

Рис. 3. Результаты испытаний на износ различных масляных композиций при нагрузке 5 Н:

- – чистое масло M-8B;
- △ – масло M-8B + Деста;
- – масло M-8B + нанокобальт 0,2%



УДК 621.9Т

А.А. Багаев,
Р.С. Чернущ

ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО РАСХОДОМЕРА СЫПУЧИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОСЕВОЙ ЗАГРУЗКЕ

Ключевые слова: передаточная функция, центробежный расходомер, датчик, точность измерения, расход зерна, переходный процесс, дифференциальное уравнение, ячейка, сила.

Перспективным средством измерения расхода сыпучих сельскохозяйственных материалов является центробежный расходомер при условии повышения его точности. Повышение точности невозможно без анализа динамических свойств системы «двигатель-крыльчатка». Динамические свойства двигателей достаточно хорошо изучены [1]. Вместе с тем основной трудностью является отсутствие сведений о динамическом поведении воспринимающего органа – крыльчатки.

Известно, что момент сопротивления центробежного расходомера зависит от конструктивных параметров крыльчатки и физических свойств сыпучего материала [2].

В результате реализации численного эксперимента было получено уравнение регрессии момента сопротивления в виде

полинома второго порядка [3]. Переменными факторами являются: угловая скорость крыльчатки ω_2 , расход материала Q , угол изгиба лопасти турбинки относительно радиального направления α_n , коэффициенты трения скольжения f_1 и восстановления частиц ε . Полученные выражения не позволяют исследовать динамические процессы в электромеханической системе «электрический двигатель – редуктор – крыльчатка расходомера», поскольку эти уравнения не являются дифференциальными, не позволяют получить передаточную функцию момента сопротивления и осуществить имитационное моделирование переходных процессов в центробежном расходомере. В связи с этим целью работы является получение системы дифференциальных уравнений для поля центробежных сил и передаточной функции момента сопротивления.

Для получения дифференциальных уравнений воспользуемся подходом, изложенным в работе [4]. При рассмотрении явлений, происходящих в поле цен-

тробежных сил, удобно использовать цилиндрическую систему координат.

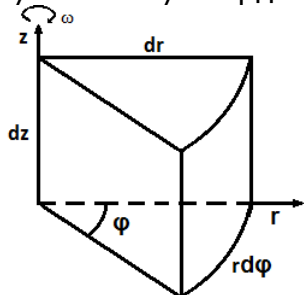


Рис. 1. Цилиндрическая система координат

На рисунке 1 изображен элемент объёма сыпучего материала, находящегося между лопастями крыльчатки и ограниченный тремя парами смежных координатных поверхностей. Выделенный элементарный объём ячейки сыпучего материала с ребрами dr , dz , $rd\varphi$ имеет объём $V = rd\varphi \cdot dr \cdot dz$. При этом будем считать, что загрузка осуществляется по оси z .

На материал, находящийся в состоянии покоя относительно лопастей крыльчатки, действует ряд сил: F_1 – сила, обусловленная действием давления на любую из граней выделенного объёма; F_2 – центробежная сила; F_3 – сила тяжести. При движении сыпучего материала в окружном или радиальном направлении появляются Кориолисовы силы инерции F_4 . Давление и, соответственно, сила есть функция всех трех координат

$$F = f(r, \varphi, z) = \rho \cdot rd\varphi \cdot dr \cdot dz \cdot a, \quad \text{где } \rho \text{ – плотность; } a \text{ – ускорение.}$$

Тогда на основе общих принципов механики сумма проекций сил на соответствующие оси, действующих на движущийся элемент объёма сыпучего материала, равна произведению массы материала M на её ускорение.

На основании этого запишем:

$$F_r = F_{1r} + F_2 + F_{4\varphi}; \quad (1)$$

$$F_\varphi = F_{1\varphi} + F_{4r}; \quad (2)$$

$$F_z = F_{1z} + F_3; \quad (3)$$

где F_{1r} , F_{1z} , $F_{1\varphi}$ – проекции силы F_1 на оси цилиндрической системы координат;

$F_{4\varphi}$, F_{4r} – проекции силы F_4 на оси цилиндрической системы координат.

Или в дифференциальной форме:

$$\rho \cdot rd\varphi \cdot dr \cdot dz \cdot a_r = -\partial p / \partial r \cdot rd\varphi \cdot dr \cdot dz + \rho \omega^2 r \cdot rd\varphi \cdot dr \cdot dz + 2\omega v_\varphi \rho \cdot rd\varphi \cdot dr \cdot dz; \quad (4)$$

$$\rho \cdot rd\varphi \cdot dr \cdot dz \cdot a_\varphi = -1/r \cdot \partial p / \partial \varphi \cdot rd\varphi \cdot dr \cdot dz - 2\omega v_r \rho \cdot rd\varphi \cdot dr \cdot dz; \quad (5)$$

$$\rho \cdot rd\varphi \cdot dr \cdot dz \cdot a_z = -\partial p / \partial z \cdot rd\varphi \cdot dr \cdot dz - \rho g \cdot rd\varphi \cdot dr \cdot dz, \quad (6)$$

где a_r , a_φ , a_z – ускорения по соответствующим осям координат;

ω – угловая скорость;

v_r , v_φ – проекции линейной скорости на соответствующие оси цилиндрической системы координат.

С учётом $M = \rho V = \rho \cdot rd\varphi \cdot dr \cdot dz$ уравнения (4)-(6) принимают вид:

$$M \cdot a_r = -\partial p / \partial r \cdot V + \omega^2 r \cdot M + 2\omega v_\varphi \cdot M; \quad (7)$$

$$M \cdot a_\varphi = -1/r \cdot \partial p / \partial \varphi \cdot V - 2\omega v_r \cdot M; \quad (8)$$

$$M \cdot a_z = -\partial p / \partial z \cdot V - \rho g V. \quad (9)$$

Для получения уравнений баланса моментов домножим обе части уравнения (7) на r , уравнения (8) – на $rd\varphi$, уравнения (9) – на $L=z$.

Тогда получим:

$$M \cdot a_r \cdot r = -\partial p / \partial r \cdot V \cdot r + \omega^2 r^2 \cdot M + 2\omega v_\varphi M \cdot r; \quad (10)$$

$$M \cdot a_\varphi \cdot rd\varphi = -1/r \cdot \partial p / \partial \varphi \cdot V \cdot rd\varphi - 2\omega v_r \cdot M \cdot rd\varphi; \quad (11)$$

$$M \cdot a_z \cdot L = -\partial p / \partial z \cdot VL - \rho g LV. \quad (12)$$

Рассмотрим уравнения (10)-(12) отдельно. Момент сопротивления M_c , проекции линейной скорости v_r и v_φ , угловая скорость ω и ускорение a_r могут быть определены следующим образом:

$$M_{cr} = \partial p / \partial r \cdot V \cdot r, \quad v_r = \frac{dr}{dt}, \quad \omega = \frac{d\varphi}{dt}, \quad v_\varphi = r \frac{d\varphi}{dt} = r\omega,$$

$$a_r = \frac{dv_r}{dt} - \frac{v_\varphi^2}{r} = \frac{d^2r}{dt^2} - r\omega^2.$$

Тогда уравнение (10) после соответствующих преобразований примет вид:

$$\frac{M_{cr}}{M} = 4 \cdot \omega^2 r^2 - r \frac{d^2r}{dt^2}. \quad (13)$$

Передаточная функция момента сопротивления по оси r равна:

$$W_1 = \left(\frac{M_c}{M} \right)_r = 4 \cdot \omega^2 r^2 - r^2 p^2. \quad (14)$$

В уравнении (11) введем следующие

обозначения $a_\varphi = r \frac{d\omega}{dt}$, $M_{c\varphi} = \partial p / \partial \varphi \cdot V$ и запишем его в виде:

$$\frac{M_{c\varphi}}{M} = -r^2 \frac{d\omega}{dt} - 2r\omega \frac{dr}{dt}. \quad (15)$$

Передаточная функция момента сопротивления по оси φ :

$$W_2 = \left(\frac{M_c}{M} \right)_\varphi = -3p\omega \cdot r^2. \quad (16)$$

В уравнении (12) обозначим

$M_{cL} = \partial p / \partial z \cdot VL$, $a_z = \frac{d^2L}{dt^2}$ и после преобразований получим:

$$\frac{M_{cL}}{M} = -L \frac{d^2L}{dt^2} - gL. \quad (17)$$

Передаточная функция момента сопротивления по оси φ :

$$W_3 = \left(\frac{M_c}{M} \right)_L = -p^2 L^2 - gL. \quad (18)$$

Для проведения имитационного моделирования в среде MatLab составлена структурная схема электромеханической системы «двигатель – крыльчатка» (рис. 2) с учетом полученных выше передаточных функций момента сопротивления (14), (16) и (18).

Параметры двигателя следующие: мощность асинхронного двигателя – 1,1 кВт, момент инерции суммарный – 0,026 кг*м, номинальная частота напряжения питания – 50 Гц, активное сопро-

тивление обмотки статора –

$R_1 = 0,118 \text{ Ом}$, напряжение на обмотке

статора – $U_1 = 220 \text{ В}$, угловая скорость

вращения поля статора – $\omega_0 = 157 \text{ рад / с}$.

Результаты моделирования представлены на рисунке 3 а, б, где отчетливо определяются время пуска и момент приложения мгновенной единичной нагрузки.

Анализ осциллограмм переходных процессов позволяет сделать следующий вывод: при неизменных параметрах двигателя и момента сопротивления показатели качества переходных процессов при измерении скорости и тока различны. При мгновенном приложении единичной нагрузки скорость изменяется по аperiodическому закону, а процесс изменения тока носит колебательный затухающий характер. Кроме того, время достижения установившегося значения переменной значительно меньше при регистрации тока. Следовательно, меньшей инерционностью и меньшей постоянной времени обладает процесс изменения тока, поэтому в качестве выходной измеряемой переменной целесообразно использовать именно ток статора.

Выводы

Получены дифференциальные уравнения момента сопротивления центробежного расходомера в цилиндрической системе координат и передаточные функции момента сопротивления по координатным осям. Синтезирована структурная схема электромеханической системы «двигатель – крыльчатка» и осуществлено имитационное моделирование. Установлено, что в качестве выходной измеряемой переменной целесообразно использовать ток статора.

Библиографический список

1. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – 2-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 272 с.
2. Багаев А.А., Лукьянов В.Г., Чернусь Р.С. Передаточная функция центробежного расходомера сыпучих сельскохозяйственных продуктов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2010. – № 1 (63). – С. 71-75.
3. 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.

4. Соколов В.И. Центрифугирование. – М.: Химки, 1976. – 408 с.

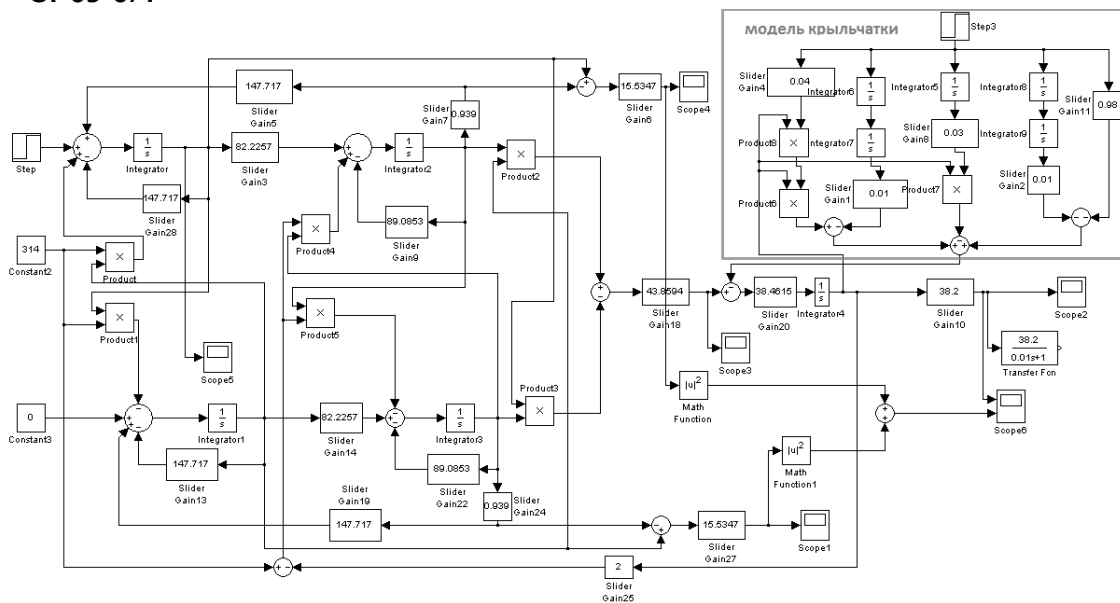


Рис. 2. Схема расходомера в среде MatLab

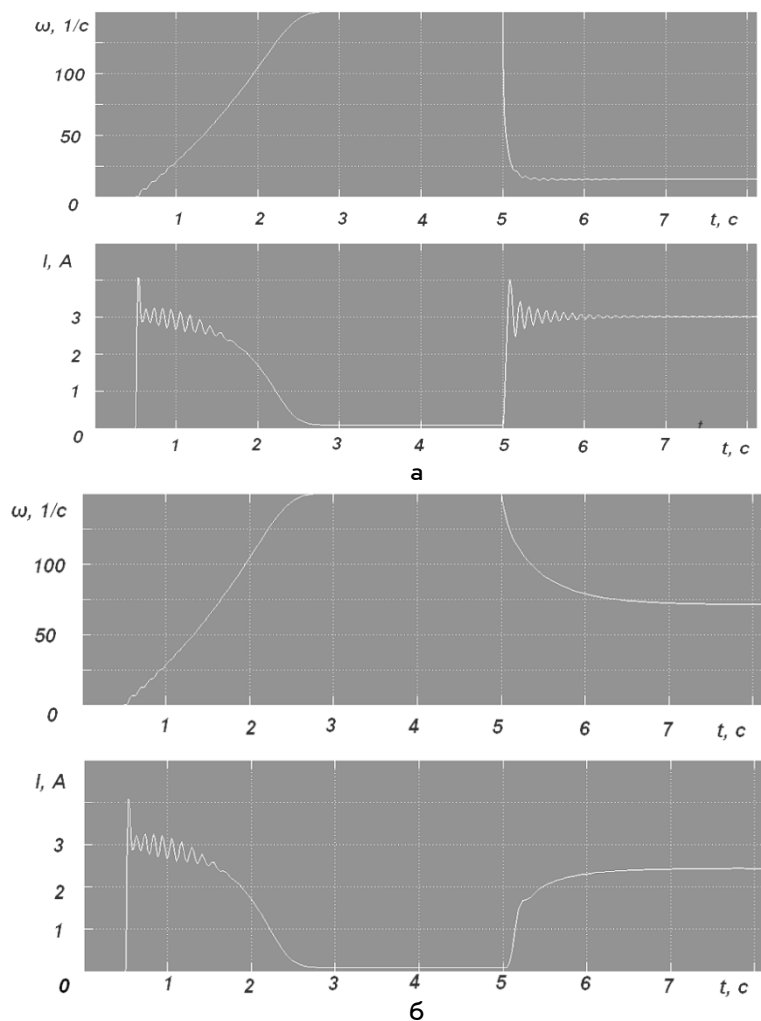


Рис. 3. Осциллограммы скорости двигателя и тока статора при пуске двигателя и приложении единичной нагрузки: а – длина крыльчатки $L=0,1$ м; радиус крыльчатки $R=0,1$ м; б – $L=0,2$ м; $R=0,2$ м