

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 621.9Т

А.А. Багаев, Р.С. Чернусь
A.A. Bagayev, R.S. Chernus

ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ЦЕНТРОБЕЖНОГО РАСХОДОМЕРА СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ КАК СРЕДСТВО РАСШИРЕНИЯ ДИАПАЗОНА ИЗМЕРЕНИЯ

FREQUENCY-CONTROLLED ELECTRIC DRIVE OF A CENTRIFUGAL FLOWMETER OF LOOSE MATERIALS AS A MEANS OF EXTENDING THE MEASURING RANGE

Ключевые слова: электропривод, частотное регулирование, диапазон измерения, асинхронный электродвигатель, расход, момент, погрешность.

Предварительными исследованиями установлено, что для уменьшения погрешности измерения расхода с помощью разработанного центробежного расходомера и расширения диапазона измерения целесообразно уменьшать угловую скорость рабочего органа расходомера, приводя ее в соответствие с величиной требуемого измерения расхода. Масса прошедшего через расходомер сыпучего продукта определяется двумя способами: весовым методом и предлагаемым с использованием аналого-цифрового преобразователя и программного обеспечения LabVIEW регистрирующего ток статора приводного асинхронного двигателя в зависимости от нагрузки на валу с последующей оценкой погрешности результата измерения. С уменьшением частоты напряжения питающей сети диапазон измерения сыпучего материала расширяется в сторону увеличения. Частотно-регулируемый привод рабочего органа центробежного расходомера сыпучих материалов является эффективным средством расширения диапазона измерения с погрешностью результата измерения, не превышающей 3% при расходе, соответствующем номинальному току асинхронного двигателя на соответствующей частоте. Для исследованного двигателя АИР56В4 исходя из необходимости выполнения условия исключения травмирования зерна (линейная скорость крыльчатки должна быть менее 20 м/с, угловая скорость не должна превышать 157 рад/с), не может быть применено повышение частоты для уменьшения измеряемого расхода. Результаты

исследования могут быть распространены и на область меньших расходов (по сравнению с номинальным расходом на стандартной частоте напряжения), измеряемых на частотах, превышающих 50 Гц. Для этого номинальная частота двигателя расходомера должна быть менее 1500 об/мин. с целью перспективного ее повышения.

Keywords: electric drive, frequency control, measuring range, asynchronous electric motor, flow, torque, error.

The preliminary studies have found that in order to reduce the error of flow measurement using the developed centrifugal flowmeter and expand the range of measurements it is advisable to reduce the angular velocity of the working body of the flowmeter bringing it in line with the value of the required flow rate measurement. The weight of the bulk product that has passed through the flowmeter is determined in two ways: by the weight method and proposed method by using the analog-to-digital converter and the LabVIEW software registering the current of the stator of the drive asynchronous motor depending on the load on the shaft with the subsequent assessment of the measurement result error. As the supply voltage frequency decreases, the measurement range of the loose material expands increasingly. Frequency-controlled drive of the working body of the centrifugal flowmeter of loose materials is an effective means of extending the measurement range with an error not exceeding 3% at a flow rate corresponding to the rated current of the asynchronous motor at the appropriate frequency. For the studied motor AIR56V4, based on the need to fulfill the condition of excluding grain damage (the linear speed of the impeller should be less than 20 m s, the angular velocity

should not exceed 157 rad/s), frequency increase cannot be used to reduce the measured flow. The research findings may be extended to the area of lower flows (compared to the nominal flow rate at the standard voltage frequency) meas-

ured at frequencies exceeding 50 Hz. To do this, the nominal frequency of the flowmeter motor should be less than 1500 rpm in order to increase it in the future.

Багаев Андрей Алексеевич, д.т.н., проф., Алтайский государственный аграрный университет. E-mail: Bagayev710@mail.ru.

Чернусь Роман Сергеевич, к.т.н., ст. преп., Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 62-84-49. E-mail: Chernus.Roman@mail.ru.

Bagayev Andrey Alekseyevich, Dr. Tech. Sci., Prof., Altai State Agricultural University. E-mail: bagayev710@mail.ru.

Chernus Roman Sergeevich, Cand. Tech. Sci., Asst. Prof., Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 62-84-49. E-mail: Chernus.Roman@mail.ru.

Введение

Преимущества, устройство и научные аспекты функционирования центробежных расходомеров сыпучих материалов, выполненных на базе регулируемых двигателей постоянного и переменного тока, основные принципы и положения теории измерения расхода изложены в работах [1-12]. Измерение расхода сыпучего материала может быть реализовано либо путем измерения угловой скорости рабочего органа [13], либо путем измерения тока статора приводного асинхронного двигателя [14].

В указанных работах в процессе экспериментальных исследований использован центробежный расходомер на базе приводного асинхронного двигателя АИР56В4 мощностью 180 Вт, спроектированный и изготовленный на номинальную пропускную способность зерна, составляющую 10 т/ч.

Установлено, что погрешность измерения расхода сыпучего материала возрастает с уменьшением расхода по отношению к номинальному (расчетному) при неизменных параметрах электропривода расходомера с номинальной производительностью 10 т/ч.

В связи с этим для сохранения погрешности измерения, не превышающей 3%, необходимо разрабатывать и изготавливать новый расходомер с иной мощностью двигателя и геометрическими параметрами рабочего органа.

Однако создание большого ряда расходомеров различных по пропускной способности и точности экономически не целесообразно, так как при этом затрудняется унификация узлов и деталей, увеличивается стоимость. Выход из положе-

ния заключается в ликвидации многообразия расходомеров путем обоснованного сведения к небольшому числу избранных по определенному закону типов расходомера.

Проблему оптимизации стандартного ряда расходомеров можно решить путем изменения частоты питающего напряжения и, следовательно, угловой скорости вращения рабочего органа расходомера.

Кроме того, предварительными исследованиями [15] установлено, что для уменьшения погрешности измерения расхода с помощью разработанного центробежного расходомера и расширения диапазона измерения целесообразно уменьшать угловую скорость рабочего органа расходомера, приводя ее в соответствие с величиной требующего измерения расхода.

Целью работы является экспериментальное подтверждение возможности расширения диапазона измерения центробежного расходомера сыпучих материалов путем частотного регулирования приводного асинхронного двигателя для обеспечения минимальной погрешности измерения.

Теоретическими предпосылками для расширения диапазона измерения расхода зерна путем частотного изменения угловой скорости рабочего органа центробежного расходомера является номограмма, представленная на рисунке 1. Номограмма построена с использованием результатов исследований Всероссийского научно-исследовательского института зерна и продуктов его переработки (ВНИИЗ) и основных положений теории асинхронного электропривода.

На рисунке 1 в виде номограммы качественно объединены зависимости момента сопротивления M_C от расхода Q сыпучего материала $M_C=f(Q)$ [16], расхода сыпучего материала Q от угловой скорости рабочего органа ω $Q=f(\omega)$ [16] и механические характеристики асинхронного двигателя $M_D=f(\omega)$, где M_D – момент двигателя, ω – его угловая скорость при частотном регулировании [17, 18].

Анализ номограммы на рисунке 1 показывает, что с увеличением расхода зерна Q увеличивается момент сопротивления M_C и уменьшается угловая скорость приводного асинхронного двигателя ω . Следовательно, для уменьшения или увеличения угловой скорости приводного асинхронного двигателя ω , сопровождающегося увеличением или уменьшением расхода соответственно, целесообразно использовать частотно регулируемый асинхронный электропривод.

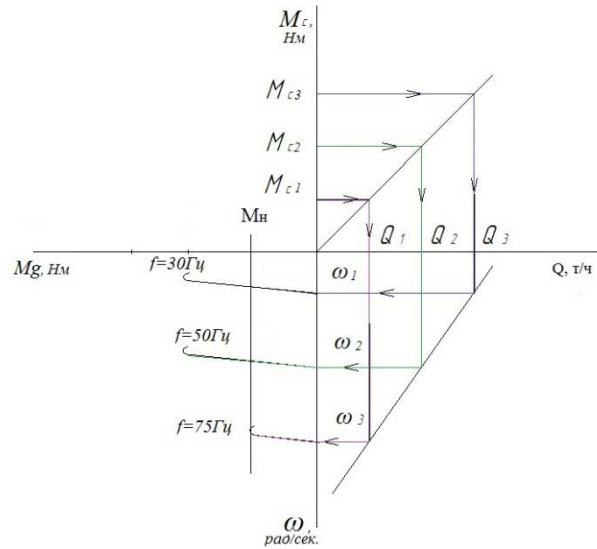


Рис. 1. Номограмма для определения частоты напряжения асинхронного электропривода центробежного расходомера зерна: 1 – $M_C=f(Q)$ [16]; 2 – $Q=f(\omega)$ [16]; 3 – $M_D=f(\omega)$ [17]

Математическая модель. В работе [15] получена математическая модель, позволяющая вычислять расход сыпучего материала Q , кг/с, через скольжение s и ток статора I_1 , А, асинхронного двигателя при частотном регулировании:

$$s_{j2} = \frac{DR_1R_2' I_1^2 - BCI_1^2 + \sqrt{(BCI_1^2 - DR_1R_2' I_1^2)^2 - (B^2 f^{-2} I_1^2 - A^2 U_{1j}^2 f^{-2} + D^2 I_1^2)(C^2 f^2 I_1^2 + R_1^2 R_2'^2 I_1^2 - U_{1j}^2 R_2'^2)}}{B^2 I_1^2 - A^2 U_{1j}^2 + D^2 f^2 I_1^2}; \quad (1)$$

$$Q = \frac{Q_{nj} (\omega_{cj} - (1-s_j)\omega_{0j})}{\omega_{cj} - \omega_{nj}} = \frac{Q_{nj} (\omega_c f - (1-s_j)\omega_0 f)}{\omega_c f - \omega_n f} = \frac{Q_{nj} (\omega_c - (1-s_j)\omega_0)}{\omega_c - \omega_n}; \quad (2)$$

$$A=X_{2н}'X_{μн}; B=R_1X_{2н}'+R_1X_{μн}; C=R_2'X_{1н}+R_2'X_{μн}; D=X_{1н}X_{2н}'+X_{1н}X_{μн}+X_{2н}'X_{μн}; \quad (3)$$

$$\omega_0=f, \omega_n=f, \omega_{cj}= \omega_n f, \omega_{cj}= \omega_c f, \quad (4)$$

где $X_{1н}$, $X_{2н}'$, $X_{μн}$, $X_{кн}$ – номинальные индуктивные сопротивление обмотки статора, ротора, контура намагничивания и короткого замыкания соответственно;

R_1 – активное сопротивление статора;

R_2' – приведенное активное сопротивление ротора;

f – относительная частота напряжения, $f_n = 50$ Гц – номинальная частота напряжения;

Q_{nj} – расход сыпучего продукта при номинальной нагрузке электродвигателя и различной частоте напряжения, определяется экспериментально, кг/с;

ω_c – скорость крыльчатки без нагрузки, рад/с;

ω_0 – синхронная угловая скорость;

$s_{нс}=(\omega_c-\omega_n)/\omega_c \neq s_{н}$ – скольжение при номинальной нагрузке относительно ω_c ;

ω_n – номинальная угловая скорость;

U_1 – фазное напряжение статора.

Экспериментальная установка. Кинематическая схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2. С использованием известных методик определены следующие параметры элементов экспериментальной установки производительностью 10 т/ч по зерну пшеницы с объемной массой $\gamma=0,75$ т/м³ и влажностью 14-16%: внешний диаметр винта $D=0,16$ м; шаг винта $b=0,16$ м; коэффициент заполнения желоба $\varphi=0,45$; частота вращения винта $n_{ш}=153,9$ об/мин.; максимально допустимая частота вращения винта $n_{ш.мах}=187,5$ об/мин., длина транспортера $L=1,2$ м; КПД передачи $\eta_{пер}=0,75$; угол наклона винтового транспортера $\alpha=0^\circ$; мощность двигателя шнека $P=188$ Вт; радиус крыльчатки $r=0,09$ м; радиус начала лопастей крыльчатки $r_1=0,04$ м; высота лопастей $h=0,03$ м; число лопастей крыльчатки $N=9$; момент инерции крыльчатки $J=0,00115$ кг·м².

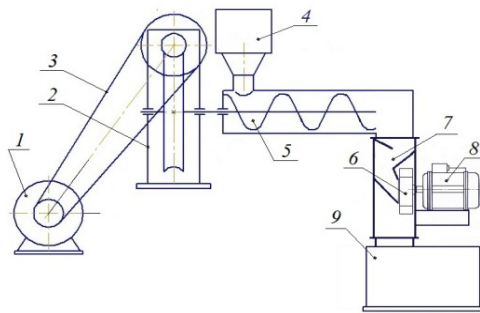


Рис. 2. Кинематическая схема экспериментальной установки:

- 1 – электродвигатель шнека;
- 2 – редуктор шнека; 3 – ременная передача;
- 4 – питающий бункер; 5 – шнек; 6 – крыльчатка;
- 7 – расходомер;
- 8 – электродвигатель расходомера; 9 – бункер

Параметры электродвигателя АИР56В4 расходомера, обеспечивающие колебательный переходный процесс, близкий к оптимальному: номинальная мощность $P_H=180$ Вт; момент инерции $J=0,00079$ кг·м²; синхронная частота вращения $n_0=1500$ об/мин.; максимальный момент $M_k=2,62$ Н·м, скольжение $s_k=0,506$, жесткость механической характеристики $\beta=0,066$, электромеханическая постоянная времени $T_m=0,0294$, электромеханическая постоянная времени $T_s=0,0126$.

В соответствии с предлагаемой математической моделью, представленной выражениями

(1)-(4), расход является функцией ряда переменных $Q = f(I_1, U_1, R_1, R'_2, X_\mu, X'_1, X'_2)$.

Электрическая схема экспериментальной установки представлена на рисунке 3.

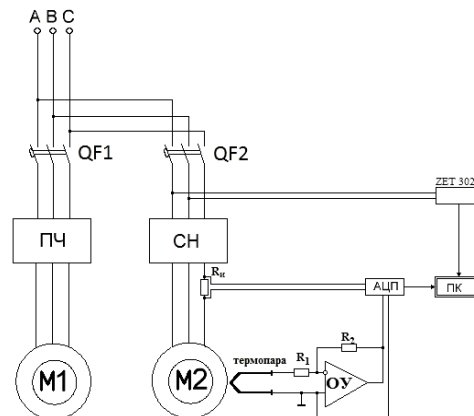


Рис. 3. Электрическая схема экспериментальной установки

Двигатель $M1$ приводит в действие шнек. Его скорость и, соответственно, производительность регулируются преобразователем частоты ПЧ1. Двигатель $M2$ выполняет функцию привода рабочего органа – крыльчатки. Для регулирования его частоты вращения применен преобразователь частоты ПЧ2.

Алгоритм определения расхода. В одной из фаз двигателя $M2$ расположен резистор, напряжение на котором пропорциональное току, измеряется и преобразуется в цифровой сигнал с помощью аналого-цифрового преобразователя L-Card E14-140. АЦП подключён к ПК, на котором, с помощью программной среды LabVIEW производится обработка сигнала с периодом квантования 0,1 с: рассчитываются действующее значение, скольжение, мгновенный расход, а также пройденное через расходомер зерно в соответствии с выражениями (1)-(4) за время, равное времени квантования аналогового сигнала конкретного АЦП с последующим алгебраическим суммированием вычисленных расходов в течение периода измерения при заданных параметрах схемы замещения асинхронного двигателя, его номинальных характеристик и известной величине номинального расхода. В этом заключается суть предлагаемого способа измерения расхода сыпучих сельскохозяйственных материалов.

Масса прошедшего через расходомер сыпучего продукта m определяется двумя способами: весовым методом и предлагаемым с использованием АЦП и программного обеспечения LabVIEW с использованием системы уравнений (1)-(4) с последующей оценкой погрешности результата измерения:

$$\delta = \frac{\Delta m}{m_0} 100\%; \quad (5)$$

$$\Delta m = m - m_0, \quad (6)$$

где m – измеренное значение массы прошедшего через расходомер сыпучего продукта, кг;

m_0 – действительное значение массы зерна, прошедшее через расходомер, кг (определяется весовым способом и является мерой или эталоном).

Результаты экспериментального определения расхода зерна при частотном регулировании сведены в таблицы 1-3.

Верхний предел расхода зерна Q в таблицах 1-3 на конкретной частоте напряжения обусловлен значением номинального тока принятого к исследованию приводного двигателя АИР56В4. Эксплуатация асинхронного двигателя при токах, превышающих номинальное значение, нежелательно.

Анализ данных таблиц 1-3 показывает, что при расчетной максимальной пропускной способности расходомера, составляющей 10 т/ч, и соответствующим этой производительности геометрическим параметрам расходомера, крыльчатки и мощности приводного двигателя наименьшая погрешность при частотном регулировании наблюдается именно при расходе зерна, близком к номинальному, и не превышает 3%. При уменьшении подачи и, соответственно, расхода погрешность возрастает.

Данный факт является подтверждением теоретических предпосылок, иллюстрируемых зависимостями на рисунке 1.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований зависимости погрешности измерения Δ от расхода зерна Q при частоте напряжения 30 Гц

№ опыта	Q, т/ч	M, кг			M _{эсп.} , кг			Δ, %		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0,5	101,2	101	100,7	70,7	69,5	71,1	12,0	11,9	12,1
2	1	100,3	100	100,5	90,5	89,8	90,1	9,8	10,2	10,3
3	2	99,9	100,5	101	96,8	103,9	98,3	8,9	9,1	9,0
4	3	98	99,1	99,5	100,7	96,5	96,5	7,8	8,2	7,9
5	4	100,2	99,3	100,3	97,5	96,9	102,9	5,7	5,4	5,6
6	5	98,9	100,3	101	100,9	97,9	103,4	3,4	3,1	3,3
7	6	100,1	100,2	100,9	102,2	98,0	99,1	3,0	3,2	3,1
8	7	99,6	99,8	99,8	97,8	101,7	101,5	2,8	3,1	2,9
9	8	99,9	100,8	100,6	101,9	99,1	102,7	2,8	2,5	2,7

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований зависимости погрешности измерения Δ от расхода зерна Q при частоте напряжения 50 Гц

№ опыта	Q, т/ч	M, кг			M _{эсп.} , кг			Δ, %		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0,5	101,2	101	100,7	70,7	69,5	71,1	10,1	9,9	10,0
2	1	100,3	100	100,5	90,5	89,8	90,1	7,8	7,2	7,4
3	2	99,9	100,5	101	96,8	103,9	98,3	4,7	4,4	4,5
4	3	98	99,1	99,5	100,7	96,5	96,5	2,9	3,3	3
5	4	100,2	99,3	100,3	97,5	96,9	102,9	2,7	2,5	2,75

Результаты экспериментальных исследований зависимости погрешности измерения Δ от расхода зерна Q при частоте напряжения 75 Гц

№ опыта	Q, т/ч	M, кг			M _{эксп} , кг			Δ, %		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0,5	101,2	101	100,7	70,7	69,5	71,1	3,5	3,7	3,7
2	1	100,3	100	100,5	90,5	89,8	90,1	3,2	2,9	3,0
3	2,5	99,9	100,5	101	96,8	103,9	98,3	2,8	2,3	2,6

Частотное регулирование позволяет расширить диапазон измерения зерна, реализуемый центробежным датчиком, спроектированным на максимальную производительность 10 т/ч, номинальный расход 4 т/ч и мощность приводного двигателя 180 Вт с номинальной частотой вращения 1480 об/мин. с 2,4 до 8,2 т/ч с погрешностью, не превышающей 3% в диапазоне частот 75-30 Гц.

Указанное подтверждает возможность частотного расширения диапазона измерения расхода зерна центробежного датчика на основе асинхронного двигателя с погрешностью не превышающей 3%.

Выводы

Установлено, что с уменьшением частоты напряжения питающей сети диапазон измерения сыпучего материала расширяется в сторону увеличения. Частотно-регулируемый привод рабочего органа центробежного расходомера сыпучих материалов является эффективным средством расширения диапазона измерения с погрешностью результата измерения, не превышающей 3% при расходе, соответствующем номинальному току асинхронного двигателя на соответствующей частоте. Для исследованного двигателя АИР56В4 $P_H=180$ Вт, $I_H=0,62$ А, $Q_H=2,7$ кг/с, $n_H=1450$ об/мин., $f_H=50$ Гц, исходя из необходимости выполнения условия исключения травмирования зерна (линейная скорость крыльчатки должна быть менее 20 м/с, угловая скорость не должна превышать 157 рад/с), не может быть применено повышение частоты для уменьшения измеряемого расхода. Вместе с тем результаты исследования могут быть распространены и на область меньших расходов (по сравнению с номинальным расходом на стандартной частоте напряжения), измеряемых на частотах, превышающих 50 Гц. Для этого но-

минальная частота двигателя расходомера должна быть менее 1500 об/мин. с целью перспективного ее повышения.

Библиографический список

- Багаев А.А., Лукьянов В.Г., Чернущь Р.С. Использование момента кориолисовых сил для измерения массового расхода потока зерна и продуктов его размола // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2008. – № 4 (42). – С. 47-49.
- Багаев А.А., Лукьянов В.Г., Чернущь Р.С. Двигатель постоянного тока как первичный преобразователь крутящего момента центробежных расходомеров сыпучих сельскохозяйственных продуктов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2008. – № 6 (44). – С. 62-65.
- Багаев А.А., Лукьянов В.Г., Чернущь Р.С. Результаты математического моделирования крутящего момента центробежного расходомера зерна и продуктов его размола // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2009. – № 6 (56). – С. 54-57.
- Багаев А.А., Лукьянов В.Г., Чернущь Р.С. Передаточная функция центробежного расходомера сыпучих сельскохозяйственных продуктов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2010. – № 1 (63). – С. 71-75.
- Багаев А.А., Чернущь Р.С. Уравнение регрессии момента сопротивления центробежного расходомера сыпучих сельскохозяйственных материалов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2010. – № 6 (68). – С. 83-87.
- Багаев А.А., Чернущь Р.С. Обоснование критерия выбора электродвигателя центробежного

расходомера сыпучих сельскохозяйственных продуктов // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2/1. – С. 188-193.

7. Багаев А.А., Чернущ Р.С. Передаточная функция момента сопротивления центробежного расходомера сыпучих сельскохозяйственных материалов при осевой загрузке // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2011. – № 10 (84). – С. 86-89.

8. Багаев А.А., Чернущ Р.С. Требования к временным характеристикам и обоснование области расположения полюсов передаточной функции центробежного расходомера сыпучих сельскохозяйственных материалов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2013. – № 10 (108). – С. 115-118.

9. Багаев А.А., Чернущ Р.С. Требования к информационной «подвижности» центробежного расходомера сыпучих сельскохозяйственных материалов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2014. – № 8 (118). – С. 105-110.

10. Багаев А.А., Чернущ Р.С. Статистические характеристики мощности электрического двигателя центробежного расходомера сыпучих сельскохозяйственных материалов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2014. – № 10 (120). – С. 108-113.

11. Багаев А.А., Чернущ Р.С. Математическая модель функциональной зависимости момента и мощности приводного асинхронного электродвигателя центробежного расходомера сыпучих сельскохозяйственных материалов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2015. – № 10 (132). – С. 88-93.

12. Багаев А.А., Чернущ Р.С. Определение расхода сыпучих сельскохозяйственных материалов путем измерения тока статора асинхронного привода центробежного расходомера // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2015. – № 12 (134). – С. 132-138.

13. Пат. 2532595 Российская Федерация, МПК G 01F 1/56 (2006.01) Способ непрерывного контроля расхода и дозирования сыпучих материалов / Багаев А.А., Чернущ Р.С., Костюков А.Ф.,

заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО АГАУ. – № 2013122014/28; заявл. 13.05.2013; опублик. 10.11.2014, Бюл. № 31. – 7 с.

14. Пат. 2532596 Российская Федерация, МПК G 01F 1/56 (2006.01) Способ контроля расхода и дозирования сыпучих материалов / Багаев А.А., Чернущ Р.С., Костюков А.Ф., заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО АГАУ. – № 2013122014/28; заявл. 13.05.2013; опублик. 10.11.2014, Бюл. № 31. – 7 с.

15. Багаев А.А., Чернущ Р.С. Выходная статическая характеристика центробежного датчика измерения расхода сыпучих сельскохозяйственных материалов при частотном регулировании // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век (МИК-2016), 15.03 – 30.06.2016 г.: матер. XIV Междунар. науч.-практ. интернет-конференции. – Орел: Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, 2016. – Режим доступа: <http://oreluniver.ru/science/confs/2016/ee/publ>].

16. Луткин Н.И. Расходомеры для зерна и сыпучих материалов. – М.: Колос, 1989. – 184 с.

17. Онищенко Г.Б. Электрический привод: учебник. – М.: ИЦ Академия, 2006. – 288 с.

18. Багаев А.А., Багаев А.И., Хомутов О.И. Электромеханика: сб. задач. – Барнаул: Алт. гос. техн. ун-т, 2003. – 206 с.

References

1. Bagaev A.A., Lukyanov V.G., Chernus R.S. Ispolzovanie momenta koriolisovykh sil dlya izmeneniya massovogo raskhoda potoka zerna i produktov ego razmola // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2008. – № 4 (42). – S. 47-49.

2. Bagaev A.A., Lukyanov V.G., Chernus R.S. Dvigatel postoyannogo toka kak pervichnyy preobrazovatel krutyashchego momenta tsentrobezhnykh raskhodomerov syuchikh selskokhozyaystvennykh produktov // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2008. – № 6 (44). – S. 62-65.

3. Bagaev A.A., Lukyanov V.G., Chernus R.S. Rezultaty matematicheskogo modelirovaniya krutyashchego momenta tsentrobezhnogo rskho-

domera zerna i produktov ego razmola // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2009. – № 6 (56). – S. 54-57.

4. Bagaev A.A., Lukyanov V.G., Chernus R.S. Peredatochnaya funktsiya tsentrobezhnogo raskhodomera sypuchikh selskokhozyaystvennykh produktov // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2010. – № 1 (63). – S. 71-75.

5. Bagaev A.A., Chernus R.S. Uravnenie regressii momenta soprotivleniya tsentrobezhnogo raskhodomera sypuchikh selskokhozyaystvennykh materialov // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2010. – № 6 (68). – S. 83-87.

6. Bagaev A.A., Chernus R.S. Obosnovanie kriteriya vybora elektrodvigatelya tsentrobezhnogo raskhodomera sypuchikh selskokhozyaystvennykh produktov // Polzunovskiy vestnik. – 2011. – № 2 / 1. – S. 188-193.

7. Bagaev A.A., Chernus R.S. Peredatochnaya funktsiya momenta soprotivleniya tsentrobezhnogo raskhodomera sypuchikh selskokhozyaystvennykh materialov pri oseyoy zagruzke // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2011. – № 10 (84). – S. 86-89.

8. Bagaev A.A., Chernus R.S. Trebovaniya k vremennym kharakteristikam i obosnovanie oblasti raspolozheniya polyusov peredatochnoy funktsii tsentrobezhnogo raskhodomera sypuchikh selskokhozyaystvennykh materialov // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2013. – № 10 (108). – S. 115-118.

9. Bagaev A.A., Chernus R.S. Trebovaniya k informatsionnoy «podvizhnosti» tsentrobezhnogo raskhodomera sypuchikh selskokhozyaystvennykh materialov // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2014. – № 8 (118). – S. 105-110.

10. Bagaev A.A., Chernus R.S. Statisticheskie kharakteristiki moshchnosti elektricheskogo dvigatelya tsentrobezhnogo raskhodomera sypuchikh selskokhozyaystvennykh materialov // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2014. – № 10 (120). – S. 108-113.

11. Bagaev A.A., Chernus R.S. Matematicheskaya model funktsionalnoy zavisimosti momenta i moshchnosti privodnogo asinkhronnogo elektrodvigatelya tsentrobezhnogo raskhodomera sypuchikh selskokhozyaystvennykh materialov // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2015. – № 10 (132). – S. 88-93.

12. Bagaev A.A., Chernus R.S. Opredelenie raskhoda sypuchikh selskokhozyaystvennykh materialov putem izmereniya toka statora asinkhronnogo privoda tsentrobezhnogo raskhodomera // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2015. – № 12 (134). – S. 132-138.

13. Pat. 2532595 Rossiyskaya Federatsiya, MPK G 01F 1/56 (2006.01) Sposob nepreryvnogo kontrolya raskhoda i dozirovaniya sypuchikh materialov / Bagaev A.A., Chernus R.S., Kostyukov A.F., zayavitel i patentoobladatel FGBOU VPO AGAU. – № 2013122014/28; zayavl. 13.05.2013; opubl. 10.11.2014, Byul. № 31. – 7 s.

14. Pat. 2532596 Rossiyskaya Federatsiya, MPK G 01F 1/56 (2006.01) Sposob kontrolya raskhoda i dozirovaniya sypuchikh materialov / Bagaev A.A., Chernus R.S., Kostyukov A.F., zayavitel i patentoobladatel FGBOU VPO AGAU. – № 2013122014/28; zayavl. 13.05.2013; opubl. 10.11.2014, Byul. № 31. – 7 s.

15. Bagaev A.A., Chernus R.S. Vykhodnaya staticheskaya kharakteristika tsentrobezhnogo datchika izmereniya raskhoda sypuchikh selskokhozyaystvennykh materialov pri chastotnom regulirovanii // Materialy XIV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy internet-konferentsii «Energo- i resursosberezhenie – XXI vek» (MIK-2016), 15.03 – 30.06.2016 g. – Orel: Orlovskiy gosudarstvennyy universitet im. I.S.Turgeneva, 2016. [Elektronnyy resurs. Rezhim dostupa: <http://oreluniver.ru/science/confs/2016/ee/publ>].

16. Lutkin N.I. Raskhodometry dlya zerna i sypuchikh materialov. – M.: Kolos, 1989. – 184 s.

17. Onishchenko G.B. Elektricheskii privod: uchebnyk. – M.: ITs Akademiya, 2006. – 288 s.

18. Bagaev A.A., Bagaev A.I., Khomutov O.I. Elektromekhanika: sb. zadach. – Barnaul: Alt. gos. tekhn. un-t, 2003. – 206 s.