

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 621.9Т

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

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО РАСХОДОМЕРА СЫПУЧИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ В СЛУЧАЙНОМ РЕЖИМЕ

STATISTICAL POWER CHARACTERISTICS OF THE ELECTRIC MOTOR OF CENTRIFUGAL FLOWMETER OF LOOSE AGRICULTURAL MATERIALS IN RANDOM MODE

Ключевые слова: центробежный расходомер сыпучих материалов, случайный процесс, математическое ожидание и дисперсия мощности двигателя, спектральная плотность.

Случайный характер работы центробежных расходомеров сыпучих сельскохозяйственных материалов не позволяет без больших погрешностей описать мощность двигателя в условиях динамически изменяющейся нагрузки детерминированными функциями угловой скорости, тока и времени. В нерегулируемых электроприводах, к которым относится и центробежный расходомер, случайный режим работы порождается случайным характером момента статической нагрузки. В связи с этим статистическое описание нагрузки полностью определяет вероятностные характеристики процессов в подобном приводе. Целью работы является получение выражений для математического ожидания и дисперсии мощности электродвигателя в функции параметров силовой части электропривода и статистических законов изменения угловой скорости рабочего органа и моментов статической нагрузки. Анализ полученных в работе выражений показывает, что математическое ожидание процесса изменения мощности во времени определяется исключительно взаимной корреляционной связью процессов изменения угловой скорости рабочего органа и момента сопротивления и не зависит от математических ожиданий этих функций. Полученные выражения для математического ожидания и дисперсии позволяют определить среднеквадратичную величину мощности электродвигателя привода центробежного расходомера, затрачиваемую на обеспечение угловой скорости крыльчатки по случайному закону с известной спектральной плотностью при известных статистических характеристиках процесса изменения момента статической нагрузки и известной взаимной спектральной плотности про-

цессов изменения скорости рабочего органа и момента нагрузки.

Keywords: centrifugal flowmeter of loose materials, random process, mathematical expectation and motor power dispersion, spectral density.

A random operation pattern of centrifugal flowmeters of loose agricultural materials does not enable describing without low accuracy the motor power under the conditions of dynamically changing load by means of determinate functions of angular velocity, current and time. In fixed electric drives, including centrifugal flowmeter, the random operation mode is caused by the random nature of solid state load moment. Therefore, the statistical description of load completely determines the probabilistic characteristics of the processes in such drive. The research goal is to obtain the expressions for mathematical expectation and electric motor power dispersion in the functions of the parameters of the electric drive power unit and the statistical laws of the changes of angular velocity of the working body and solid state load moments. The analysis of the obtained expressions shows that the mathematical expectation of the power variation over time is determined solely by mutual correlation of the processes of the changes of angular velocity of the working body and solid state load moment and does not depend on the mathematical expectations of these functions. The obtained expressions for the mathematical expectation and dispersion allow determining the root-mean-square value of the electric motor power of the centrifugal flowmeter supplied to ensure impeller random angular velocity with known spectral density, known statistical characteristics of the change process of solid state load moment and known reciprocal spectral density of the processes of the change of the working body speed and load moment.

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

Чернущ Роман Сергеевич, ассистент, 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, Asst., Chair of Electrification and Automation of Agriculture, Altai State Agricultural University. E-mail: Chernus.Roman@mail.ru.

Введение

Перспективным средством измерения расхода сыпучих сельскохозяйственных продуктов является центробежный расходомер, принцип действия и схема которого представлены в работах [1, 2], при условии решения ряда научно-технических задач. Математическому моделированию момента сопротивления центробежного расходомера посвящены материалы, изложенные в работах [3-6]. Предпринята попытка обоснования критерия выбора мощности электродвигателя центробежного расходомера и оптимизации его параметров [7, 8]. В перечисленных выше работах законы движения и изменения статической нагрузки на валу двигателя описаны исключительно с детерминистских позиций.

Вместе с тем случайный характер работы некоторых сельскохозяйственных агрегатов, таких как дробилки и центробежные расходомеры, не позволяет без больших погрешностей описать динамически изменяющуюся нагрузку детерминированными функциями скорости, тока и времени. Это обстоятельство требует применения как детерминистских, так и вероятностных методов исследования.

В нерегулируемых электроприводах, к которым относится и центробежный расходомер, случайный режим работы порождается случайным характером момента статической нагрузки. В связи с этим статистическое описание нагрузки полностью определяет вероятностные характеристики процессов в подобном приводе.

В этом плане важное значение приобретают не только требования к энергетической пропускной способности силовой части двигателя центробежного расходомера, но и требования к информационному каналу расходомера, функциональным назначением которого является измерение расхода сыпучего продукта посредством цифровой обработки и интегрирования осциллограмм изменяющейся скорости двигателя или его тока [5, 7]. Свидетельством сказанного являются осциллограммы изменения угловой скорости двигателя различной мощности [9]. В той же работе по аналогии с понятием, введенном в [10], сформулированы требования к информационной «подвижности» электропривода центробежного расходомера сыпучих сельскохозяйственных материалов, в соответствии

с которой должны быть обеспечены не только энергетические, но и информационные возможности силовой части электропривода центробежного расходомера.

При этом предполагается, что система электропривода центробежного расходомера должна быть разомкнутой с энергетической и особенно с информационной точки зрения.

Таким образом, учитывая тот факт, что энергетические процессы в электроприводе одновременно являются и информационными, то есть представляют собой две стороны единого процесса, общая задача синтеза силовой части центробежного расходомера заключается в обеспечении вышеописанной «подвижности» при минимальной мощности приводного двигателя в условиях случайного характера изменения момента сопротивления, параметров механических и электромеханических характеристик двигателя.

Целью работы является получение выражений для математического ожидания и дисперсии мощности электродвигателя в функции параметров силовой части электропривода и статистических законов изменения угловой скорости рабочего органа и моментов статической нагрузки для формулирования технических требований к экспериментальной установке.

Методологической основой при выводе выражений для математического ожидания и дисперсии мощности электродвигателя центробежного расходомера является [10]. При этом уточнению и изменению в результате аналитических исследований подверглись две передаточные функции из трех известных (нижеследующие выражения (2) и (3) и шесть из девяти известных спектральных и взаимных спектральных функций (указанные ниже уравнения (9)).

Принятые допущения. При изложении материала работы приняты следующие допущения:

- рассматриваемые случайные процессы характеризуются нормальным законом распределения вероятностей;
- происходящие в силовой части электропривода центробежного расходомера являются стационарными в широком смысле;
- стационарные случайные процессы удовлетворяют гипотезе эргодичности;
- процессы движения крыльчатки расходомера и изменения статического момента

сопротивления на валу двигателя являются стационарно связанными;

- известными и неизменными являются момент инерции исполнительного органа-крыльчатки J_H , двигателя J_D , передаточное число редуктора z .

Результаты

математического моделирования

На рисунке представлена схема формирования случайного процесса измерения мощности на валу двигателя $P(t)$.

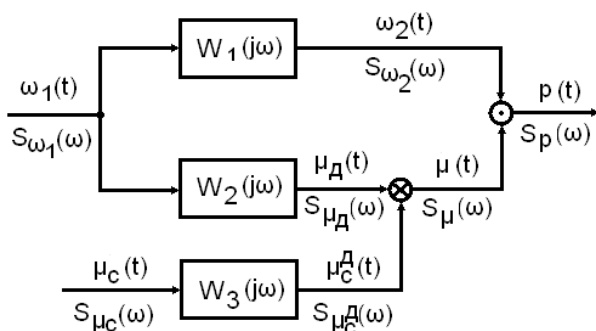


Рис. Структурная схема формирования случайного процесса измерения мощности на валу двигателя $P(t)$

В основу синтеза схемы положен процесс формирования мгновенного значения мощности $P(t)$, основывающийся на основном уравнении движения электрического привода:

$$P(t) = \omega_2(t) \cdot \mu(t) = \omega_2(t) \cdot \mu_c^d(t) + \omega_2(t) \cdot \mu_d(t), \quad (1)$$

где $\omega_2(t)$ – закон изменения угловой скорости вращения вала электродвигателя со спектральной плотностью $S_{\omega_2}(\omega)$ и математическим ожиданием $E_{\omega_2}(t)$;

$\mu(t)$ – закон изменения суммарного момента на валу электродвигателя со спектральной плотностью $S_{\mu}(\omega)$ и математическим ожиданием $E_{\mu}(t)$;

$\mu_c^d(t)$ – закон изменения момента статической нагрузки на валу электродвигателя со спектральной плотностью $S_{\mu_c^d}(\omega)$ и математическим ожиданием $E_{\mu_c^d}(t)$;

$\mu_d(t)$ – закон изменения динамического момента на валу электродвигателя со спектральной плотностью $S_{\mu_d}(\omega)$ и математическим ожиданием $E_{\mu_d}(t)$.

На рисунке также обозначено: $\mu_c(t)$ – закон изменения момента статической нагрузки

$$R_p(\tau) = E\omega(t + \tau) \cdot \mu_c^d(t + \tau) \cdot \omega(t) \cdot \mu_c^d(t) + E\omega(t + \tau) \cdot \mu_c^d(t + \tau) \cdot \omega(t) \mu_d(t) + E\omega(t + \tau) \cdot \mu_d(t + \tau) \cdot \omega(t) \cdot \mu_c^d(t) + E\omega(t + \tau) \cdot \mu_d(t + \tau) \cdot \omega(t) \cdot \mu_d(t) - [E\omega(t) \cdot \mu_c^d(t) + E\omega(t) \cdot \mu_d(t)]^2. \quad (6)$$

на валу крыльчатки центробежного расходомера со спектральной плотностью $S_{\mu_c}(\omega)$ и математическим ожиданием $E_{\mu_c}(t)$; $\omega_1(t)$ – закон изменения угловой скорости вращения крыльчатки (рабочего органа) со спектральной плотностью $S_{\omega_1}(\omega)$ и математическим ожиданием $E_{\omega_1}(t)$.

Принятые к применению передаточные функции представляют собой следующее:

$$W_1(p) = W_1(j\omega) = \frac{\Omega_2(j\omega)}{\Omega_1(j\omega)} = z; \quad (2)$$

$$W_2(p) = W_2(j\omega) = \frac{M_d(j\omega)}{\Omega_1(j\omega)} = Jz p; \quad (3)$$

$$W_3(p) = W_3(j\omega) = \frac{M_c^d(j\omega)}{M_c(j\omega)} = \frac{1}{z}, \quad (4)$$

где $\Omega_1(j\omega) \stackrel{\Delta}{=} \omega_1(t)$ – изображение Лапласа закона изменения угловой скорости вращения рабочего органа;

$\Omega_2(j\omega) \stackrel{\Delta}{=} \omega_2(t)$ – изображение Лапласа закона изменения угловой скорости вращения вала электродвигателя;

$M_d(j\omega) \stackrel{\Delta}{=} \mu_d(t)$ – изображение Лапласа закона изменения динамического момента на валу электродвигателя;

$M_c^d(j\omega) \stackrel{\Delta}{=} \mu_c^d(t)$ – изображение Лапласа закона изменения момента статической нагрузки на валу электродвигателя;

$M_c(j\omega) \stackrel{\Delta}{=} \mu_c(t)$ – изображение Лапласа закона изменения момента статической нагрузки на валу крыльчатки центробежного расходомера;

z – передаточное число редуктора;
 J – суммарный момент инерции, приведённый к валу двигателя, $J = J_D + J_H/z^2$, где J_D – момент инерции двигателя; J_H – момент инерции рабочего органа – крыльчатки.

Стационарность процесса $P(t)$, описываемого выражением (1), следует из доказанной в [10] стационарности функций $\omega_1(t)$ и $\mu_c(t)$, $\mu_d(t)$ и $\mu_c^d(t)$; $\mu(t)$ и $\omega_2(t)$.

Тогда корреляционная функция процесса измерения мощности на валу двигателя с учётом выражения (1) может быть записана следующим образом:

$$R_p(\tau) = E[P(t + \tau) - EP(t + \tau)] \cdot [P(t) - EP(t)] = EP(t + \tau)P(t) - [EP(t)]^2. \quad (5)$$

Согласно схеме формирования функции $P(t)$ её корреляционная функция принимает вид [10]:

С учетом сделанного выше предположения о том, что случайные процессы $\omega_i(t)$ и $\mu_c(t)$ имеют нормальный (или близкий к нормальному) закон распределения, можно допустить, что четыре первых слагаемых выражения (6) могут быть представлены гауссовским случайным вектором.

В результате применения к составляющим выражения (6) формулы разложения четырехмерного вектора [11] и ряда преобразований, а также с учетом $E\omega_2(t)=0$ (как следствие стационарности процесса $\omega_i(t)$) и некоррелированности при $\tau=0$ функций $\omega_2(t)$ с её производной $\frac{d\omega_2(t)}{d\mu_\delta(t)}$ из выражения (6) получаем:

$$R_p(\tau) = R_{\omega_2}(\tau) \left[R_{\mu_c^\delta}(\tau) + \langle E\mu_c^\delta(t) \rangle^2 \right] + R_{\omega_2\mu_c^\delta}(\tau)R_{\mu_c^\delta\omega_2}(\tau) + R_{\omega_2}(\tau)R_{\mu_c^\delta\mu_\delta}(\tau) + R_{\omega_2\mu_\delta}(\tau)R_{\mu_c^\delta\omega_2}(\tau) + R_{\omega_2}(\tau)R_{\mu_\delta\mu_c^\delta}(\tau) + R_{\omega_2\mu_c^\delta}(\tau)R_{\mu_\delta\omega_2}(\tau) + R_{\omega_2}(\tau)R_{\mu_\delta}(\tau) + R_{\omega_2\mu_\delta}(\tau)R_{\mu_\delta\omega_2}(\tau), \quad (7)$$

где $R_{\omega_2\mu_c^\delta}$; $R_{\mu_c^\delta\omega_2}$; $R_{\mu_c^\delta\mu_\delta}$; $R_{\omega_2\mu_\delta}$; $R_{\mu_\delta\mu_c^\delta}$; $R_{\mu_\delta\omega_2}$ – взаимные корреляционные функции соответствующих процессов.

От корреляционной функции (7) с помощью формулы свёртки можно перейти к спектральной плотности:

$$S_p(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\omega_2}(\omega - \lambda)S_{\mu_c^\delta}(\lambda)d\lambda + \int_{-\infty}^{\infty} S_{\omega_2\mu_c^\delta}(\omega - \lambda)S_{\mu_c^\delta\omega_2}(\lambda)d\lambda + \int_{-\infty}^{\infty} S_{\omega_2}(\omega - \lambda)S_{\mu_c^\delta\mu_\delta}(\lambda)d\lambda + \int_{-\infty}^{\infty} S_{\omega_2\mu_\delta}(\omega - \lambda)S_{\mu_c^\delta\omega_2}(\lambda)d\lambda + \int_{-\infty}^{\infty} S_{\omega_2}(\omega - \lambda)S_{\mu_\delta\mu_c^\delta}(\lambda)d\lambda + \int_{-\infty}^{\infty} S_{\omega_2\mu_c^\delta}(\omega - \lambda)S_{\mu_\delta\omega_2}(\lambda)d\lambda + \int_{-\infty}^{\infty} S_{\omega_2}(\omega - \lambda)S_{\mu_\delta}(\lambda)d\lambda + \int_{-\infty}^{\infty} S_{\omega_2\mu_\delta}(\omega - \lambda)S_{\mu_\delta\omega_2}(\lambda)d\lambda + S_{\omega_2}(\omega)[E\mu_c^\delta(t)]^2. \quad (8)$$

Выражения для передаточных функций (2)-(4) позволяют выразить спектральные плотности процессов, входящих в формулу (8), через спектральную плотность процесса $\omega_i(t)$ и спектральную плотность взаимокоррелированных процессов $\omega_2(t)$ и $\mu_c(t)$:

$$S_{\omega_2} = z^2 S_{\omega_1}(\omega); S_{\omega_2\mu_\delta}(\omega) = jz^2 J\omega S_{\omega_1}(\omega); S_{\mu_\delta\omega_2}(\omega) = -jz^2 J\omega S_{\omega_1}(\omega); S_{\mu_\delta}(\omega) = J^2 z^2 \omega^2 S_{\omega_1}(\omega); S_{\mu_\delta\mu_c^\delta}(\omega) = jJ\omega S_{\omega_1\mu_c}(\omega); \quad (9)$$

$$S_{\mu_c^\delta\mu_\delta}(\omega) = jJ\omega S_{\mu_c\omega_1}(\omega); S_{\mu_c^\delta}(\omega) = \frac{1}{z^2} S_{\mu_c}(\omega); S_{\mu_c^\delta\omega_2}(\omega) = -S_{\mu_c}\omega_1(\omega); S_{\omega_2\mu_c^\delta}(\omega) = -S_{\omega_1\mu_c}(\omega).$$

Последний член в выражении (8) может быть представлен следующим образом с учетом первого члена формулы (9):

$$S_{\omega_2}(\omega)[E\mu_c^\delta(t)]^2 = S_{\omega_1}(\omega)[E\mu_c(t)]. \quad (10)$$

Результатом подстановки (9) и (10) в формулу (8) является:

$$S_p(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\omega_1}(\omega - \lambda)S_{\mu_c}(\lambda)d\lambda + \int_{-\infty}^{\infty} S_{\omega_1}(\omega - \lambda)S_{\mu_c\omega_1}(\lambda)d\lambda + Jz^2 \int_{-\infty}^{\infty} S_{\omega_1}(\omega - \lambda)\lambda jS_{\mu_c\omega_1}(\lambda)d\lambda - Jz^2 \int_{-\infty}^{\infty} j(\omega - \lambda)S_{\omega_1}(\omega - \lambda)S_{\mu_c\omega_1}(\lambda)d\lambda + Jz^2 \int_{-\infty}^{\infty} S_{\omega_1}(\omega - \lambda)\lambda jS_{\mu_c\omega_1}(\lambda)d\lambda + Jz^2 \int_{-\infty}^{\infty} S_{\omega_1\mu_c}(\omega - \lambda)\lambda jS_{\omega_1}(\lambda)d\lambda + J^2 z^4 \int_{-\infty}^{\infty} (\omega - \lambda)S_{\omega_1}(\omega - \lambda)\lambda S_{\omega_1}(\lambda)d\lambda + J^2 z^4 \int_{-\infty}^{\infty} S_{\omega_1}(\omega - \lambda)\lambda^2 S_{\omega_1}(\lambda)d\lambda + S_{\omega_1}(\omega)[E\mu_c(t)]. \quad (11)$$

Исключив детальный анализ каждого составляющего формулы (11) в результате ряда преобразований, получим:

$$S_p(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\omega_1}(\omega - \lambda)S_{\mu_c}(\lambda)d\lambda + \int_{-\infty}^{\infty} ReS_{\omega_1\mu_c}(\omega - \lambda)ReS_{\mu_c\omega_1}(\lambda)d\lambda + \int_{-\infty}^{\infty} ImS_{\omega_1\mu_c}(\omega - \lambda)ImS_{\omega_1\mu_c}(\lambda)d\lambda + Jz^2 \int_{-\infty}^{\infty} e^{j90} ImS_{\mu_c\omega_1}(\lambda) \cdot S_{\omega_1}(\omega - \lambda)d\lambda + J^2 z^4 \left(\int_{-\infty}^{\infty} (\omega - \lambda)S_{\omega_1}(\omega - \lambda)\lambda S_{\omega_1}(\lambda)d\lambda + \int_{-\infty}^{\infty} S_{\omega_1}(\omega - \lambda)\lambda^2 S_{\omega_1}(\lambda)d\lambda \right) + S_{\omega_1}(\omega)[E\mu_c(t)]. \quad (12)$$

Таким образом, дисперсия мощности двигателя центробежного расходомера или средний квадрат отклонения мощности от ее математического ожидания описывается выражением:

$$D[P] = J^2 z^4 \int_{-\infty}^{\infty} T_1(\omega) d\omega + \int_{-\infty}^{\infty} T_2(\omega) d\omega + \int_{-\infty}^{\infty} T_3(\omega) d\omega + \int_{-\infty}^{\infty} T_4(\omega) d\omega + Jz^2 \int_{-\infty}^{\infty} e^{j90} T_5(\omega) d\omega + S_{\omega_1}(\omega) [E\mu_c(t)], \quad (13)$$

где

$$T_1 = \int_{-\infty}^{\infty} (\omega - \lambda) S_{\omega_1}(\omega - \lambda) \lambda S_{\omega_1}(\lambda) d\lambda + \int_{-\infty}^{\infty} S_{\omega_1}(\omega - \lambda) \lambda^2 S_{\omega_1}(\lambda) d\lambda;$$

$$T_2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\omega_1}(\omega - \lambda) S_{\mu_c}(\lambda) d\lambda;$$

$$T_3 = \int_{-\infty}^{\infty} \text{Re} S_{\omega_1 \mu_c}(\omega - \lambda) \text{Re} S_{\mu_c \omega_1}(\lambda) d\lambda;$$

$$T_4 = \int_{-\infty}^{\infty} \text{Im} S_{\omega_1 \mu_c}(\omega - \lambda) \text{Im} S_{\mu_c \omega_1}(\lambda) d\lambda;$$

$$T_5 = \int_{-\infty}^{\infty} e^{j90} \text{Im} S_{\mu_c \omega_1}(\lambda) \cdot S_{\omega_1}(\omega - \lambda) d\lambda.$$

Первое слагаемое выражения (13) представляет собой динамическую мощность, затрачиваемую на обеспечение угловой скорости ротора двигателя и крыльчатки расходомера по заданному закону при отсутствии статической нагрузки, значение которой определяется инерционными свойствами двигателя, исполнительного органа, передаточным числом редуктора и спектральной плотностью процесса $\omega_1(t)$.

Второе, третье и четвертое слагаемые уравнения (13) могут интерпретироваться как составляющие мощности на перемещение безынерционного исполнительного органа по статистически заданному закону движения безынерционным электродвигателем при заданной функции статической нагрузки. Эта составляющая мощности зависит от взаимной корреляционной связи процессов $\omega_1(t)$ и $\mu_c(t)$ и не зависит от параметров силовой части привода.

Пятое слагаемое характеризует связь статической и динамической нагрузок.

Шестое слагаемое определяет составляющую мощности, затрачиваемую на преодоление части статической нагрузки, равной ее математическому ожиданию, при скорости вращения крыльчатки, равной ее среднеквадратичному значению. Последняя составляющая не зависит от передаточного отношения редуктора, от инерционных свойств двигателя и крыльчатки.

В силу стационарности функции $\omega_1(t)$ и некоррелированности между собой процессов $\omega_1(t)$ и $\mu_c(t)$ математическое ожидание мощности двигателя записывается в следующем виде:

$$E P(t) = E \omega_2(t) \frac{1}{z} [\mu_c(t) - E\mu_c(t)] = \frac{1}{z} R_{\omega_2 \mu_c}(0). \quad (14)$$

Учитывая известную связь между взаимной корреляционной функцией процессов при нулевом сдвиге и их взаимной спектральной плотностью, получим:

$$E P(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega \text{Im} S_{\omega_1 \mu_c}(j\omega) d\omega. \quad (15)$$

Анализ выражения (15) показывает, что математическое ожидание процесса изменения мощности во времени определяется исключительно взаимной корреляционной свя-

зью процессов $\omega_1(t)$ и $\mu_c(t)$ и не зависит от математических ожиданий этих функций.

Выводы

Полученные выражения математического ожидания (15) и дисперсии (13) позволяют определить среднеквадратичную величину мощности электродвигателя привода центробежного расходомера, затрачиваемую на обеспечение угловой скорости крыльчатки по случайному закону со спектральной плотностью $S_{\omega_1}(\omega)$, при известных параметрах процесса изменения момента статической нагрузки $S_{\mu_c}(\omega)$ и $E\mu_c(t)$ и известной взаимной спектральной плотности $S_{\omega_1 \mu_c}(\omega)$ при заданных передаточном числе редуктора, моментах инерции двигателя и рабочего органа, воспринимающей поток сыпучего материала крыльчатки.

Для определения математического ожидания и дисперсии мощности электродвигателя, изменяющейся по случайному закону, экспериментальная установка должна быть снабжена датчиками угловой скорости и момента, цифровым двухканальным осциллографом с возможностью сохранения экспериментальных осциллограмм. В этом случае искомые статистические характеристики мощности могут быть получены известными численными методами [12].

Библиографический список

1. Багаев А.А., Лукьянов В.Г., Чернущев 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., Чернущев Р.С. Передаточная функция центробежного расходомера сыпучих сельскохозяйственных продуктов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2010. – № 1 (63). – С. 71-75.
3. Багаев А.А., Лукьянов В.Г., Чернущев Р.С. Результаты математического моде-

лирования крутящего момента центробежного расходомера зерна и продуктов его размола // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2009. – № 6 (56). – С. 54-57.

4. Багаев А.А., Чернусь Р.С. Уравнение регрессии момента сопротивления центробежного расходомера сыпучих сельскохозяйственных материалов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2010. – № 6 (68). – С. 83-87.

5. Багаев А.А., Лукьянов В.Г., Чернусь 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.

6. Багаев А.А., Лукьянов В.Г., Чернусь 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.

7. Багаев А.А., Чернусь Р.С. Обоснование критерия выбора электродвигателя центробежного расходомера сыпучих сельскохозяйственных продуктов // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2/1. – С. 188-193.

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

10. Ратнер Н.И. Расчет электроприводов в случайных режимах. – Л.: Энергия, 1969. – 127 с.

11. Лэнинг Д., Беттин Р. Случайные процессы в задачах автоматического управления. – М.: Изд-во иностранной л-ры, 1958. – 320 с.

12. Mathews J.H., Fink K.D. Numerical methods using MATLAB. Prentice Hall, 1999.

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. Peredatochnaya funktsiya tsentrobezhnogo raskhodomera sypuchikh sel'skokhozyaistvennykh produktov // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2010. – № 1 (63). – S. 71-75.

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

4. 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.

5. 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.

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

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

8. 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.

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

10. Ratner N.I. Raschet elektropriwodov v sluchainykh rezhimakh. – L.: Energiya, 1969. – 127 s.

11. Lening Dzh.Kh., Bettin R.G. Sluchainye protsessy v zadachakh avtomaticheskogo upravleniya. – M.: IL, 1958. – 782 s.

12. Mathews J.H., Fink K.D. Numerical methods using MATLAB. Prentice Hall, 1999.

