

ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО РАСХОДОМЕРА
СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ НА БАЗЕ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯTRANSFER FUNCTION OF CENTRIFUGAL FLOW METER OF LOOSE MATERIALS BASED
ON PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Ключевые слова: вентильный двигатель, передаточная функция, центробежный расходомер, датчик, точность измерения, расход зерна, переходный процесс.

Известны расходомеры сыпучих материалов, выполненные на основе асинхронного двигателя и двигателя постоянного тока. Угловая скорость вращения рабочего органа центробежного расходомера, выполненного на базе асинхронного двигателя, и, соответственно, его скольжение зависят от величины расхода, что усложняет алгоритм вычисления расхода и вносит дополнительную погрешность в результат измерения. Двигатели постоянного тока характеризуются наличием щеточно-коллекторного узла, обуславливающего ряд известных недостатков, главными из которых являются невысокая скорость изменения тока якоря, что препятствует их использованию в высокодинамичных электроприводах, и повышенная взрывоопасность при эксплуатации в запыленных помещениях. Указанных недостатков лишены вентильные двигатели. В работе получена система нелинейных уравнений, связывающих расход материала, ток статора и угловую скорость вентильного двигателя. Проведена линеаризация нелинейных уравнений. Получены передаточные функции центробежного расходомера сыпучих материалов, построенного на основе вентильного двигателя, связывающие расход с измеряемыми параметрами приводного двигателя и пригодные для дальнейшего исследования и анализа динамических характеристик расходомера. Передаточная функция массового расхода сыпучих продуктов по угловой скорости представляет собой последовательное соединение усилительного, дифференцирующего первого порядка и устойчивого колебательного звена, а по току обмоток статора приводного вентильного двигателя – последовательное соединение усилительного и устойчивого колебательного звеньев. Синтезированные передаточные функции представляют собой один из известных способов представления динамической зависимости входной и выходной переменных в переходном процессе при изменении приложенного к системе воздействия. Полученные передаточные функции позволяют анализировать и

прогнозировать динамическое поведение исследуемого расходомера принятыми в теории автоматического регулирования методами, в том числе временными и частотными.

Keywords: permanent magnet synchronous motor (PMSM), transfer function, centrifugal flowmeter, sensor, accuracy of measurement, grain flow, transient process.

Flow-meters of loose materials based on induction motor and direct current motor are known. The angular velocity of actuator rotation of centrifugal flow-meter based on an induction motor, and, respectively, its sliding depend on material flow that complicates an algorithm of flow calculation and adds an error in measurement result. Direct current motors are characterized by the availability of the brush and collector unit causing a number of known shortcomings, the main are the low speed of change of anchor current that interferes with their use in high-dynamic electric drives; and increased potential of explosion at operation in dusty rooms. Permanent magnet synchronous motors do not have such shortcomings. This paper discusses the system of nonlinear equations connecting material consumption, stator current and PMSM angular velocity. The nonlinear equations are linearized. Transfer functions of centrifugal flow-meter of loose materials based on PMSM are obtained; they connect material flow with measured parameters of the drive engine and are suitable for further research and analysis of dynamic characteristics of the flow-meter. The transfer function of mass flow of loose products by angular velocity represents a series connection of the intensifying, differentiating of the first order and steady oscillating link, and by the current of stator windings of the drive PMSM – a series connection of intensifying and steady oscillating links. Synthesized transfer functions represent one of the known ways of representation of dynamic dependence of entrance and output variables in a link in transition process at the change of applied impact on the system. The obtained transfer functions enable to analyze and predict dynamic behavior of the studied flow-meter by the methods accepted in the theory of automatic control including temporary and frequency ones.

Багаев Андрей Алексеевич, д.т.н., проф., зав. каф. электрификации и автоматизации сельского хозяйства, Алтайский государственный аграрный университет. E-mail: багаев710@mail.ru.

Чернусь Роман Сергеевич, к.т.н., ст. преп., каф. электрификации и автоматизации сельского хозяйства, Алтайский государственный аграрный университет. E-mail: Chernus.Roman@mail.ru.

Bagayev Andrey Alekseyevich, Dr. Tech. Sci., Prof., Head, Chair of Electrification and Automation of Agriculture, Altai State Agricultural University. E-mail: багаев710@mail.ru.

Chernus Roman Sergeevich, Cand. Tech. Sci., Asst. Prof., Chair of Electrification and Automation of Agriculture, Altai State Agricultural University. E-mail: Chernus.Roman@mail.ru.

Введение

Основы теории центробежных расходомеров сыпучих сельскохозяйственных материалов, выполненных на базе нерегулируемых двигателей постоянного тока и асинхронных двигателей, изложены в работах [1-15].

Угловая скорость вращения рабочего органа центробежного расходомера, выполненного на базе асинхронного двигателя, и, соответственно, его скольжение зависят от величины расхода, что усложняет алгоритм вычисления расхода и вносит дополнительную погрешность в результат измерения. Расширение диапазона измерения требует использования преобразователя частоты [16].

Двигатели постоянного тока характеризуются наличием щеточно-коллекторного узла, обуславливающего ряд известных недостатков, главными из которых являются невысокая скорость изменения тока якоря, что препятствует их использованию в высокодинамичных электроприводах, и повышенная взрывоопасность при эксплуатации в запыленных помещениях.

Указанных недостатков лишены вентильные двигатели [17], представляющие собой систему регулируемого электропривода, состоящую из двигателя переменного тока, подобного синхронной машине, вентильного преобразователя на основе тиристоров или транзисторов и выполняющего роль щеточно-коллекторного узла, и устройств управления, обеспечивающих коммутацию цепей обмоток двигателя в зависимости от положения ротора двигателя. Электромеханические свойства вентильного двигателя аналогичны подобным для двигателей постоянного тока.

Поэтому вентильный двигатель называют бесконтактным двигателем постоянного тока БДПТ (BLDC – Brushless Direct Current Motor). По управляемости вентильный двигатель также похож на двигатель постоянного тока, его скорость регулируется величиной подводимого постоянного напряжения, что важно для расширения диапазона измерения расхода.

При разработке датчиков для измерения расхода сыпучих продуктов первостепенной задачей является установление однозначной функциональной связи между массовым расходом и выходным сигналом датчика, в качестве которого может выступать угловая скорость ротора [18] или ток [19] обмотки статора вентильного двигателя.

Цель – получение передаточных функций центробежного расходомера сыпучих

материалов, построенного на основе вентильного двигателя, связывающих расход с измеряемыми параметрами приводного двигателя и пригодных для дальнейшего исследования и анализа динамических характеристик расходомера.

Математическое моделирование и передаточные функции. Математическая модель. Момент двигателя M_d , Н·м, и момент сопротивления M_c , Н·м, связаны основным уравнением движения электропривода

$$M_d - M_c = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

где J_{Σ} – суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции, кг·м²;

ω – угловая скорость, рад/с.

Момент двигателя

$$M_d = k\Phi_2 I_1, \quad (2)$$

где Φ_2 – магнитный поток, Вб, $\Phi_2 = \text{const}$;

k – конструктивный коэффициент;

I_1 – среднее значение тока в обмотках статора, А.

Так называемое [17] среднее значение тока в обмотках статора вентильного двигателя

$$I_1 = \frac{U_1 - k\Phi_2 \omega - 2I_1 \frac{dI_1}{dt}}{2R_1}, \quad (3)$$

или в операторной форме после ряда преобразований

$$I_1 = \frac{U_1 - k\Phi_2 \omega}{2(R_1 + pL_1)}, \quad (4)$$

где R_1 – сопротивление обмотки статора, Ом;

U_1 – напряжение питания, В;

L_1 – индуктивность обмотки, Гн,

$p = d/dt$ – оператор.

Момент сопротивления [20]

$$M_c = Q\omega r_2^2, \quad (5)$$

где Q – массовый расход сыпучего продукта, кг/с;

r_2 – радиус рабочего органа (крыльчатки) расходомера, м.

С использованием (3) угловая скорость ротора вентильного двигателя и крыльчатки

$$\omega = \frac{U_1}{k\Phi_2} - \frac{2R_1 I_1}{k\Phi_2} - \frac{2L_1}{k\Phi_2} \frac{dI_1}{dt}, \quad (6)$$

или в операторной форме

$$\omega = \frac{U_1 - 2I_1(R_1 + pL_1)}{k\Phi_2}. \quad (7)$$

Результатом решения системы (1)-(7) относительно расхода Q , выраженного через угловую скорость ω или ток I_1 , являются нелинейные дифференциальные уравне-

ния $Q = f(\omega)$ и $Q = f(I_1)$, что обусловлено нелинейностью входящего в указанную систему уравнения (5).

Уравнение (5) является линейным исключительно при постоянстве одной из переменных, входящих в состав правой части: расхода Q или угловой скорости ω . Вместе с тем, согласно [20], зависимость угловой скорости от расхода $\omega = f(Q)$ в центробежных расходомерах представляет собой уравнение прямой линии вида $\omega = -aQ + b$, где a – угловой коэффициент; b – начальная ордината [21]. Аналогичной зависимостью также характеризуется функция $Q = f(\omega)$. Подстановка линейной функции вида $\omega = -aQ + b$ в выражение (5) приводит последнее к виду неполного квадратного уравнения и делает его нелинейным.

Непрерывные нелинейные функции линеаризуют, разлагая их в ряд Тейлора. Уравнение движения электропривода (1) в пределах малых отклонений переменных

$$\Delta M_D - \Delta M_C = J_E \frac{d\Delta\omega}{dt}. \quad (8)$$

Передаточная функция по угловой скорости. Уравнения (2), (4), (5) в приращениях записываются следующим образом

$$\Delta I_1 = \frac{U_1 - k\Phi_2 \Delta\omega}{2(R_1 + pL_1)}, \quad (9)$$

$$\Delta M_D = \left(\frac{\partial M_D}{\partial \omega}\right)_0 \Delta\omega = -\frac{k^2 \Phi_2^2}{2(R_1 + pL_1)} \Delta\omega, \quad (10)$$

$$\Delta M_C = \left(\frac{\partial M_C}{\partial Q}\right)_0 \Delta Q + \left(\frac{\partial M_C}{\partial \omega}\right)_0 \Delta\omega = \omega_0 r_2^2 \Delta Q + Q_0 r_2^2 \Delta\omega, \quad (11)$$

где ω_0 ; Q_0 – начальные значения (например, номинальные угловая скорость и расход), $\omega_0 = \text{const}$, $Q_0 = \text{const}$.

В результате решения системы (8)-(11) передаточная функция угловой скорости $\Delta\omega(p)$ по возмущающему воздействию (массовому расходу) $\Delta Q(p)$ принимает вид:

$$W(p) = \frac{\Delta\omega(p)}{\Delta Q(p)} = \frac{k_1(T_1 p + 1)}{(T_2 p^2 + T_3 p + 1)}, \quad (12)$$

где $k_1 = \frac{2\omega_0 r_2^2}{\beta + 2Q_0 r_2^2}$ – передаточный коэффициент;

$\beta = \frac{(k\Phi_2)^2}{R_1}$ – жесткость механической характеристики электропривода;

$T_1 = \frac{L_1}{R_1} = T_{Я}$ – электромагнитная постоянная времени;

$T_2 = \frac{2J_E T_1}{\beta + 2Q_0 r_2^2}$ – электромеханическая постоянная времени;

$T_3 = \frac{2(Q_0 r_2^2 T_1 + J_E)}{\beta + 2Q_0 r_2^2}$ – постоянная времени.

Из выражения (12) следует, что при приложении нагрузки в виде элементарного массового расхода скорость двигателя снизится на величину $\Delta\omega$.

Передаточная функция (12) представляет собой последовательное соединение трех передаточных звеньев: усилительного $W_y = -k_1$, дифференцирующего первого порядка $W_D = T_1 p + 1$ и устойчивого колебательного $W_K = \frac{1}{T_2 p^2 + T_3 p + 1}$. Структурная схема представлена на рисунке 1.

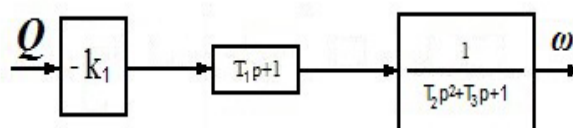


Рис. 1. Структурная схема разомкнутой системы измерения расхода сыпучих продуктов посредством центробежного расходомера по угловой скорости

Передаточная функция по току обмоток статора. Уравнения (2), (5), (7) в приращениях записываются следующим образом

$$\Delta M_D = \left(\frac{\partial M_D}{\partial I_1}\right)_0 \Delta I_1 = k\Phi_2 \Delta I_1; \quad (13)$$

$$\Delta M_C = \left(\frac{\partial M_C}{\partial Q}\right)_0 \Delta Q + \left(\frac{\partial M_C}{\partial \omega}\right)_0 \Delta\omega = \omega_0 r_2^2 \Delta Q + Q_0 r_2^2 \Delta\omega = \omega_0 r_2^2 \Delta Q + Q_0 r_2^2 \left(\frac{U_1 - 2R_1 \Delta I_1 - 2L_1 \Delta I_1 p}{k\Phi_2}\right); \quad (14)$$

$$J_E \frac{d\Delta\omega}{dt} = -J_E 2\Delta I_1 (L_1 p^2 + R_1 p) / k\Phi_2; \quad (15)$$

$$\Delta\omega = \frac{U_1 - 2\Delta I_1 (k_1 + pL_1)}{k\Phi_2}. \quad (16)$$

В результате решения системы (8), (13)-(16) передаточная функция тока в обмотках вентильного двигателя $\Delta I_1(p)$ по возмущающему воздействию (массовому расходу) $\Delta Q(p)$ принимает вид:

$$W(p) = \frac{\Delta I_1(p)}{\Delta Q(p)} = \frac{k_2}{(T_2 p^2 + T_3 p + 1)}, \quad (17)$$

где $k_2 = \frac{\omega_0 r_2^2 k \Phi_2}{R_1 (\beta + 2 Q_0 r_2^2)}$ – передаточный коэффициент.

Анализ выражения (17) показывает, что при приложении нагрузки в виде элементарного массового расхода ток обмоток вентильного двигателя увеличится на величину ΔI_1 . Структурная схема представлена на рисунке 2.

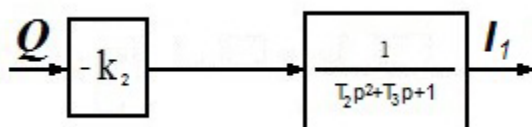


Рис. 2. Структурная схема разомкнутой системы измерения расхода сыпучих продуктов посредством центробежного расходомера по току статора

Выводы

Передаточная функция массового расхода сыпучих продуктов по угловой скорости (12) представляет собой последовательное соединение усилительного, дифференцирующего первого порядка и устойчивого колебательного звена, а по току обмоток статора (17) приводного вентильного двигателя – последовательное соединение усилительного и устойчивого колебательного звеньев. Синтезированные передаточные функции (12) и (17) представляют собой один из известных способов представления динамической зависимости входной и выходной переменной звена в переходном процессе при изменении приложенного к системе воздействия. Полученные передаточные функции позволяют анализировать и прогнозировать динамическое поведение исследуемого расходомера принятыми в теории автоматического регулирования методами, в том числе временными и частотными.

Библиографический список

1. 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.
2. Багаев А.А., Лукьянов В.Г., Чернущь Р.С. Двигатель постоянного тока как первичный преобразователь крутящего момента центробежных расходомеров сы-

пучих сельскохозяйственных продуктов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2008. – № 6 (44). – С. 62-65.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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., Чернущь 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., Чернущь 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., Чернущь 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., Чернущь 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., Чернущь Р.С. Математическая модель функциональной зависи-

мости 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., Чернущь 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. Багаев А.А., Чернущь Р.С. К вопросу об «информационной подвижности» центробежного расходомеров сыпучих сельскохозяйственных материалов // Ломоносовские чтения на Алтае: фундаментальные проблемы науки и образования: сб. науч. статей Междунар. конф. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2014. – С. 304-309.

14. Багаев А.А., Чернущь Р.С., Чернущь Т.В. Метод измерения момента на валу в функции тока статора приводного асинхронного электродвигателя // Ломоносовские чтения на Алтае: фундаментальные проблемы науки и образования: сб. науч. ст. Междунар. конф. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2015. – С. 625-631.

15. Багаев А.А., Чернущь Р.С., Чернущь Т.В. Математическая модель функциональной связи момента на валу с током статора асинхронного электродвигателя // Математика и её приложения: фундаментальные направления науки и техники: сб. науч. ст. Всерос. конф. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2015. – С. 228-234.

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

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

18. Пат. 2532595 Российская Федерация, МПК G 01F 1/56 (2006.01) Способ непрерывного контроля расхода и дозирования сыпучих материалов / Багаев А.А., Чернущь Р.С., Костюков А.Ф., заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО АГАУ. –

№ 2013122014/28; заявл. 13.05.2013; опубл. 10.11.2014, Бюл. № 31. – 7 с.

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

20. Луткин Н.И. Расходомеры для зерна и сыпучих материалов. – М.: Колос, 1969. – 184 с.

21. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. – М.: Наука, 1964. – 870 с.

References

1. Bagaev A.A., Lukyanov V.G., Chernus R.S. Ispolzovanie momenta koriolisovykh sil dlya izmereniya 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 sypuchikh 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 rskhodomera 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. Pereda-tochnaya funktsiya momenta soprotivleniya tsentrobezhnogo raskhodomera sypuchikh selskokhozyaystvennykh materialov pri ose-voy 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 pereda-tochnoy 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. Bagaev A.A., Chernus R.S. K voprosu ob «informatsionnoy podvizhnosti» tsentrobezhnogo raskhodomera sypuchikh selskokhozyaystvennykh materialov // Sbornik nauchnykh statey mezhdunarodnoy konferentsii «Lomonosovskie chteniya na Altae: fundamentalnye problemy nauki i obrazovaniya». – Barnaul: Izd-vo Alt. un-ta, 2014. – S. 304-309.
14. Bagaev A.A., Chernus R.S., Chernus T.V. Metod izmereniya momenta na valu v funktsii toka statora privodnogo asinkhronnogo elektrodvigatelya // Sbornik nauchnykh statey mezhdunarodnoy konferentsii «Lomonosovskie chteniya na Altae: fundamentalnye problemy nauki i obrazovaniya». – Barnaul: Izd-vo Alt. un-ta, 2015. – S. 625-631.
15. Bagaev A.A., Chernus R.S., Chernus T.V. Matematicheskaya model funktsionalnoy svyazi momenta na valu s tokom statora asinkhronnogo elektrodvigatelya // Sbornik nauchnykh statey Vserossiyskoy konferentsii «Matematika i ee prilozheniya: fundamentalnye napravleniya nauki i tekhniki». – Barnaul: Izd-vo Alt. un-ta, 2015. – S. 228-234.
16. 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 «Energ- i resursobere-zhenie – 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/e e/publ>.
17. Onishchenko G.B. Elektricheskyy privod: uchebnik. – M.: ITs Akademiya, 2006. – 288 s.
18. Pat. 2532595 Rossiyskaya Federatsiya, MPK G 01F 1/56 (2006.01) Sposob nepre-ryvnogo kontrolya raskhoda i dozirovaniya sypuchikh materialov / A.A. Bagaev, R.S. Chernus, A.F. Kostyukov., zayavitel i patentoobladatel FGBOU VPO AGAU. – № 2013122014/28, zayavl. 13.05.2013; opubl.: 10.11.2014 Byul. № 31. – 7 s.
19. Pat. 2532596 Rossiyskaya Federatsiya, MPK G 01F 1/56 (2006.01) Sposob kontrol-ya raskhoda i dozirovaniya sypuchikh mater-ialov / A.A. Bagaev, R.S. Chernus, A.F. Kostyukov., zayavitel i patentoobladatel FGBOU VPO AGAU. – № 2013122014/28, zayavl. 13.05.2013; opubl.: 10.11.2014 Byul. № 31. – 7 s.
20. Lutkin N.I. Raskhodomery dlya zerna i sypuchikh materialov. – M.: Kolos, 1969. – 184 s.
21. Vygodskiy M.Ya. Spravochnik po vysshey matematike. – M.: Nauka, 1964. – 870 s.

