

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА СЫПУЧИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПУТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА СТАТОРА АСИНХРОННОГО ПРИВОДА ЦЕНТРОБЕЖНОГО РАСХОДОМЕРА

THE DETERMINATION OF THE FLOW OF LOOSE AGRICULTURAL MATERIALS BY MEASURING THE STATOR CURRENT OF ASYNCHRONOUS MOTOR DRIVE OF A CENTRIFUGAL FLOW METER

Ключевые слова: центробежный расходомер сыпучих материалов, осциллограмма, ток статора, схема замещения, расход.

Для измерения расхода сыпучих сельскохозяйственных продуктов посредством центробежных датчиков можно измерять скорость или ток статора двигателя. Информативность измерения расхода по скорости или скольжению низка: асинхронный двигатель в силу жесткости рабочего участка своей механической характеристики недостаточно быстро и информативно реагирует по скорости на изменение нагрузки. Большой информативностью и быстродействием в целях измерения расхода обладает ток статора. Однако зависимость момента и, следовательно, расхода сыпучего материала от тока статора является нелинейной. Целью работы является аналитическое обоснование математической модели, описывающей функциональную связь расхода сыпучего материала с током статора асинхронного двигателя центробежного расходомера. В результате с использованием основных положений теории электрических машин и теории центробежных расходомеров получено оригинальное выражение, позволяющее определять расход сыпучих продуктов по измеряемому аналого-цифровым преобразователем мгновенному значению тока статора асинхронного двигателя и вычисляемому программными средствами действующему значению тока статора с промежуточным вычислением скольжения. Сформулированы ограничения применимости разработанной модели. Предлагаемый алгоритм обеспечивает линейную зависимость расхода от скольжения при имеющей место нелинейной зависимости скольжения от измеряемого тока статора асинхронного двигателя. Предлагаемая модель может быть практически

реализована в микроконтроллерах, обладающих функцией измерения расхода. Полученные выражения позволяют определять расход при случайных нагрузках.

Keywords: centrifugal flow meter of loose materials, oscillogram, stator current, equivalent circuit, flow.

To measure the flow of loose agricultural products by means of centrifugal sensors, the motor speed or the stator current may be measured. The information value of flow measurement through the speed or slip is low: an asynchronous motor due to the rigidity of its workable control range does not response quick enough and with proper informative value by its speed to the load changes. Stator current is more informative and fast in terms of flow measurement. However, the dependence of the torque and thus the loose material flow on stator current is nonlinear. The research goal is an analytical substantiation of the mathematical model describing the functional relationship of loose material flow and the stator current of asynchronous motor drive of a centrifugal flow meter. Using the fundamental principles of the theory of electrical machines and the theory of centrifugal flow meters, we have derived an original expression that determines the flow of loose products from the momentary value of the asynchronous motor stator current measured by analog-to-digital converter and software calculated working stator current value with intermediate slip calculation. The applicability limits of the developed model have been formulated. The proposed model may be implemented in microcontrollers that have a flow measurement function. The obtained expressions enable determining the flow rate at random loads.

Багаев Андрей Алексеевич, д.т.н., проф., зав. каф. электрификации и автоматизации сельского хозяйства, Алтайский государственный аграрный университет. E-mail: bagayev710@mail.ru.

Чернусь Роман Сергеевич, 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: bagayev710@mail.ru.

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

Конструкция и основные положения теории центробежных расходомеров изложены в работах [1-7].

При разработке датчиков расхода стремятся, как правило, получить линейную зависимость регистрируемой физической величины от расхода [8]. В связи с этим для центро-

бежных расходомеров, выполненных на базе асинхронного двигателя, рекомендуется для обеспечения линейности характеристики использовать двигатель, мощностью, в 3-4 раза превышающей номинальную мощность [8]. Это обеспечивает, с одной стороны, линейность рабочей характеристики расходомера и

«энергетическую подвижность» приводного двигателя, а с другой, – исключает его «подвижность информационную» [6].

Установлены и известны теоретически обоснованные и экспериментально подтвержденные линейные связи между моментом двигателя и расходом [9], угловой скоростью и расходом [10], скольжением асинхронного двигателя и расходом [8].

Для измерения расхода сыпучих сельскохозяйственных продуктов посредством центробежных датчиков возможно измерять момент реактивных сил [8], скорость или ток статора двигателя [11-13].

Измерение момента с целью обеспечения линейности зависимости расхода от момента требует использования асинхронного двигателя мощностью, значительно превышающей номинальную, что подразумевает наличие перечисленных выше недостатков с точки зрения «информационной подвижности». Кроме того, система измерения расхода в функции момента является технически сложной и требует долговременной и трудоемкой процедуры наладки и настройки.

Вместе с тем показано [14], что информативность измерения расхода по скорости или скольжению низка: асинхронный двигатель в силу жесткости рабочего участка своей механической характеристики недостаточно быстро и информативно реагирует по скорости на изменение нагрузки. Там же доказано, что большей информативностью и быстродействием в целях измерения расхода обладает ток статора. Однако зависимость момента (и, следовательно, расхода материала) от тока статора является нелинейной [14].

Сказанное выше представляет собой противоречие и обуславливает необходимость решения компромиссной задачи. Одну сторону проблемы представляет собой инерционный процесс: зависимость расхода от скорости или скольжения (параметров практически неизменяющихся от нагрузки) и момента, следовательно, и расхода является линейной. Но осциллограмма скорости мало информативна в связи с жесткостью механической характеристики асинхронного двигателя [14].

Другой стороной является безынерционный процесс: зависимость расхода от тока статора (параметра, мгновенно изменяющегося от нагрузки) является нелинейной. Однако осциллограмма тока при случайном характере изменения момента является более информативной и быстро реагирующей на изменение нагрузки.

Быстродействие, в свою очередь, может быть выражено через время переходного процесса, время нарастания до заданного значения и связано с перерегулированием. Иначе, быстродействие является одним из показателей качества переходного процесса

[15] и непосредственным образом влияет на точность и погрешность измерений [14]. Уменьшение ошибки при этом достигается именно за счет быстродействия датчика по току, а не по скорости.

В связи с этим для разрешения вышеформулированного противоречия целесообразно получить математическую модель, позволяющую установить аналитическую зависимость тока статора, изменяющегося в соответствии со случайным стационарным эргодическим процессом, скольжением двигателя и расходом сыпучего материала. Кроме того указанная математическая модель должна быть пригодна для использования при алгоритмической реализации процесса измерения расхода в функции тока статора. Подобная задача решается впервые.

Целью работы является обоснование математической модели, позволяющей определять расход сыпучего материала путем измерения тока статора асинхронного двигателя центробежного расходомера.

Результаты исследования

Для достижения поставленной цели следует скольжение (угловую скорость или частоту вращения) выразить через ток статора, а затем расход – через скольжение, зависимость между которыми является линейной.

На рисунках 1 и 2 представлены П-образная схема замещения асинхронного двигателя с вынесенным намагничивающим контуром и упрощенная векторная диаграмма двигателя соответственно [15]. П-образная схема замещения асинхронного двигателя обычно применяется для анализа процессов в нерегулируемом электроприводе.

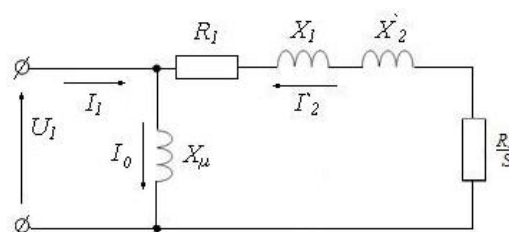


Рис. 1. П-образная схема замещения асинхронного двигателя

Для схемы замещения, изображенной на рисунке 1, и в соответствии с векторной диаграммой на рисунке 2 ток статора I_1 может быть представлен следующим образом:

$$I_1 = \sqrt{I_2'^2 + I_0^2} + 2I_0I_2' \sin\varphi_2, \quad (1)$$

где I_1 – ток статора;

I_2' – приведенный ток ротора,

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{\Sigma}^2}}; \quad (2)$$

I_0 – ток намагничивания,

$$I_0 \approx \frac{U_1}{X_{\mu}}; \quad (3)$$

$$\sin\varphi_2 = \frac{X_{\mu} I_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{\mu}^2}}, \quad (4)$$

где X_{μ} – индуктивное сопротивление короткого замыкания;

R_1 – сопротивление статора;

R'_2 – приведенное сопротивление ротора;

s – скольжение;

U_1 – напряжение на статоре;

X_{μ} – индуктивное сопротивление контура намагничивания.

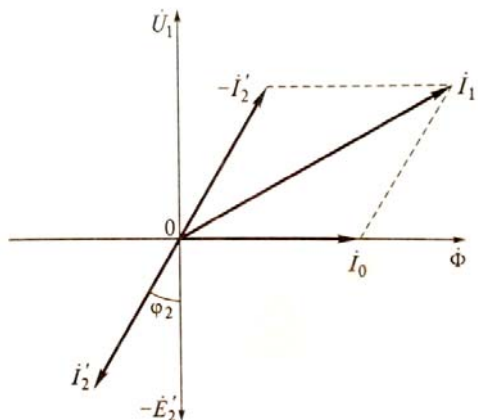


Рис. 2. Упрощенная векторная диаграмма асинхронного двигателя

Результатом подстановки выражений (2)-(4) в (1) является уравнение электро-механической характеристики:

$$I_1 = U_1 \sqrt{\frac{1}{X_{\mu}^2} + \frac{1}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{\mu}^2} + \frac{2X_{\mu}}{X_{\mu} \left(\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{\mu}^2\right)}}. \quad (5)$$

На рисунках 3 и 4 представлены электро-механические характеристики двигателя АИР56В4 мощностью 180 Вт, построенные с использованием выражения (5) и параметров схемы замещения, приведенных в работе [16].

Электро-механическая характеристика на рисунке 4 получена с использованием выражения (5) в результате подстановки в него известного соотношения $s = 1 - \frac{\omega}{\omega_0}$, где ω_0 – синхронная угловая скорость.

Уравнение (5) позволяет выразить скольжение s через ток статора I_1 двигателя:

$$As^2 + Bs + C = 0, \quad (6)$$

где $A = (X_{\mu}^2 + R_1^2) \cdot X_{\mu}^2 I_1^2 - U_1^2 (X_{\mu}^2 + R_1^2 + X_{\mu}^2 + 2X_{\mu} X_{\mu})$;

$$B = X_{\mu}^2 R_1 R'_2 I_1^2 - 2R_1 R'_2 U_1^2;$$

$$C = X_{\mu}^2 R_1^2 I_1^2 - R_1^2 U_1^2.$$

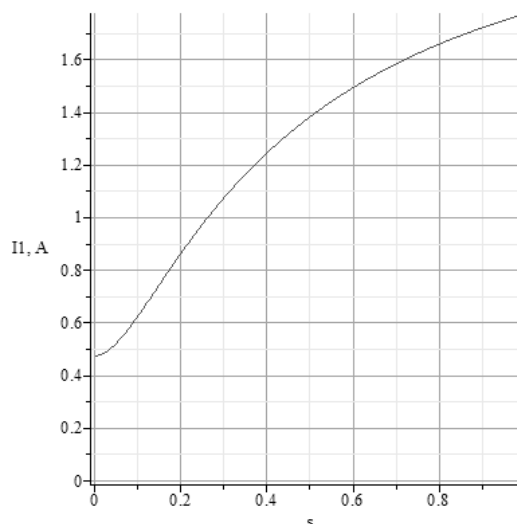


Рис. 3. Зависимость тока статора I_1 двигателя АИР56В4 от скольжения s

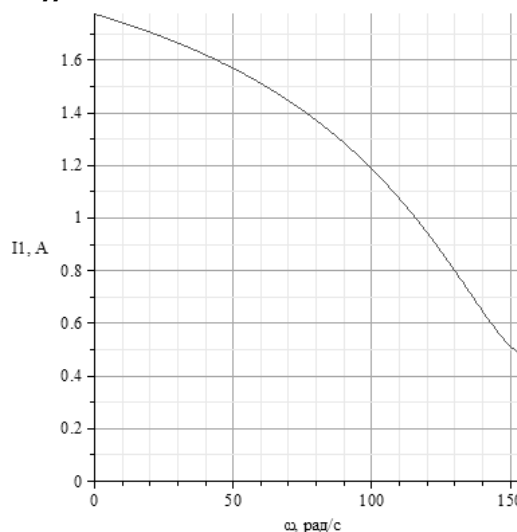


Рис. 4. Зависимость тока статора I_1 двигателя АИР56В4 от угловой скорости ω

Решениями уравнения (6) являются два корня:

$$s_1 = \frac{R'_2 \left(X_{\mu}^2 R_1 I_1^2 - U_1^2 R_1 + \sqrt{-U_1^4 X_{\mu}^2 - U_1^4 X_{\mu}^2 - 2U_1^4 X_{\mu} X_{\mu} + (2U_1^2 X_{\mu}^2 X_{\mu}^2 - U_1^2 X_{\mu}^4 + 2U_1^2 X_{\mu}^2 X_{\mu}) I_1^2 - X_{\mu}^4 X_{\mu}^2 I_1^4} \right)}{U_1^2 X_{\mu}^2 + U_1^2 R_1^2 + U_1^2 X_{\mu}^2 + 2U_1^2 X_{\mu} X_{\mu} - (X_{\mu}^2 X_{\mu}^2 + X_{\mu}^2 R_1^2) I_1^2} \quad (7)$$

$$\text{и } s_2 = \frac{R'_2 \left(X_{\mu}^2 R_1 I_1^2 - U_1^2 R_1 - \sqrt{-U_1^4 X_{\mu}^2 - U_1^4 X_{\mu}^2 - 2U_1^4 X_{\mu} X_{\mu} + (2U_1^2 X_{\mu}^2 X_{\mu}^2 - U_1^2 X_{\mu}^4 + 2U_1^2 X_{\mu}^2 X_{\mu}) I_1^2 - X_{\mu}^4 X_{\mu}^2 I_1^4} \right)}{U_1^2 X_{\mu}^2 + U_1^2 R_1^2 + U_1^2 X_{\mu}^2 + 2U_1^2 X_{\mu} X_{\mu} - (X_{\mu}^2 X_{\mu}^2 + X_{\mu}^2 R_1^2) I_1^2} \quad (8)$$

Графическая интерпретация решений уравнения (6) для двигателя АИР56В4 показана на рисунке 5.

Анализ полученных электро-механических характеристик показывает, что при токе ста-

тора $I_1 > I_{xx} \approx I_0$ численные значения корня s_2 являются отрицательными, что не соответствует двигательному режиму работы электродвигателя ($0 < s \leq 1$), где I_{xx} – ток холостого

хода. Следовательно, для установления связи между скольжением S и током статора I_1 следует использовать решение s_2 .

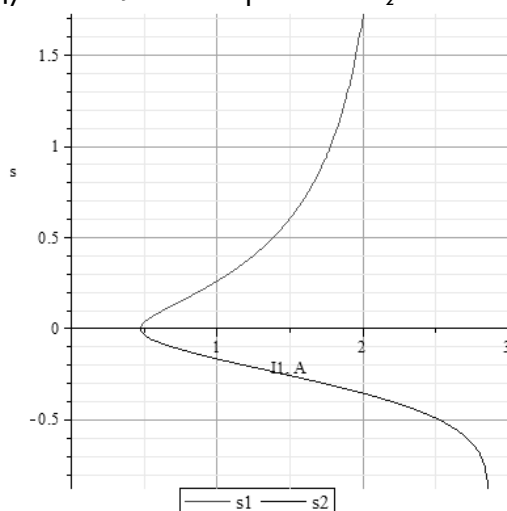


Рис. 5. Зависимости скольжения s от тока статора I_1

Анализ характера изменения корней и зависимостей на рисунке 5 позволяет сформулировать условия решения уравнения (6): дискриминант должен быть больше нуля, $I_1 > I_{нн} \approx I_0$ и $0 < s \leq 1$.

Таким образом, выражение (6) с учетом сформулированных выше ограничений устанавливает связь между скольжением s и током статора I_1 .

С другой стороны, известно выражение [8], связывающее расход сыпучего материала и угловую скорость двигателя:

$$\omega = \omega_c \left(1 - s_{нн} \frac{Q}{Q_n} \right), \quad (9)$$

где ω – угловая скорость крыльчатки, рад/с;

ω_c – скорость крыльчатки без нагрузки, рад/с;

$s_{нн}$ – скольжение при номинальной нагрузке относительно ω_c , $s_{нн} = \frac{\omega_c - \omega_n}{\omega_c}$;

Q_n – расход сыпучего продукта при номинальной нагрузке электродвигателя, кг/с,

Q – расход сыпучего продукта, кг/с;

Результатом преобразования (9) относительно расхода является:

$$Q = \frac{Q_n}{s_{нн}} \left(1 - \frac{\omega}{\omega_c} \right) = \frac{Q_n}{s_{нн}} \left(1 - \frac{(1-s)\omega_0}{\omega_c} \right), \quad (10)$$

где ω_0 – скорость поля статора.

В соответствии с (10) зависимость расхода от скольжения является линейной.

Совместное решение уравнений (7) и (10) позволяет получить функциональную связь расхода сыпучего материала с измеряемым током статора асинхронного двигателя. Для этого достаточно подставить скольжение, описываемое выражением (7), в уравнение расхода (10). В силу своей громоздкости указанная зависимость не приводится.

Реализация рассматриваемой зависимости осуществлена в программной среде LabView с использованием аналого-цифрового преобразователя (АЦП) L-Card E 14-140, регистрирующего ток статора приводного асинхронного двигателя центробежного расходомера в зависимости от количества зерна, проходящего через крыльчатку.

На рисунке 6а отображена осциллограмма мгновенного значения тока статора i_1 асинхронного двигателя АИР56В4 с крыльчаткой центробежного расходомера на валу при случайном характере изменения нагрузки. Осциллограмма фиксируется АЦП L-Card E 14-140.

На рисунке 6б показан характер изменения действующего значения тока статора I_1 , соответствующего осциллограмме мгновенного тока на рисунке 6а. Расчет действующего значения тока за каждый период его изменения (0,02 с. при частоте 50 Гц) является алгоритмическим шагом в среде LabView. Действующее значение тока за период является определяющим фактором при вычислении скольжения в соответствии с выражением (7) при постоянстве параметров схемы замещения асинхронного двигателя, напряжения и его частоты.

На рисунке 6в представлена зависимость расхода зерна, коррелированная с осциллограммами на рисунках 6а, б. Расход сыпучего материала вычисляется в среде LabView в соответствии с выражениями (7) и (10). Осциллограмма на рисунке 6 в является результатом первоначального фиксирования мгновенного значения тока статора асинхронного двигателя с помощью АЦП, промежуточно вычисления его действующего значения за каждый период при случайной нагрузке и скольжения и, наконец, последующим вычислением расхода. Алгоритм вычисления расхода при случайной нагрузке за некоторый интервал времени реализован путем алгебраического суммирования вычисленных за каждый период тока статора мгновенных расходов.

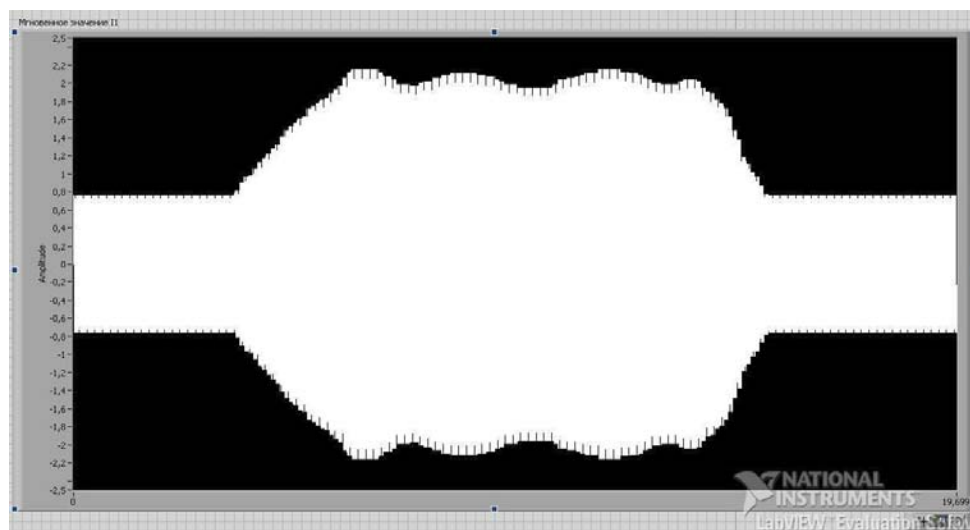
На рисунке 7 графически изображено изменение массы зернового материала, прошедшего через расходомер за время измерения тока статора.

Выводы

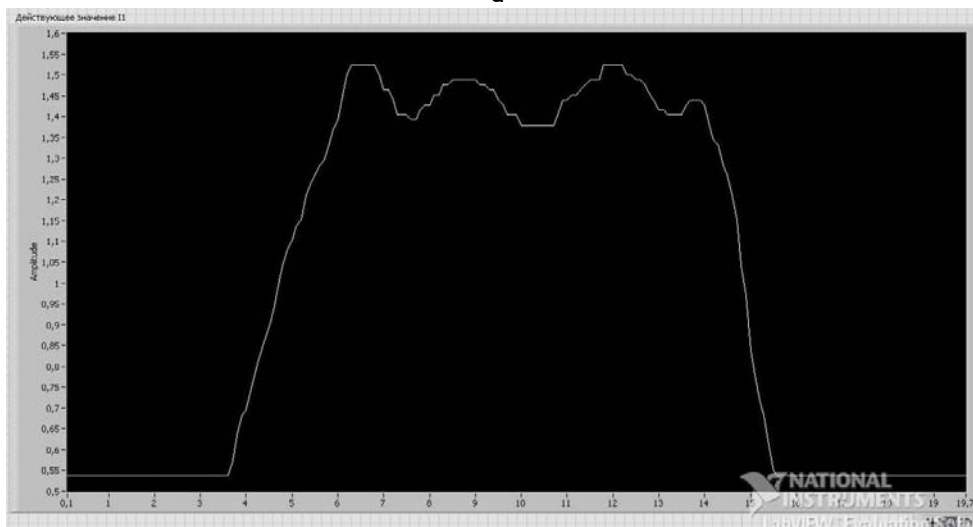
Таким образом, в соответствии с поставленной целью исследования получено оригинальное выражение, позволяющее определять расход сыпучих продуктов по измеряемому АЦП мгновенному значению тока статора асинхронного двигателя и вычисляемому программным комплексом LabView действующему значению тока статора с промежуточным вычислением скольжения. При этом удалось обеспечить линейную зависимость рас-

хода от фиксируемой физической величины (скольжения) при имеющей место нелинейной зависимости скольжения от измеряемого тока статора асинхронного двигателя.

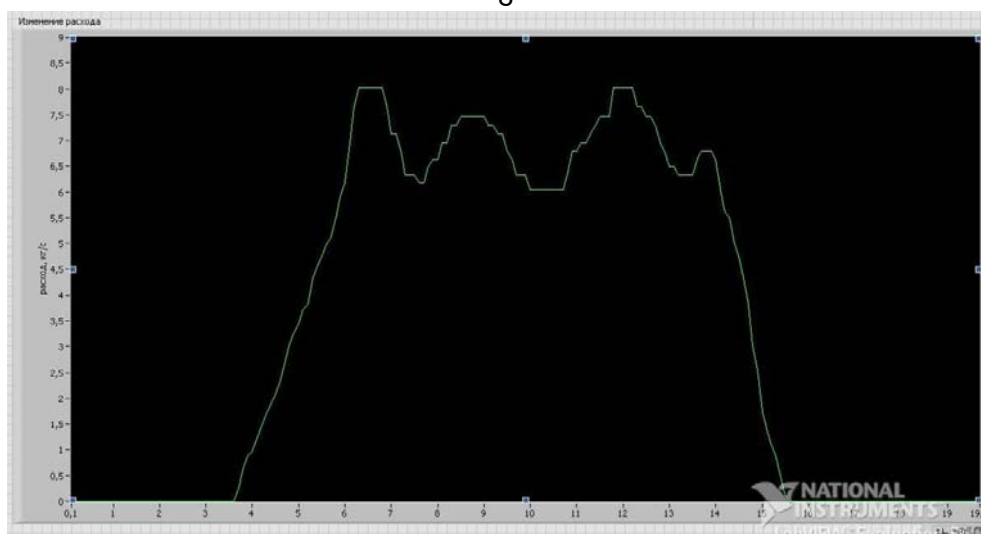
Полученные выражения позволяют определять расход при стационарных и нестационарных, эргодических и неэргодических случайных нагрузках.



а



б



в

Рис. 6. Оциллограммы двигателя АИР56В4 с крыльчаткой центробежного расходомера на валу: а – мгновенного значения тока статора i_s ; б – действующего значения тока статора I_s ; в – расхода сыпучего материала Q

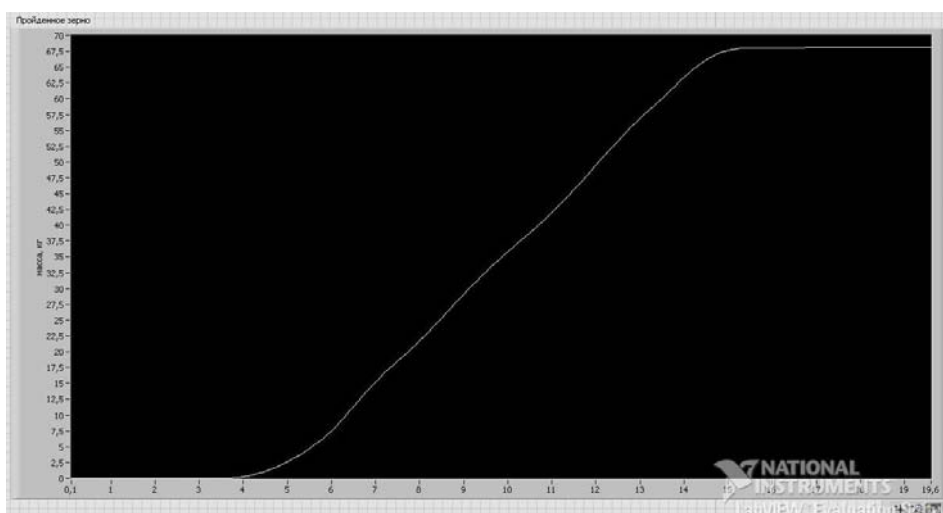


Рис. 7. График изменения массы зернового материала, прошедшего через расходомер

С целью расширения диапазона измерения расхода единичного центробежного расходомера целесообразно разработать математическую модель, описывающую связь расхода сыпучего материала с током статора асинхронного двигателя при частотном регулировании.

Библиографический список

- Багаев А.А., Лукьянов В.Г., Чернущ 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., Чернущ 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., Чернущ Р.С. Передаточная функция центробежного расходомера сыпучих сельскохозяйственных продуктов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2010. – № 1 (63). – С. 71-75.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Луткин Н.И. Расходомеры для зерна и сыпучих материалов. – М.: Колос, 1969. – 184 с.
- Багаев А.А., Лукьянов В.Г., Чернущ 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., Чернущ 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., Чернущ Р.С. Обоснование критерия выбора электродвигателя центробежного расходомера сыпучих сельскохозяйственных продуктов // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2/1. – С. 188-193.
- 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.: ил.
- Пат. 2532596 Российская Федерация, МПК G 01F 1/56 (2006.01). Способ контроля

расхода и дозирования сыпучих материалов / Багаев А.А., Чернусь Р.С., Костюков А.Ф.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО АГАУ. – № 2013122013/28; заявл. 13.05.2013; опубл. 10.11.2014, Бюл. № 31. – 7 с.: ил.

14. Багаев А.А., Чернусь Р.С. Математическая модель функциональной зависимости момента и мощности приводного асинхронного электродвигателя центробежного расходомера сыпучих сельскохозяйственных материалов от тока статора при частотном регулировании // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2015. – № 10 (132).

15. Онищенко Г.Б. Электрический привод. – М.: Академия, 2006. – 288 с.

16. Асинхронные электродвигатели общего назначения серии 4А [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://portal.tpu.ru/SHARED/u/UDUT/Tab2/induction_motors_4A.pdf.

References

1. Bagaev A.A., Luk'yanov V.G., Chernus' R.S. Ispol'zovanie momenta koriolisovykh sil dlya izmereniya massovogo raskhoda potoka zerna i produktov ego razmola // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2008. – № 4 (42). – S. 47-49.

2. Bagaev A.A., Luk'yanov V.G., Chernus' R.S. Dvigatel' postoyannogo toka kak pervichnyi preobrazovatel' krutyashchego momenta tsentrobezhnykh raskhodomerov sypuchikh sel'skokhozyaistvennykh produktov // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2008. – № 6 (44). – S. 62-65.

3. Bagaev A.A., Luk'yanov V.G., Chernus' R.S. Peredatochnaya funktsiya tsentrobezhnogo raskhodomera sypuchikh sel'skokhozyaistvennykh produktov // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2010. – № 1 (63). – S. 71-75.

4. Bagaev A.A., Chernus' R.S. Peredatochnaya funktsiya momenta soprotivleniya tsentrobezhnogo raskhodomera sypuchikh sel'skokhozyaistvennykh materialov pri osevoi zagruzke // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2011. – № 10 (84). – S. 86-89.

5. Bagaev A.A., Chernus' R.S. Trebovaniya k vremennym kharakteristikam i obosnovanie oblasti raspolozheniya polyusov peredatochnoi funktsii tsentrobezhnogo raskhodomera sypuchikh sel'skokhozyaistvennykh materialov // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2013. – № 10 (108). – S. 115-118.

6. Bagaev A.A., Chernus' R.S. Trebovaniya k informatsionnoi «podvizhnosti» tsentrobezhnogo raskhodomera sypuchikh sel'skokho-

zyaistvennykh materialov // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2014. – № 8 (118). – S. 105-110.

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

8. Lutkin N.I. Raskhodomery dlya zerna i sypuchikh materialov. – М.: Kolos, 1969. – 184 s.

9. Bagaev A.A., Luk'yanov V.G., Chernus' R.S. Rezul'taty matematicheskogo modelirovaniya krutyashchego momenta tsentrobezhnogo rskhodomera zerna i produktov ego razmola // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2009. – № 6 (56). – S. 54-57.

10. Bagaev A.A., Chernus' R.S. Uravnenie regressii momenta soprotivleniya tsentrobezhnogo raskhodomera sypuchikh sel'skokhozyaistvennykh materialov // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2010. – № 6 (68). – S. 83-87.

11. Bagaev A.A., Chernus' R.S. Obosnovanie kriteriya vybora elektrodvigatelya tsentrobezhnogo raskhodomera sypuchikh sel'skokhozyaistvennykh produktov // Polzunovskii vestnik. – 2011. – № 2/1. – S. 188-193.

12. Pat. 2532595 Rossiiskaya Federatsiya, MPK G 01F 1/56 (2006.01) Sposob nepreryvnogo kontrolya raskhoda i dozirovaniya sypuchikh materialov / A.A. Bagaev, R.S. Chernus', A.F. Kostyukov. Patentoobladatel' FGBOU VPO AGAU. – Zayavka: 2013122014/28, 13.05.2013; opublikovano: 10.11.2014 Byul. № 31. – 7 s.: il.

13. Pat. 2532596 Rossiiskaya Federatsiya, MPK G 01F 1/56 (2006.01) Sposob kontrolya raskhoda i dozirovaniya sypuchikh materialov / A.A. Bagaev, R.S. Chernus', A.F. Kostyukov. Patentoobladatel' FGBOU VPO AGAU. – Zayavka: 2013122013/28, 13.05.2013; opubl. 10.11.2014 Byul. № 31. – 7 s.: il.

14. Bagaev A.A., Chernus' R.S. Matematicheskaya model' funktsional'noi zavisimosti momenta i moshchnosti privodnogo asinkhronnogo elektrodvigatelya tsentrobezhnogo raskhodomera sypuchikh sel'skogokhozyaistvennykh materialov ot toka statora pri chastotnom regulirovanii // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2015. – № 10 (132).

15. Onishchenko G.B. Elektricheskii privod. – М.: Akademiya, 2006. – 288 s.

16. Asinkhronnye elektrodvigateli obshchego naznacheniya serii 4А [Elektronnyi resurs]. – Rezhim dostupa: http://portal.tpu.ru/SHARED/u/UDUT/Tab2/induction_motors_4A.pdf.