

Введение. Раздача корма на животноводческих фермах достаточно часто осуществляется мобильными кормораздатчиками, в том числе с электрическим приводом рабочих органов от аккумулятора [1–3]. На базе платформы ЭТ-2040 ранее выпускались кормораздатчики КСА-5А и КСА-5Б с однодвигательным электроприводом битерного отделяющего устройства, продольного и поперечного транспортеров мощностью 3,6к Вт. На этих агрегатах использовались щелочные аккумуляторы 36ТЖН-400 со средним напряжением бортовой сети 40 В.

Если заменить старые щелочные аккумуляторы на современные более долговечные литий-ионные, то такие кормораздатчики могут получить вторую жизнь. Однако, исходя из предшествующего производственного опыта авторов данный агрегат при раздаче грубых (связных) кормов, таких как сено или солома, характеризуется сложностью в регулировке и высокой неравномерностью нормы выдачи корма. Неравномерность в зависимости от вида связного корма превышала 15 %. Причиной этому, на наш взгляд, является фиксированное соотношение скоростей продольного и поперечного транспортеров, когда норма выдачи определяется только скоростью движения всего агрегата.

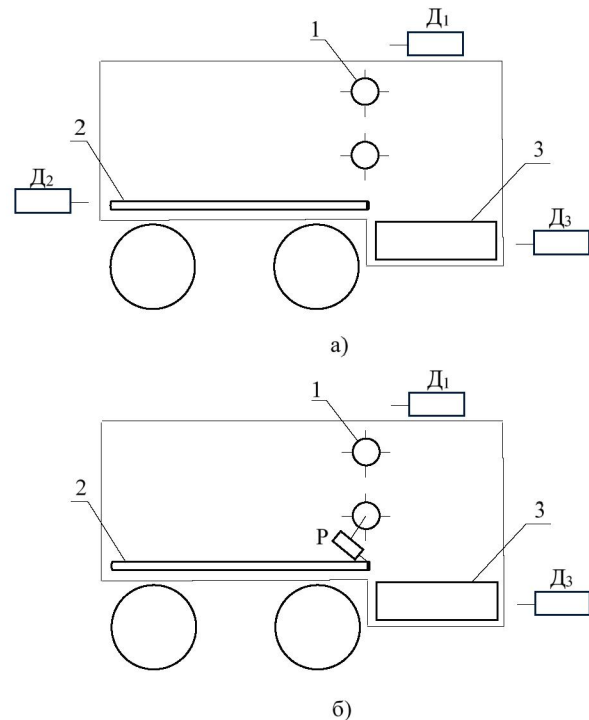
Целью исследования являлось обоснование целесообразности разделение моноэлектропривода указанных рабочих органов кормораздатчика.

Материалы и методы. Работа кормораздатчиков КСА-5 предусматривается с приводом всех рабочих органов от одного двигателя. Но варианты могут быть и трехдвигательными (рисунок 1а) и двухдвигательными (рисунок 1б).

Если объединить привод продольного транспортера и битерного отделяющего устройства, а привод поперечного транспортера оставить от одного двигателя, то получится двухдвигательный вариант.

В соответствии с [4–6] зависимость между полезной мощностью P_n , идущей на отделение корма битерами, и производительностью рабочих органов Q в первом приближении принимаем линейной

$$P_n = k_0 Q \tag{1}$$



1 – битеры; 2 – продольный транспортер; 3 – поперечный транспортер

Рисунок 1 – Кинематические схемы кормораздатчика

1 – beaters; 2 – longitudinal conveyor; 3 – transverse conveyor

Figure 1 – Kinematic diagrams of the feed dispenser

Соотношение (1) справедливо для полезной мощности, идущей на весь процесс выдачи корма, так как отделение корма битерами значительно более энергоемко, чем транспортирование корма транспортерами [6–8]. Зависимость (1) позволяет создать систему автоматизированного электропривода рабочих органов аккумуляторного кормораздатчика, которая, стабилизируя потребляемую мощность, позволит поддерживать постоянной производительность рабочих органов [9–11].

Полезную мощность определяем как разницу между мощностью на валу двигателя D_1 , (рисунок 1 а и б) в рабочем режиме P_{B1} и мощностью на валу двигателя при прокручивании механизма с той же скоростью на холостом ходу P_{0B1} .

$$P_n = P_{B1} - P_{0B1} \tag{2}$$

С учетом (1) и постоянства потерь в стали и

механических потерь при постоянной скорости вращения двигателя получим

$$k_0 Q = M_1 \omega_1 - M_{01} \omega_1, \quad (3)$$

где M_1 – электромагнитный момент двигателя D_1 ;

M_{01} – электромагнитный момент двигателя при холостом ходе;

ω_1 – угловая скорость двигателя.

Через полную мощность, потребляемую двигателем, производительность определится:

$$k_0 Q = U_1 I_1 - I_1^2 r_{D1} - M_{01} \omega_1, \quad (4)$$

где U_1 – напряжение на зажимах двигателя;

I_1 – ток двигателя;

r_{D1} – суммарное сопротивление двигателя.

В процессе работы кормораздатчика измерить полезную мощность затруднительно, поэтому производительность рабочих органов целесообразнее поддерживать постоянной стабилизацией электромагнитной (3) или полной (4) мощности [12; 13].

Постоянство электромагнитной мощности двигателя D_1 может быть обеспечено стабилизацией электромагнитного момента M_1 и скорости ω_1 ,

$$M_1 = const$$

$$\omega_1 = const$$

$$P_{эм1} = M_1 \omega_1 = const, \quad (5)$$

постоянство полной мощности двигателя – стабилизацией напряжения двигателя U_1 и потребляемого тока I_1

$$U_1 = const$$

$$I_1 = const$$

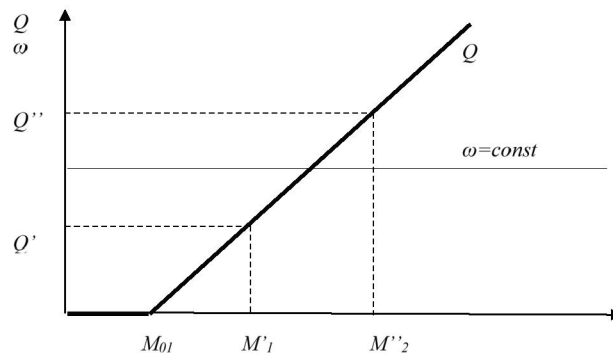
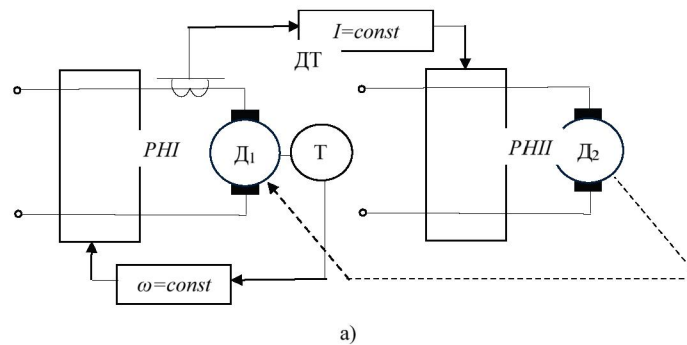
$$P_1 = U_1 I_1 = const. \quad (6)$$

На рисунке 2а представлена блок-схема автоматизированного двухдвигательного привода рабочих органов, позволяющая реализовать условие (5). Двигатель привода битеров D_1 благодаря отрицательной обратной связи по скорости работает в режиме $\omega_1 = const$. Стабилизация момента M_1 выполняется поддержанием на заданном уровне тока двигателя D_1 путем изменения скорости продольного транспорта (двигатель D_2) и подачи кормовой массы на битеры.

Из выражения (3) получаем

$$Q = M_1 \frac{\omega_1}{k_0} - M_{01} \frac{\omega_1}{k_0}, \quad (7)$$

откуда следует, что производительность пропорциональна электромагнитному моменту двигателя D_1 и, следовательно, пропорциональна потребляемому двигателем току I_1 . Регулирование производительности осуществляется изменением уставки по току (рисунок 2б) [14; 15].



а – блок-схема; б – механическая и регулировочная характеристики

Рисунок 2 – Система управления двухдвигательным электроприводом с обратными связями по скорости и току

(a) flow chart; (b) mechanical and control characteristics

Figure 2 – Control system for a two-motor electric drive with close loop configuration on speed and current

На рисунке 3а представлена блок-схема автоматизированного двухдвигательного привода рабочих органов, реализующих условие (6). Двигатель привода битеров благодаря отрицательной обратной связи по напряжению работает в режиме $U_1 = const$. Ток I_1 двигателя D_1 , так же, как и в схеме рисунка 2а, поддерживается постоянным с помощью отрицательной обратной связи по току. Пренебрегая потерями в меди, из выражения (4) получим

$$Q = I_1 \frac{U_1}{k_0} - M_{01} \frac{\omega_1}{k_0}, \tag{8}$$

то есть производительность пропорциональна произведению $U_1 \cdot I_1$.

На рисунке 3б представлены скоростная характеристика двигателя последовательного возбуждения и график зависимости производительности рабочих органов Q от тока I_1 при $U_1 = const$. Процесс отделения корма битерами происходит устойчиво в определенном скоростном диапазоне

$$\frac{\omega_{max}}{\omega_{min}} \leq 2, \tag{9}$$

поэтому на скоростной и, следовательно, нагрузочный диапазоны двигателя D_1 накладываются ограничения:

$$\omega_{min} \leq \omega_1 \leq \omega_{max}, \tag{10}$$

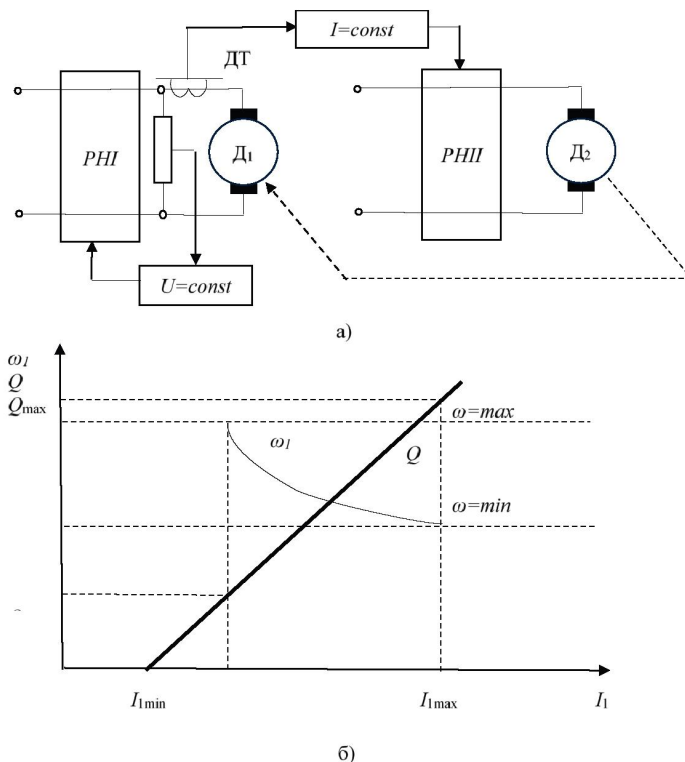
$$I_{1min} \leq I_1 \leq I_{1max}, \tag{11}$$

Если отношение максимальной производительности Q_{max} (рисунок 3б) к минимальной Q_{min} будет меньше заданной для рабочих органов кормораздатчика величины, необходимо изменить уставку по напряжению (рисунок 3а) и переходить на новую скоростную характеристику. Причем график зависимости Q от тока I_1 (рисунок 3б) изменится, поскольку изменилось напряжение U_1 (8).

Если двигатель D_1 имеет независимое возбуждение с устройством стабилизации потока $\Phi_1 = const$, то поведение схемы (рисунок 3а) аналогично поведению схемы (рисунок 2а). Если поток возбуждения Φ_1 не будет стабилизирован, то возможно смещение механической характеристики двигателя D_1 и появление погрешности ΔQ , которая определится из выражения (8) и уравнения скоростной характеристики двигателя D_1

$$\Delta Q = M_{01} \frac{\omega_1}{k_0} \times \frac{\delta\Phi}{1 - \delta\Phi}, \tag{12}$$

где $\delta\Phi$ – относительное изменение потока возбуждения.



а – блок-схема; б – скоростная и регулировочная характеристики

Рисунок 3 – Система управления двухдвигательным электроприводом с обратными связями по напряжению и току

a – flow chart; b – speed and control characteristics

Figure 3 – Control system for a two-motor electric drive with close loop configuration on voltage and current

Схема рисунка 2а имеет ряд преимуществ: зависимость между производительностью Q и током двигателя D_1 близка к линейной, двигатель привода битеров D_1 может быть принят последовательного возбуждения, что существенно при импульсном регулировании двигателя. К недостаткам схемы следует отнести некоторое усложнение привода из-за установки тахогенератора.

Схема рисунка 3а с двигателем независимого возбуждения и стабилизированным потоком возбуждения имеет линейную зависимость между током двигателя D_1 и производительностью. Отсутствие тахогенератора упрощает привод и повышает его надежность. Однако специфика работы двигателя при питании от аккумуляторной батареи и стабилизация потока возбуждения требует, как правило, переделки цепи возбуждения двигателя. К достоинствам схемы рисунка 3а с двигателем D_1 последовательного возбуждения следует отнести возможность использования серийных электродвигателей машин напольного транспорта.

В автоматизированном однодвигательном приводе (рисунок 1б) режим постоянства полной мощности может быть обеспечен стабилизацией напряжения U_1 и тока I_1 двигателя (рисунок 4а). Напряжение поддерживается постоянным с помощью отрицательной обратной связи. Благодаря отрицательной обратной связи по току, регулятор

РП изменяет поток возбуждения двигателя и его скорость, а следовательно, подачу корма на битеры. При этом ток двигателя и производительность рабочих органов остаются постоянными. На скоростной диапазон двигателя в этом случае также необходимо наложить ограничение (10) (рисунок 4б).

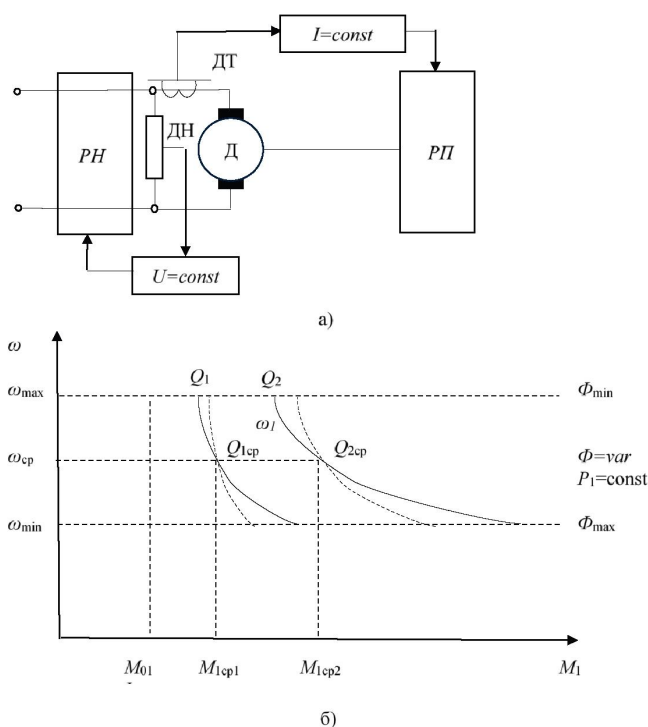
Из выражения (4), пренебрегая потерями в меди якорной цепи двигателя, получим:

$$Q = M_1 \frac{\omega_1}{k_0} - M_{01} \frac{\omega_1}{k_0}. \quad (13)$$

Схема рисунка 4а поддерживает постоянным произведение $U_1 \cdot I_1$, или, пренебрегая потерями в меди якорной цепи, произведение $M_1 \cdot \omega_1$. Из-за изменения скорости ω_1 в однодвигательном приводе появляется ошибка стабилизации производительности, вызванная тем, что поддерживается постоянной электромагнитная мощность двигателя, а не полезная (1). При среднем значении скорости ω_{1cp}

$$Q_{cp} = M_{1cp} \frac{\omega_{1cp}}{k_0} - M_{01} \frac{\omega_{1cp}}{k_0}, \quad (14)$$

где Q_{cp} , M_{1cp} – значения производительности и электромагнитного момента, соответствующие средней скорости ω_{1cp} .



а – блок-схема; б – механические характеристики

Рисунок 4 – Система управления однодвигательным электроприводом с обратными связями по напряжению и току

a – flow chart; b – mechanical characteristics

Figure 4 – Control system for a single-motor electric drive with close loop configuration on voltage and current

Момент холостого хода M_{01} в определенном скоростном диапазоне можно принять постоянным [10]

$$M_{01} = const. \tag{15}$$

Вычитая из (14) выражение (13) с учетом постоянства электромагнитной мощности двигателя, получим

$$\Delta Q = -M_{01} \frac{\Delta \omega_1}{k_0}, \tag{16}$$

где ΔQ – абсолютная ошибка стабилизации Q , $\Delta \omega$ – абсолютное изменение скорости ω_1 .

После деления (16) на (14) получим относительную ошибку стабилизации производительности

$$\delta Q = -\frac{M_{01}}{M_1 - M_{01}} \delta \omega_1, \tag{17}$$

где $\delta \omega_1$ – относительное изменение скорости ω_1 .

Пунктирной линией на рисунке 4б показаны гиперболы, соответствующие постоянству полезной мощности и отсутствию ошибки стабилизации производительности.

Полезный момент при однодвигательном приводе рабочих органов не зависит от скорости двигателя, а определяется только характеристиками корма [13; 14]. С учетом (15) электромагнитный момент двигателя D_1 также не будет зависеть от скорости. Поэтому для перехода с одной характеристики (рисунок 4б) на другую при изменении производительности необходимо менять соотношение скорости битеров и продольного транспортера, т. е. иметь редуктор P (рисунок 1б) с переменным передаточным отношением.

Режим постоянства полной мощности двигателя может быть достигнут и при регулировании напряжения в функции тока с помощью логарифмических блоков нелинейности (рисунок 5). Закон

регулирования напряжения может быть получен из (6) путем несложных преобразований

$$U_1 = Ae^{C-\ln I_1}. \tag{18}$$

Производительность рабочих органов определяется выражением (4) и регулируется изменением уставки C . В этом случае также появляется ошибка стабилизации производительности (16), (17), так как постоянной поддерживается полная, а не полезная мощность. При регулировании производительности необходимо менять передаточное отношение редуктора P (рисунок 1б), так как и в этом случае момент двигателя D_1 не зависит от скорости.

Результаты исследований и их обсуждение. Точность стабилизации производительности при двухдвигательном автоматизированном электроприводе рабочих органов (рисунок 2а, 3а) определяется статизмом характеристик замкнутых систем. При заданных значениях скорости $\omega_{1зад}$ и момента $M_{1зад}$ из (3) для схемы рисунка 2а получим

$$k_0 Q_{зад} = M_{1зад} \omega_{1зад} - M_{01} \omega_{1зад}, \tag{19}$$

где $Q_{зад}$ – заданная производительность.

Вследствие статических ошибок в контурах обратных связей по скорости и моменту с учетом (15) формула (19) примет вид:

$$k_0(Q_{зад} + \Delta Q) = (M_{1зад} + \Delta M_1)(\omega_{1зад} + \Delta \omega_1) - M_{01}(\omega_{1зад} + \Delta \omega_1), \tag{20}$$

где ΔQ ; ΔM ; $\Delta \omega_1$ – абсолютные отклонения производительности, момента и скорости от заданных значений.

Раскрывая скобки и вычитая из (20) выражения (19), получим

$$k_0 \Delta Q = M_{1зад} \Delta \omega_1 + \Delta M_1 \omega_{1зад} + \Delta M_1 \Delta \omega_1 - M_{01} \Delta \omega_1. \tag{21}$$

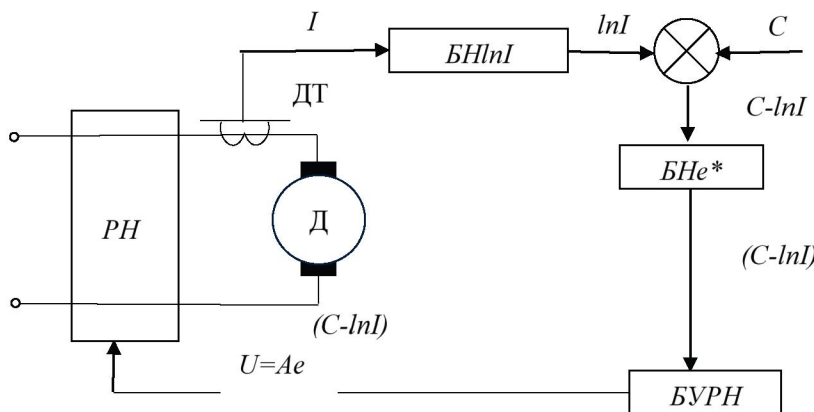


Рисунок 5 – Блок-схема системы управления однодвигательным электроприводом при управлении напряжением в функции тока

Figure 5 – Flow chart of a single-motor electric drive control system for voltage control as a function of current

После деления на (19) выражение (21) примет вид

$$\frac{\Delta Q}{Q_{\text{зад}}} = \frac{M_{1\text{зад}}\Delta\omega_1 + \Delta M_1\omega_{1\text{зад}} + \Delta M_1\Delta\omega_1 - M_{01}\omega_1}{M_{1\text{зад}}\omega_{1\text{зад}} - M_{01}\omega_{1\text{зад}}}. \quad (22)$$

Поделив числитель и знаменатель выражения (22) на $M_{1\text{зад}} \cdot \omega_{1\text{зад}}$, получим

$$\delta Q = \frac{\delta\omega_1 + \delta M_1 + \delta M_1\delta\omega_1 - \frac{M_{01}}{M_{1\text{зад}}}\delta\omega_1}{1 - \frac{M_{01}}{M_{1\text{зад}}}}. \quad (23)$$

$$\text{Здесь } \delta Q = \frac{\Delta Q}{Q_{\text{зад}}}, \delta M_1 = \frac{\Delta M_1}{M_{1\text{зад}}}, \delta\omega_1 = \frac{\Delta\omega_1}{\omega_{1\text{зад}}} -$$

относительные ошибки стабилизации производительности, момента и скорости. Пренебрегая членом второго порядка малости $\delta M_1 \cdot \delta\omega_1$, после несложных преобразований получим

$$\delta Q = \delta\omega_1 + \frac{\delta M_1}{1 - \frac{M_{01}}{M_{1\text{зад}}}}. \quad (24)$$

Для схемы рисунка 3а, пренебрегая потерями в меди якорной цепи, из формулы (4) для заданных значений напряжения $U_{1\text{зад}}$ и тока $I_{1\text{зад}}$ получим

$$k_0 Q_{\text{зад}} = U_{1\text{зад}} I_{1\text{зад}} - M_{01} \frac{U_{1\text{зад}}}{k_1 \Phi_1}, \quad (25)$$

где $Q_{\text{зад}}$ – заданная производительность;
 k_1 – конструктивный коэффициент двигателя D_1 .

Вследствие статических ошибок в контурах обратных связей по напряжению и току формула (25) с учетом (15) примет вид:

$$k_0(Q_{\text{зад}} + \Delta Q) = (U_{1\text{зад}} + \Delta U_1)(I_{1\text{зад}} + \Delta I_1) - M_{01}\beta_1(U_{1\text{зад}} + \Delta U_1). \quad (26)$$

Здесь ΔQ , ΔU_1 , ΔI_1 – абсолютные отклонения производительности, напряжения и тока от задан-

ных значений. Изменением $\beta_1 = \frac{1}{k_1 \Phi_1}$ пренебрегаем.

Раскрывая скобки и вычитая из (26) выражение (25), получим

$$k_0\Delta Q = U_{1\text{зад}}\Delta I_1 + I_{1\text{зад}}\Delta U_1 + \Delta U_1\Delta I_1 - M_{01}\beta_1\Delta U_1. \quad (27)$$

После деления на (25) выражение (27) примет вид

$$\frac{\Delta Q}{Q_{\text{зад}}} = \frac{U_{1\text{зад}}\Delta I_1 + I_{1\text{зад}}\Delta U_1 + \Delta U_1\Delta I_1 - M_{01}\beta_1\Delta U_1}{U_{1\text{зад}}I_{1\text{зад}} - M_{01}\beta_1U_{1\text{зад}}}. \quad (28)$$

Поделив числитель и знаменатель правой части выражения (28) на $U_{1\text{зад}} \cdot I_{1\text{зад}}$, получим

$$\delta Q = \frac{\delta I_1 + \delta U_1 + \delta I_1\delta U_1 - \frac{M_{01}\beta_1}{I_{1\text{зад}}}\delta U_1}{1 - \frac{M_{01}\beta_1}{I_{1\text{зад}}}}. \quad (29)$$

$$\text{Здесь } \delta Q = \frac{\Delta Q}{Q_{\text{зад}}}; \delta I_1 = \frac{\Delta I_1}{I_{1\text{зад}}}; \delta U_1 = \frac{\Delta U_1}{U_{1\text{зад}}} -$$

относительные ошибки стабилизации производительности, тока и напряжения. Пренебрегая членом второго порядка малости $\delta U_1 \cdot \delta I_1$, после несложных преобразований получим

$$\delta Q = \delta U_1 + \frac{\delta I_1}{1 - \frac{M_{01}\beta_1}{I_{1\text{зад}}}}. \quad (30)$$

Как видно из выражений (24) и (30), относительная ошибка стабилизации производительности при двухдвигательном автоматизированном электроприводе рабочих органов определяется относительными ошибками стабилизации момента и скорости (рисунок 2а) или тока и напряжения (рисунок 3а) и существенно зависит от нагрузочного диапазона двигателя D_1 .

Для определения статических ошибок в контурах обратной связи по моменту и скорости, напряжению и току составим систему уравнений, описывающую поведение двухдвигательного автоматизированного электропривода рабочих органов (рисунок 2а, 3а). При выводе уравнений сделаны следующие допущения: пренебрегаем пульсациями тока, напряжения и скорости двигателей и оперируем их средними значениями; считаем, что электромеханические постоянные времени приводов много больше электромагнитных постоянных двигателей; принят пропорциональный закон регулирования.

$$M_1 = M_{01} + k_0 F \frac{v_k}{\omega_1} + J_1 \frac{d\omega_1}{dt}, \quad (31)$$

$$F = h \times B \times \rho, \quad (32)$$

$$I_1 = \beta_1 \times M_1, \quad (33)$$

$$\Phi_1 = \alpha_1 \cdot I_1, \quad (34)$$

$$U_1 = k_{\text{п1}}(U_{\text{вх1}} - \gamma_1 k_{\text{т1}} \omega_1) - I_1 r_{\text{п1}}, \quad (35)$$

$$U'_1 = k'_{\text{п1}}(U'_{\text{вх1}} - \gamma'_1 U_1) - I_1 r'_{\text{п1}}, \quad (35')$$

$$\omega_1 = U_1 \beta_1 - I_1 r_1 \beta_1, \quad (36)$$

$$U_2 = k_{\text{п2}}(U_{\text{вх2}} - \gamma_2 k_1 I_1) - I_2 r_{\text{п2}}, \quad (37)$$

$$M_2 = M_{02} + k_3 P(t) + J_2 \frac{d\omega_2}{dt} + J'_2(t) \frac{d\omega_2}{dt}, \quad (38)$$

$$M_{02} = f(\omega_2), \quad (39)$$

$$I_2 = \beta_2 M_2, \quad (40)$$

$$\omega_2 = U_2 \beta_2 - I_2 r_2 \beta_2, \quad (41)$$

$$v_k = k_4 i_2 \omega_2 - c(t) \frac{dv_k}{dt}, \quad (42)$$

$$Q = v_k \times F, \quad (43)$$

где F – возмущающее воздействие;

v_k – средняя скорость корма в плоскости съема;

J_1 – приведенный к валу двигателя D_1 момент инерции привода;

h, B, ρ – средняя ширина, высота и плотность корма в плоскости съема;

$\beta_1 = \frac{1}{k_1 \Phi_1}$ – переменный для двигателя

последовательного возбуждения коэффициент пропорциональности между электромагнитным моментом и током двигателя D_1 ;

α_1 – переменный, для двигателя последовательного возбуждения, коэффициент пропорциональности между током и потоком возбуждения;

$\gamma_1, k'_{п1}, U'_{вх1}, r'_{п1}$ – коэффициент обратной связи по напряжению, коэффициент усиления по напряжению, входное напряжение и выходное сопротивление преобразователя РНІ (рисунок 3а);

$\gamma_1, k_{п1}, U_{вх1}, r_{п1}$ – коэффициент обратной связи по скорости, коэффициент усиления по напряжению, входное напряжение и выходное сопротивление преобразователя РНІ (рисунок 2а);

$k_{тг}$ – передаточный коэффициент тахогенератора ТГ (рисунок 2а);

$r_1 = r_{д1} + r_{п1}$ – суммарное сопротивление двигателя D_1 и преобразователя РНІ;

U_2, I_2, M_2, ω_2 – напряжение, ток, электромагнитный момент и угловая скорость двигателя D_2 ;

$\gamma_2, k_{п2}, U_{вх2}, r_{п2}$ – коэффициент обратной связи по току, коэффициент усиления преобразователя РНІІ по напряжению, входное напряжение и выходное сопротивление преобразователя РНІІ (рисунок 2а, 3а);

k_1 – передаточный коэффициент датчика тока ДТ (рисунок 2а, 3а);

M_{02} – момент холостого хода привода продольного транспортера;

$k_3 P(t)$ – полезный момент, обусловленный перемещением корма, вес которого P изменяется со временем;

J_2 – приведенный к валу двигателя D_2 момент инерции привода;

$J_2(t)$ – переменный момент инерции, обусловленный находящимся в бункере кормом;

$\beta_2 = \frac{1}{k_2 \Phi_2}$ – переменный, для двигателя

последовательного возбуждения, коэффициент пропорциональности между электромагнитным моментом и током двигателя D_2 ;

k_2, Φ_2 – конструктивный коэффициент и поток возбуждения двигателя D_2 ;

$r_2 = r_{д2} + r_{п2}$ – суммарное сопротивление двигателя D_2 и преобразователя РНІІ;

k_4 – переменный коэффициент, учитывающий проскальзывание корма по продольному транспортеру;

i_2 – передаточное число передачи между валом двигателя D_2 и валом продольного транспортера;

$c(t)$ – коэффициент, учитывающий упругие свойства корма.

Полученная система уравнений позволяет определить статические ошибки в контурах обратных связей двухдвигательного автоматизированного электропривода. Из выражения (35') получим статическую нагрузочную характеристику преобразователя РНІ (рисунок 3а)

$$U_1 = \frac{k'_{п1} U'_{вх1} - I_1 r'_{п1}}{1 + \gamma'_1 k'_{п1}} \quad (44)$$

и относительную ошибку стабилизации напряжения двигателя D_1 в схеме рисунка 3а

$$\delta U_1 = \frac{I_1 r'_{п1} - I'_1 r'_{п1}}{k'_{п1} U'_{вх1} - I'_1 r'_{п1}}, \quad (45)$$

где I'_1 – некоторое значение тока I_1 при котором определяется заданное напряжение U_1 .

Заменив в (36) U_1 на выражение (35) и решив полученное выражение относительно ω_1 , получим уравнение скоростной характеристики двигателя D_1 для схемы рисунка 2,а

$$\omega_1 = \frac{k_{п1} U_{вх1} - I_1 r_1}{k_1 \alpha_1 I_1 + k_{п1} k_{тг} \gamma_1}. \quad (46)$$

Относительная ошибка стабилизации скорости

$$\delta \omega_1 = 1 - \frac{(k_{п1} U_{вх1} - I_1 r_1)(k_1 \alpha'_1 I'_1 + k_{п1} k_{тг} \gamma_1)}{(k_1 \alpha_1 I_1 + k_{п1} k_{тг} \gamma_1)(k_{п1} U_{вх1} - I'_1 r_1)}, \quad (47)$$

где α'_1, I'_1 – некоторые значения коэффициента α_1 и тока I_1 , при которых определяется заданная скорость ω_1 .

Для контура обратной связи по току (рисунок 3 а) из выражений (31), (33), (37), (40), (41) и (42) получим

$$I_1 = \frac{\beta_1 M_{01} + k_0 k_4 i_2 k_{п2} U_{вх2} \beta_1 \beta_2 \frac{F}{\omega_1} - k_0 k_4 i_2 \beta_1 \beta_2 I_2 r_2 \frac{F}{\omega_1}}{1 + k_0 k_4 i_2 k_{п2} \gamma_2 \beta_1 \beta_2 \frac{F}{\omega_1}}. \quad (48)$$

Из выражения (48), пренебрегая потерями в меди якорной цепи двигателя D_2 , получим выражение относительной ошибки стабилизации тока

$$\delta I_1 = 1 - \frac{\left(\beta_1 M_{01} + k_0 k_4 i_2 k_{п2} U_{вх2} \beta_1 \beta_2 \frac{F}{\omega_1} \right) \left(1 + k_0 k_4 i_2 k_{п2} \gamma_2 \beta_1 \beta'_2 \frac{F'}{\omega_1} \right)}{\left(1 + k_0 k_4 i_2 k_{п2} \gamma_2 \beta_1 \beta_2 \frac{F}{\omega_1} \right) \left(\beta_1 M_{01} + k_0 k_4 i_2 k_{п2} U_{вх2} \beta_1 \beta'_2 \frac{F'}{\omega_1} \right)}, \quad (49)$$

где β'_2 и F' – некоторые значения коэффициента β_2 и линейной плотности призмы корма F , при которых определяется заданный ток.

Из выражения (48) с учетом (33) получим

$$M_1 = \frac{M_{01} + k_0 k_4 i_2 k_{п2} U_{вх2} \beta_2 \frac{F}{\omega_1} - k_0 k_4 i_2 \beta_2 I_2 r_2 \frac{F}{\omega_1}}{1 + k_0 k_4 i_2 k_{п2} \gamma_2 \beta_1 \beta_2 \frac{F}{\omega_1}}. \quad (50)$$

Пренебрегая потерями в меди якорной цепи двигателя D_2 , получим относительную ошибку стабилизации момента M_1 .

$$\delta M_1 = 1 - \frac{\left(M_{01} + k_0 k_4 i_2 k_{п2} U_{вх2} \beta_2 \frac{F}{\omega_1} \right) \left(1 + k_0 k_4 i_2 k_{п2} \gamma_2 \beta_1 \beta'_2 \frac{F'}{\omega_1} \right)}{\left(1 + k_0 k_4 i_2 k_{п2} \gamma_2 \beta_1 \beta_2 \frac{F}{\omega_1} \right) \left(M_{01} + k_0 k_4 i_2 k_{п2} U_{вх2} \beta'_2 \frac{F'}{\omega_1} \right)}. \quad (51)$$

Заключение. Как показывает анализ, однодвигательный автоматизированный привод рабочих органов имеет ряд существенных недостатков: усложнение кинематической схемы из-за установки редуктора с переменным передаточным отношением, сложность регулирования производительности, высокая погрешность δQ за счет значительного изменения скорости ω_1 (16), (17).

Проведенный анализ, показывает, что на кормораздатчике для привода рабочих органов более целесообразен автоматизированный двухдвигательный электропривод: один двигатель на привод продольного транспортера и битеров, другой – на привод поперечного транспортера.

Полученные выражения (45), (47), (49), (51) с учетом (24) и (30) позволяют по заданной статической ошибке δQ определить параметры систем регулирования автоматизированного двухдвигательного электропривода рабочих органов кормораздатчика, и наоборот, по параметрам автоматизированного электропривода определить величину статической ошибки δQ .

Проведенные теоретические исследования носят предварительный характер, требующий экспериментального подтверждения, что заложено на перспективу.

Список источников

1. Сидорова В.Ю., Петров Е.Б., Карпов В.П. Анализ технико-технологических характеристик кормораздатчиков для мясного скотоводства // Техника и технологии в животноводстве. 2020. № 3 (39). С. 36-40. EDN: VGIPXA.
2. Обоснование параметров процессов приготовления и раздачи кормовых смесей свиноматкам / Л.Г. Крючкова [и др.] // Вестник КрасГАУ. 2017. № 5 (128). С. 58-66. EDN: ZDBAKZ.
3. Иванов Ю.А. Результаты научных исследований по механизации и автоматизации животноводства // Техника и технологии в животноводстве. 2021. № 1 (41). С. 4-11. DOI: 10.51794/27132064-2021-1-4. EDN: JYGGCD.
4. Михайличенко С.М., Купреенко А.И. Автоматизация процессов приготовления и раздачи рационов кормления на фермах КРС // Техника и технологии в животноводстве. 2023. № 1 (49). С. 11-19. DOI: 10.22314/27132064-2023-1-11. EDN: IERSCV.
5. Обоснование параметров процессов приготовления и раздачи кормовых смесей свиноматкам / Л.Г. Крючкова [и др.] // Вестник КрасГАУ. 2017. № 5 (128). С. 58-66. EDN: ZDBAKZ.
6. Китун А.В., Бондарев С.Н., Швед И.М. Формирование поточных техно-

логических линий транспортировки и раздачи кормов животным // Техника и технологии в животноводстве. 2023. № 2 (50). С. 69-74. DOI: 10.22314/27132064-2023-2-69. EDN: SOEQSU.

7. Карпов В.П. Система пневматической самозагрузки раздатчика кормов // Техника и технологии в животноводстве. 2021. № 1 (41). С. 22-26. DOI: 10.51794/27132064-2021-1-22. EDN: SMZUDE.

8. Системы позиционирования роботизированных кормораздатчиков для обслуживания животных на фермах КРС / С.М. Михайличенко [и др.] // Техника и технологии в животноводстве. 2023. № 3 (51). С. 4-10. DOI: 10.22314/27132064-2023-3-4. EDN: FOCZSQ.

9. Лицин К.В., Цуканов А.В. Разработка автоматизированного электропривода системы управления двухкоординатным станком сварки // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 5. С. 382-388. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-5-382-388. EDN: FNSNDR.

10. Цуканов А.В., Лицин К.В. Разработка автоматизированной системы управления электроприводом барабана молотки // Металлург. 2024. № 1. С. 95-99. DOI: 10.52351/00260827_2024_1_95. EDN: OJYVBJ.

11. Резник Е.И., Карташов С.Г., Еремченко В.И. Выбор технологических линий подготовки и раздачи рулонированных кормов // Тракторы и сельхозмашины. 2015. № 6. С. 42-44. EDN: ТХОУВН.

12. Михайличенко С.М. Система кормления крупного рогатого скота на базе колесного роботизированного кормораздатчика // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90. № 1. С. 82-90. DOI: 10.17816/0321-4443-120003. EDN: NCJSXR.

13. The grain parameters determination based on elements of the elasticity theory / V.V. Trotsenko [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. P. 012065. DOI: 10.1088/1755-1315/659/1/012065. EDN: FTIRAV.

14. Improving the efficiency of gravity devices for grain transport / V.V. Trotsenko [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. P. 012125. DOI: 10.1088/1755-1315/624/1/012125. EDN: WHPZHC.

15. Volyanskaya Y.B., Volyanskiy S.M., Onischenko O.A. Brushless valve electric drive with minimum equipment excess for autonomous floating vehicle // Электротехника и электромеханика. 2017. № 4. С. 26-33. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.4.05. EDN: ZCRECJ.

References

1. Sidorova V.Yu., Petrov E.B., Karpov V.P. Analiz tekhniko-tekhnologicheskikh kharakteristik kormorazdatchikov dlya myasnogo skotovodstva [Analysis of technical and technological characteristics of feed dispensers for beef cattle farming]. *Machinery and technologies in livestock*. 2020; 3(39): 36-40. EDN: VGIPXA. (In Russ).

2. Kryuchkova L.G. [et al.] Obosnovanie parametrov protsessov prigotovleniya i razdachi kormovykh smesei svinomatkam [Justification of the parameters of the processes of preparation and distribution of feed mixtures to sows]. *The Bulletin of KrasGAU*. 2017; 5(128): 58-66. EDN: ZDBAKZ. (In Russ).

3. Ivanov Yu.A. Rezul'taty nauchnykh issledovaniy po mekhanizatsii i avtomatizatsii zhivotnovodstva [Results of scientific research on the mechanization and automation of animal husbandry]. *Machinery and technologies in livestock*. 2021; 1(41): 4-11. DOI: 10.51794/27132064-2021-1-4. EDN: JYGGCD. (In Russ).

4. Mikhailichenko S.M., Kupreenko A.I. Avtomatizatsiya protsessov prigotovleniya i razdachi ratsionov kormleniya na fermakh KRS [Automation of processes for preparing and distributing feed rations on cattle farms]. *Machinery and technologies in livestock*. 2023; 1(49): 11-19. DOI: 10.22314/27132064-2023-1-11. EDN: IERSCV. (In Russ).

5. Kryuchkova L.G. [et al.] Obosnovanie parametrov protsessov prigotovleniya i razdachi kormovykh smesei svinomatkam [Justification of the parameters of the processes of preparation and distribution of feed mixtures to sows]. *The Bulletin of KrasGAU*. 2017; 5(128): 58-66. EDN: ZDBAKZ. (In Russ).

6. Kitun A.V., Bondarev S.N., Shved I.M. Formirovanie potochnykh tekhnologicheskikh linii transportirovki i razdachi kormov zhivotnym [Formation of flow technological lines for transportation and distribution of feed to animals]. *Machinery and technologies in livestock*. 2023; 2(50): 69-74. DOI: 10.22314/27132064-2023-2-69. EDN: SOEQSU. (In Russ).

7. Karpov V.P. Sistema pnevmaticheskoi samozagruzki razdatchika kormov [Pneumatic self-loading system for feed distributor]. *Machinery and technologies in livestock*. 2021; 1(41): 22-26. DOI: 10.51794/27132064-2021-1-22. EDN: SMZUDE. (In Russ).

8. Mikhailichenko S.M. [et al.] Sistemy pozitsionirovaniya robotizirovannykh kormorazdatchikov dlya obsluzhivaniya zhivotnykh na fermakh KRS [Positioning systems for robotic feed dispensers for servicing animals on cattle farms]. *Machinery and*

technologies in livestock. 2023; 3(51): 4-10. DOI: 10.22314/27132064-2023-3-4. EDN: FOCZSQ. (In Russ).

9. Litsin K.V., Tsukanov A.V. Razrabotka avtomatizirovannogo ehlektroprivoda sistemy upravleniya dvukhkoordinatnym stankom svarki [Development of an automated electric drive for a control system for a two-coordinate welding machine]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya*. 2021; 64(5): 382-388. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-5-382-388. EDN: FNSNDR. (In Russ).

10. Tsukanov A.V., Litsin K.V. Razrabotka avtomatizirovannoi sistemy upravleniya ehlektroprivodom barabana motalki [Development of an automated control system for the electric drive of a winder drum]. *Metallurg*. 2024; (1): 95-99. DOI: 10.52351/00260827_2024_1_95. EDN: OJYVBJ. (In Russ).

11. Reznik E.I., Kartashov S.G., Eremchenko V.I. Vybor tekhnologicheskikh liniy podgotovki i razdachi rulonirovannykh kormov [Selection of technological lines for the preparation and distribution of rolled feed]. *Tractors and agricultural machinery*. 2015; (6): 42-44. EDN: TXOYBN. (In Russ).

12. Mikhailichenko S.M. Sistema kormleniya krupnogo rogatogo skota na baze kolesnogo robotizirovannogo kormorazdatchika [Cattle feeding system based on a wheeled robotic feeder]. *Tractors and agricultural machinery*. 2023; 90(1): 82-90. DOI: 10.17816/0321-4443-120003. EDN: NCJSXR. (In Russ).

13. Trotsenko V.V. [et al.] The grain parameters determination based on elements of the elasticity theory. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021: 012065. DOI: 10.1088/1755-1315/659/1/012065. EDN: FTIRAV.

14. Trotsenko V.V. [et al.] Improving the efficiency of gravity devices for grain transport. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021: 012125. DOI: 10.1088/1755-1315/624/1/012125. EDN: WHPZHC.

15. Volyanskaya Y.B., Volyanskiy S.M., Onischenko O.A. Brushless valve electric drive with minimum equipment excess for autonomous floating vehicle. *Ehlektrotehnika i ehlektromekhanika*. 2017; (4): 26-33. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.4.05. EDN: ZCRECJ. (In Russ).

ВКЛАД АВТОРОВ

Троценко В.В. – концепция проведения исследования; составление методики эксперимента; разработка математических операций; обработка материала; написание статьи; научное редактирование текста.

Троценко И.В. – написание и редактирование текста.

Епифанов А.П. – общее руководство; итоговые выводы.

AUTHOR CONTRIBUTION

Trotsenko, V.V. – research concept; development of experimental methodology; development of mathematical operations; material processing; writing an article; scientific text editing.

Trotsenko, I.V. – writing and editing text.

Epifanov, A.P. – general guidance; final conclusions.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that there is no conflict of interest.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS

There are no human or animal studies in the work.

Информация об авторах

В.В. Троценко – кандидат технических наук, доцент; AuthorID 454365.

И.В. Троценко – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; AuthorID 454370.

А.П. Епифанов – доктор технических наук, профессор; AuthorID 803435.

Information about the author

V.V. Trotsenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; AuthorID 454365.

I.V. Trotsenko – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor; AuthorID 454370.

A.P. Epifanov – Doctor of Technical Sciences, Professor; AuthorID 803435.

Статья поступила в редакцию 10.02.2026; одобрена после рецензирования 13.02.2026; принята к публикации 20.03.2026.

The article was submitted 10.02.2026; approved after reviewing 13.02.2026; accepted for publication 20.03.2026.