

Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2019. – № 5 (337). – С. 30-36.

6. Вистовская, В. П. Оптимизация параметров ферментализации подсолнечной лузги с использованием методов математического моделирования / В. П. Вистовская, Д. С. Кожемякин, Е. П. Каменская. – DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.012. – Текст: непосредственный // Ползуновский вестник. – 2025. – № 1. – С. 103-109.

7. Kumar, P., Barrett, D. M., Delwiche, M. J., Stroeve, P. (2009). Methods for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Efficient Hydrolysis and Biofuel Production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(8), 3713–3729. <https://doi.org/10.1021/ie801542g>.

8. Сарафанова Л.А. Пищевые добавки: Энциклопедия. – 3-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург: ГИОРД, 2022. – 808 с. – Текст: непосредственный.

9. Mokhefi, A. (2024). Hydrodynamic and thermal performance analysis of an inclined anchor impeller designed for yield stress food mixing applications. *Food and Bioprocess Processing*. 143: 255-270. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2023.12.006>.

References

1. Pal R. (2024). Non-Newtonian behavior of suspensions and emulsions: Review of different mechanisms. *Advances in Colloid and Interface Science*. 333: 103299. DOI: 10.1016/j.cis.2024.103299.

2. Denn, M. M., Morris, J. F. (2014). Rheology of non-Brownian suspensions. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 5,

203–228. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-060713-040221>.

3. Bhargava N., et al. (2021). Advances in application of ultrasound in food processing: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 70: 105293. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2020.105293.

4. Matveenko V.N., Kirsanov E.A. Reologiya strukturirovannykh dispersnykh sistem. – Moskva: Tekhnosfera, 2025. – 498 s.

5. Mishchenko E.V., Mishchenko V.Ya., Pechurin A.S. Modelirovanie peremeshivayushchego ustroystva v srede Matlab/Simulink/Simmechanics // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2019. – No. 5 (337). – S. 30-36.

6. Vistovskaya V.P., Kozhemyakin D.S., Kamenskaya E.P. Optimizatsiya parametrov fermentoliza podsolnechnoy luzgi s ispolzovaniem metodov matematicheskogo modelirovaniya // Polzunovskiy vestnik. – 2025. – No. 1. – S. 103-109. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.012.

7. Kumar, P., Barrett, D. M., Delwiche, M. J., Stroeve, P. (2009). Methods for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Efficient Hydrolysis and Biofuel Production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(8), 3713–3729. <https://doi.org/10.1021/ie801542g>.

8. Sarafanova L.A. Pishchevye dobavki: Entsiklopediya. – 3-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург: ГИОРД, 2022. – 808 с.

9. Mokhefi, A. (2024). Hydrodynamic and thermal performance analysis of an inclined anchor impeller designed for yield stress food mixing applications. *Food and Bioprocess Processing*. 143: 255-270. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2023.12.006>.



УДК 621.9Т

DOI: 10.53083/1996-4277-2026-261-7-83-89

Р.С. Чернусь, А.А. Багаев

R.S. Chernus, A.A. Bagaev

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА НА БЫСТРОДЕЙСТВИЕ ЦЕНТРОБЕЖНОГО РАСХОДОМЕРА СЫПУЧИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

EVALUATION OF ELECTROMECHANICAL TRANSIENT PROCESS PARAMETER INFLUENCE ON THE RESPONSE TIME OF A CENTRIFUGAL FLOW METER FOR LOOSE AGRICULTURAL MATERIALS

Ключевые слова: центробежный расходомер сыпучих материалов, переходный процесс, механическая характеристика, угловая скорость.

Keywords: centrifugal flow meter of loose materials, transient process, mechanical characteristic, angular velocity.

Важным элементом поточных технологических процессов, связанных с дозированием, измерением расхода, транспортировки сыпучих сельскохозяйственных материалов, является датчик расхода. Перспективным средством измерения расхода является центробежный датчик. Характер поступления сыпучего материала в рабочий орган расходомера-датчика является пульсирующим, когда материал на крыльчатку поступает порциями. Неравномерная механическая нагрузка сопровождается изменением координат двигателя датчика, таких как момент, ток, скорость. При этом двигатель работает в режиме перехода из одного установившегося режима работы в другой. Целью является установление зависимости параметров электромеханических переходных процессов в центробежном расходомере сыпучих сельскохозяйственных материалов от соотношения электромеханической и электромагнитной постоянной времени датчика. Используются основные положения теории переходного процесса и электропривода. Приводится вывод переходной функции центробежного расходомера сыпучих продуктов из основного уравнения движения электропривода и формулы, связывающей момент сопротивления с расходом материала в расходомере. Анализ полученных результатов показывает, что при реализации колебательного переходного процесса время нарастания до заданного значения тока и угловой скорости составляет 0,01 с, время переходного процесса 0,03 с и перерегулирование 3%, что свидетельствует о более высоком быстродействии датчика расхода. При аperiodическом характере переходного процесса наблюдается равенство времени нарастания до заданного значения и времени переходного процесса 0,06 с, что превышает аналогичные величины при колебательном процессе. Обеспечение выполнения условия превышения электромагнитной постоянной времени в 4 раза электромеханической постоянной времени, достигается соответствующим выбором суммарного приведенного к валу двигателя момен-

том инерции, жесткости механической характеристики двигателя, индуктивности и сопротивления двигателя.

An important element of continuous processes related to dosing, flow measurement, and transportation of loose agricultural materials is the flow sensor. A promising means of measuring flow is a centrifugal sensor. The nature of the loose material entering the working element of the flow meter-sensor is pulsating when the material enters the impeller in portions. Uneven mechanical load is accompanied by a change in the coordinates of the sensor motor, such as torque, current, and speed. In this case, the motor operates in the mode of transition from one steady mode of operation to another. The research goal is to determine the dependence of the parameters of electromechanical transients in a centrifugal flow meter of loose agricultural materials on the ratio of the electromechanical and electromagnetic time constant of the sensor. The main provisions of the theory of transient process and electric drive are used. The derivation of the transition function of the centrifugal flow meter of loose products from the main equation of motion of the electric drive and the formula connecting the moment of resistance with the flow rate of the material in the flowmeter is presented. The analysis of the obtained results shows that when implementing an oscillatory transient process, the rise time to a given current value and angular velocity is 0.01 seconds, the transient time is 0.03 seconds and overshoot is 3% which indicates a higher speed of response of the flow sensor. With the aperiodic nature of the transient process, the equality of the rise time to a given value and the transient time of 0.06 s is observed which exceeds similar values during the oscillatory process. Provision of condition exceeding electromagnetic time constant 4 times of electromechanical time constant is achieved by appropriate selection of total moment of inertia reduced to motor shaft, rigidity of engine mechanical characteristic, inductance and resistance of the motor.

Чернусь Роман Сергеевич, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ Барнаул, Российская Федерация, e-mail: Chernus.Roman@mail.ru.

Багаев Андрей Алексеевич, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: Bagaev710@mail.ru.

Chernus Roman Sergeevich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: Chernus.Roman@mail.ru.

Bagaev Andrey Alekseevich, Dr. Tech. Sci., Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: Bagaev710@mail.ru.

Введение

Важным элементом поточных технологических процессов, связанных с дозированием, измерением расхода, транспортировки сыпучих сельскохозяйственных материалов, является датчик расхода.

Среди известных средств измерения расхода выделяется центробежный расходомер сыпучих материалов [1, 2].

Характер поступления сыпучего материала в рабочий орган расходомера-датчика является пульсирующим, когда материал на крыльчатку поступает порциями, т.е. неравномерная механическая нагрузка сопровождается изменением

координат двигателя датчика, таких как момент, ток, скорость. При этом двигатель работает в режиме перехода из одного установившегося режима работы в другой с иными координатами, т.е. в переходном процессе, характеризующимся невозможностью мгновенного перехода в силу электромагнитной и механической инерционности.

Для повышения быстродействия центробежного датчика расхода длительность переходного процесса необходимо сокращать.

Электромеханические переходные процессы могут быть апериодическими и колебательными затухающими, что непосредственно оказывает влияние на показатели качества переходных процессов.

Целью является установление зависимости параметров электромеханических переходных процессов в центробежном расходомере сыпучих сельскохозяйственных материалов от соотношения электромеханической и электромагнитной постоянной времени датчика.

Методы и средства

Использованы основные положения теории электромеханических переходного процесса и электропривода.

Математическое моделирование

Уравнение перемещения вращающихся масс расходомера принимает вид [3, 4]:

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

где J_{Σ} – значение момента инерции расходомера;

ω – значение угловой скорости, рад/с;

M_{∂} , M_c – значения момента двигателя и сопротивления соответственно, Н·м;

Уравнение для определения значения момента на линейном рабочем участке механической характеристики двигателя асинхронного типа принимает следующий вид [4]:

$$T_{\partial} \frac{dM_{\partial}}{dt} + M_{\partial} = \beta(\omega_0 - \omega), \quad (2)$$

где T_{∂} – электромагнитная постоянная времени;

β – жесткость механической характеристики двигателя;

ω_0 , ω – синхронная угловая скорость и скорость крыльчатки, рад/с.

Для расчета электромагнитной и электромеханической постоянной времени используются следующие уравнения:

$$T_{\partial} = \frac{L}{R}; \quad T_M = \frac{J_{\Sigma}}{\beta}, \quad (3)$$

где L – значение индуктивности обмотки двигателя, Гн;

R – значение активного сопротивления двигателя, Ом;

J_{Σ} – значение суммарного момента инерции, кг·м².

Показатель жесткости механической характеристики двигателя:

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega}, \quad (4)$$

где ΔM – значение приращения момента, Н·м;

$\Delta \omega$ – значение приращения угловой скорости, рад/с.

С помощью уравнения (2) можно рассчитать значение угловой скорости:

$$\omega = \omega_0 - \frac{1}{\beta} \left(T_{\partial} \frac{dM_{\partial}}{dt} + M_{\partial} \right). \quad (5)$$

Момент сопротивления центробежного датчика M_c выступает в качестве функции расхода сыпучего материала [5]:

$$M_c = Qr^2\omega_c \left(1 - s_{nc} \frac{Q}{Q_n} \right), \quad (6)$$

где Q – значение расхода материала, кг/ч;

Q_n – номинальное значение расхода, кг/ч;

r – радиус крыльчатки датчика, м;

s_{nc} – скольжение при номинальной нагрузке относительно ω_c ,

ω_c – угловая скорость холостого хода крыльчатки.

Благодаря постановке в (1) выражений (5) и (6) получаются уравнения:

$$\begin{aligned} J_{\Sigma} \frac{d}{dt} \left(\omega_0 - \frac{1}{\beta} \left(T_{\partial} \frac{dM_{\partial}}{dt} + M_{\partial} \right) \right) &= \\ &= M_{\partial} - Qr^2\omega_c \left(1 - s_{nc} \frac{Q}{Q_n} \right) \\ - \frac{J_{\Sigma} T_{\partial}}{\beta} \frac{d^2 M_{\partial}}{dt^2} - \frac{J_{\Sigma}}{\beta} \frac{dM_{\partial}}{dt} &= M_{\partial} - Qr^2\omega_c \left(1 - s_{nc} \frac{Q}{Q_n} \right); \\ \frac{d^2 M_{\partial}}{dt^2} + \frac{1}{T_{\partial}} \frac{dM_{\partial}}{dt} + \frac{\beta}{J_{\Sigma} T_{\partial}} M_{\partial} &= \frac{\beta r^2 \omega_c Q}{J_{\Sigma} T_{\partial}} \left(1 - s_{nc} \frac{Q}{Q_n} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Особенности переходного процесса определены в рамках единичного воздействия на расход и согласно с начальным условием $\omega(0) = \omega_0$.

В результате получается линейное, неоднородное, дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\frac{d^2 M_\delta}{dt^2} + \frac{1}{T_\Sigma} \frac{dM_\delta}{dt} + \frac{\beta}{J_\Sigma T_\Sigma} M_\delta = \frac{\beta r^2 \omega_c}{J_\Sigma T_\Sigma} \left(1 - \frac{s_{nc}}{Q_n} \right). \quad (8)$$

Решение этого уравнения – сумма общего решения однородного уравнения и частного решения неоднородного уравнения.

Однородное уравнение:

$$\frac{d^2 M_\delta}{dt^2} + \frac{1}{T_\Sigma} \frac{dM_\delta}{dt} + \frac{\beta}{J_\Sigma T_\Sigma} M_\delta = 0. \quad (9)$$

Характеристическое уравнение:

$$k^2 + \frac{1}{T_\Sigma} k + \frac{\beta}{J_\Sigma T_\Sigma} = 0, \quad (10)$$

$$\text{откуда } k_{1,2} = -\frac{1}{2T_\Sigma} \pm \sqrt{\frac{1}{4T_\Sigma^2} - \frac{\beta}{J_\Sigma T_\Sigma}}. \quad (11)$$

Общее решение (9) имеет вид:

$$M_{\delta.одн} = C_1 e^{k_1 t} + C_2 e^{k_2 t}. \quad (12)$$

Пусть $M_{\delta.част} = A$

$$\frac{\beta}{J_\Sigma T_\Sigma} A = \frac{\beta r^2 \omega_c}{J_\Sigma T_\Sigma} \left(1 - \frac{s_{nc}}{Q_n} \right). \quad (13)$$

Частное решение уравнения (8):

$$M_{\delta.част} = A = r^2 \omega_c \left(1 - \frac{s_{nc}}{Q_n} \right). \quad (14)$$

Полное решение уравнения (8):

$$M_\delta = C_1 e^{k_1 t} + C_2 e^{k_2 t} + r^2 \omega_c \left(1 - \frac{s_{nc}}{Q_n} \right). \quad (15)$$

Решение для угловой скорости следует из выражения (3) с учетом (15):

$$\omega = \omega_0 - \frac{1}{\beta} \left(T_\Sigma C_1 k_1 e^{k_1 t} + T_\Sigma C_2 k_2 e^{k_2 t} + C_1 e^{k_1 t} + C_2 e^{k_2 t} + r^2 \omega_c \left(1 - \frac{s_{nc}}{Q_n} \right) \right)$$

$$\text{или } \omega = \omega_0 - \frac{1}{\beta} \left((T_\Sigma k_1 + 1) C_1 e^{k_1 t} + (T_\Sigma k_2 + 1) C_2 e^{k_2 t} + r^2 \omega_c \left(1 - \frac{s_{nc}}{Q_n} \right) \right). \quad (16)$$

Константы C_1 и C_2 находятся исходя из начального условия:

$$\omega(0) = \omega_0 - \frac{1}{\beta} \left((T_\Sigma k_1 + 1) C_1 + (T_\Sigma k_2 + 1) C_2 + r^2 \omega_c \left(1 - \frac{s_{nc}}{Q_n} \right) \right) = \omega_0;$$

$$(T_\Sigma k_1 + 1) C_1 + (T_\Sigma k_2 + 1) C_2 = -r^2 \omega_c \left(1 - \frac{s_{nc}}{Q_n} \right). \quad (17)$$

Применив начальное условие $\omega(0) = \omega_0$ к уравнению (3):

$$\omega_0 = \omega_0 - \frac{1}{\beta} \left(T_\Sigma \frac{dM_\delta}{dt} + M_\delta \right);$$

$$T_\Sigma \frac{dM_\delta}{dt} + M_\delta = 0;$$

$$M_\delta = e^{-\frac{t}{T_\Sigma}}.$$

При нулевом значении времени $M_\delta = 1$.

С учетом этого уравнение (15) упростится:

$$M_\delta(0) = C_1 + C_2 + r^2 \omega_c \left(1 - \frac{s_{nc}}{Q_n} \right) = 1. \quad (18)$$

Из системы уравнений (17) и (18) находятся константы:

$$C_1 = 1 - r^2 \omega_c \left(1 - \frac{s_{nc}}{Q_n} \right) + \frac{k_1 + \frac{1}{T_\Sigma} - k_1 r^2 \omega_c \left(1 - \frac{s_{nc}}{Q_n} \right)}{k_2 - k_1}; \quad (19)$$

$$C_2 = \frac{k_1 + \frac{1}{T_\Sigma} - k_1 r^2 \omega_c \left(1 - \frac{s_{nc}}{Q_n} \right)}{k_2 - k_1}. \quad (20)$$

Особенности специфики переходного процесса определяются с помощью корней уравнения (11). Они могут быть комплексные сопряженные или действительные отрицательные. В случае когда $m = T_\Sigma / T_\Sigma < 4$, процесс приобретает статус колебательного затухающего. В другом случае он будет аperiодическим.

Результаты и обсуждение

В качестве электродвигателя центробежного расходомера принят АИР56В4 номинальной мощностью $P_H = 180$ Вт, также значением номинальной частоты вращения $n_H = 1350$ об/мин. Параметры схемы замещения двигателя определены в соответствии с методикой [6, 7]. Значение электромагнитной постоянной времени $T_\Sigma = 0,0126$.

Осуществляется рассмотрение двух вариантов практической реализации моделирования в среде программирования Maple. Двигатель не будет заменен, т.е. $T_3 = \text{const}$. Будут изменены общие параметры крыльчатки, нагрузки, что предполагает изменение значения электро-механической временной постоянной T_M .

Первый вариант. Параметры крыльчатки: радиус крыльчатки $r = 0,07$ м, момент инерции расходомера $J = 0,00023$ кг·м². Параметры расходомера: $Q_H = 1,4$ кг/с; $\omega_0 = \omega_c = 154,9$ рад/с; $s_{HC} = 0,0878$.

$$T_M = 0,00323 < 4T_3 = 0,0504.$$

На рисунке 1 приведена осциллограмма переходного процесса угловой скорости.

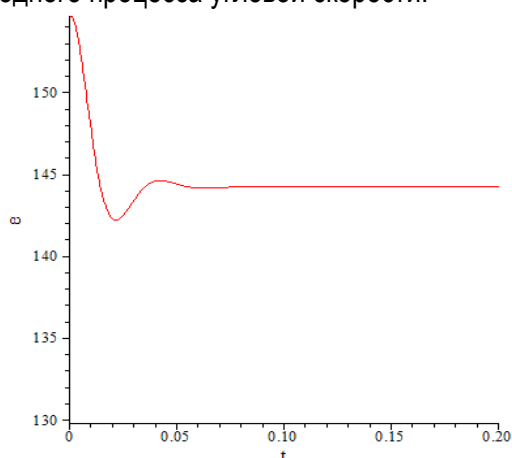


Рис. 1. Осциллограмма колебательного переходного процесса изменения угловой скорости ω центробежного расходомера при $T_M < 4T_3$

Вычисленный параметр $m = 0,26$ предполагает колебательный характер переходного процесса. Согласно осциллограмме, время достижения установившегося значения $t = 0,04$.

Осциллограмма переходного процесса тока статора, изображенная на рисунке 2, получена с учетом уравнения электро-механической характеристики датчика расхода [8] и формулы (16).

Анализ осциллограмм на рисунках 2 и 3 позволяет констатировать: время нарастания до заданного значения составляет $t_n = 0,01$ с, время переходного процесса с перерегулированием $\sigma = 3\%$ от заданного значения равно $t_{\Pi\Pi} = 0,03$ с.

Второй вариант. Параметры крыльчатки: $r = 0,09$ м, $J = 0,041$ кг·м². Параметры расходомера: $Q_H = 2,78$ кг/с; $\omega_0 = \omega_c = 154,9$ рад/с; $s_{HC} = 0,0878$.

$$T_M = 0,0576 > 4T_3 = 0,0504.$$

Осциллограммы на рисунках 3 и 4 позволяют определить: $t_n = 0,07$ с, $t_{\Pi\Pi} = 0,06$ с.

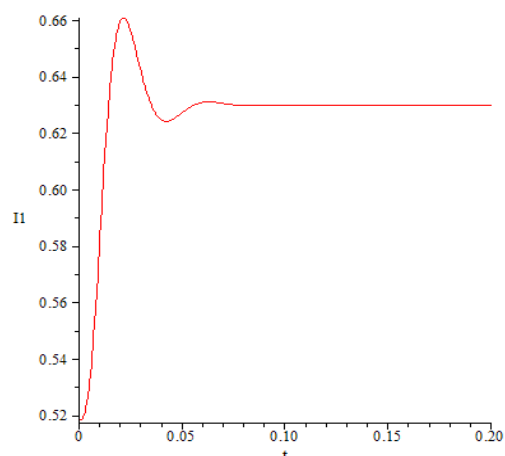


Рис. 2. Осциллограмма колебательного переходного процесса изменения тока центробежного расходомера при $T_M < 4T_3$

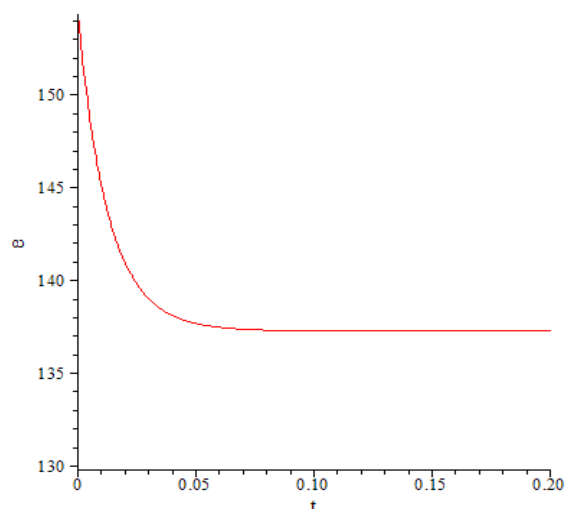


Рис. 3. Осциллограмма аperiodического переходного процесса изменения угловой скорости центробежного расходомера при $T_M > 4T_3$

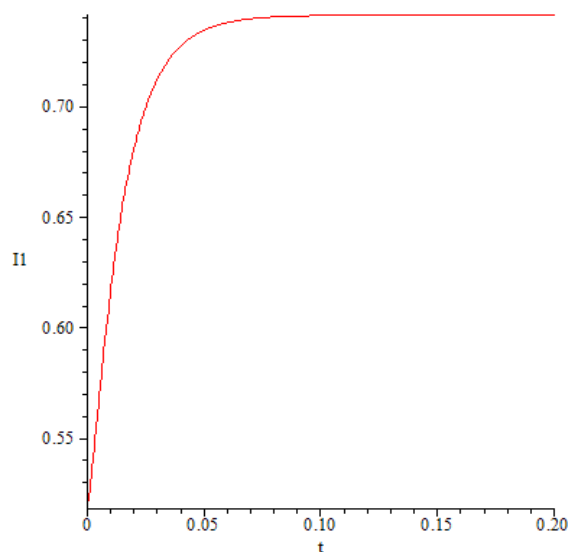


Рис. 4. Осциллограмма аperiodического переходного процесса изменения тока центробежного расходомера при $T_M > 4T_3$

Выводы

Анализ полученных результатов показывает, что при реализации колебательного переходного процесса при $T_m < 4T_s$ время нарастания до заданного значения тока и угловой скорости составляет $t_n = 0,01$ с, время переходного процесса – $t_{пп} = 0,03$ с и перерегулирование – $\sigma = 3\%$, что свидетельствует о более высоком быстродействии датчика расхода.

При аperiodическом характере переходного процесса при $T_m > 4T_s$ наблюдается равенство $t_n = t_{пп} = (0,06...0,07)$ с, что превышает аналогичные величины при колебательном процессе.

Обеспечение выполнения условия $T_m < 4T_s$ достигается соответствующим выбором суммарного момента инерции J , жесткости механической характеристики двигателя β , индуктивности L и сопротивления R двигателя.

Библиографический список

1. Багаев, А. А. Основы теории центробежных расходомеров сыпучих материалов / А. А. Багаев, Р.С. Чернусь, В. Г. Лукьянов. – Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2013. – 83 с. – EDN WVMBFD. – Текст: непосредственный
2. Багаев, А. А. Использование момента Кориолисовых сил для измерения массового расхода потока зерна и продуктов его размола / А. А. Багаев, В. Г. Лукьянов, Р. С. Чернусь. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2008. – № 4 (42). – С. 47-49. – EDN IUDBBV.
3. Онищенко, Г. Б. Электрический привод: учебник: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» / Г. Б. Онищенко; Г. Б. Онищенко. – 2-е изд., стер. – Москва: Академия, 2008. – (Высшее профессиональное образование. Электротехника). – ISBN 978-5-7695-4919-9. – EDN QMKAKV. – Текст: непосредственный.
4. Ключев, В. И. Теория электропривода / В. И. Ключев. – Москва: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с. – Текст: непосредственный.
5. Луткин, Н.И. Расходомеры для зерна и сыпучих материалов / Н. И. Луткин. – Москва: Колос, 1969. – 184 с. – EDN YKHNBK. – Текст: непосредственный.
6. Кабдин, Н.Е. Электрический привод: учебник / Н. Е. Кабдин. – 2-е издание, переработан-

ное и дополненное. – Москва: Редакция журнала «Механизация и электрификация сельского хозяйства», 2017. – 234 с. – ISBN 978-5-9909008-8-2. – EDN RWLHHW. – Текст: непосредственный.

7. Осипов, В. С. Аналитический метод расчета параметров схемы замещения трехфазных асинхронных двигателей серии АИР / В. С. Осипов. – Текст: непосредственный // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2017. – № 2 (54). – С. 108-120. – EDN ZGBWJL.

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

References

1. Bagaev, A.A. Osnovy teorii tsentrobezhnykh raskhodomeroi sypuchikh materialov / A. A. Bagaev, R.S. Chernus, V.G. Lukyanov. – Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2013. – 83 s.
2. Bagaev, A.A. Ispolzovanie momenta Koriolisovykh sil dlya izmereniya massovogo raskhoda potoka zerna i produktov ego razmola / A.A. Bagaev, V.G. Lukyanov, R.S. Chernus // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2008. – No. 4 (42). – S. 47-49.
3. Onishchenko, G.B. Elektricheskiy privod: uchebnik dlya studentov vysshih uchebnykh zavedeniy, obuchayushchikhsya po napravleniyu podgotovki "Elektrotehnika, elektromekhanika i elektrotehnologii" / G.B. Onishchenko; G.B. Onishchenko. – 2-e izd., ster. – Moskva: Akademiya, 2008.
4. Klyuchev, V.I. Teoriya elektroprivoda / V.I. Klyuchev. – Moskva: Energoatomizdat, 2001. – 704 s.
5. Lutkin, N.I. Raskhodomery dlya zerna i sypuchikh materialov / N.I. Lutkin. – Moskva: Kolos, 1969. – 184 s.
6. Kabdin, N.E. Elektricheskiy privod: uchebnik / N.E. Kabdin. – 2-e izd., pererab. i dop.. – Moskva: Redaktsiya zhurnala "Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva", 2017. – 234 s.
7. Osipov, V.S. Analiticheskiy metod rascheta parametrov skhemy zameshcheniya trekhfaznykh asinkhronnykh dvigateley serii AIR / V. S. Osipov // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnich-

eskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki. – 2017. – No. 2 (54). – S. 108-120.

8. Bagaev, A.A. Opredelenie raskhoda sypuchikh selskokhozyaystvennykh materialov putem izmereniya toka statora asinkhronnogo

privoda tsentrobezhnogo raskhodomera / A.A. Bagaev, R.S. Chernus // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2015. – No. 12 (134). – S. 132-138.



УДК 631.372:629.114.2

DOI: 10.53083/1996-4277-2026-261-7-89-96

Е.С. Поликутина, С.В. Щитов, З.Ф. Кривуца,
В.А. Щитова, М.Д. Корольков
E.S. Polikutina, S.V. Shchitov, Z.F. Krivutsa,
V.A. Shchitova, M.D. Korolkov

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕВОЗКИ ЖИДКИХ ИЛИ «НАЛИВНЫХ» ГРУЗОВ ТРАНСПОРТНЫМИ СРЕДСТВАМИ ПО ПОВЕРХНОСТЯМ, ИМЕЮЩИМ ПОПЕРЕЧНЫЙ УКЛОН

FEATURES OF TRANSPORTATION OF LIQUID OR BULK CARGO BY VEHICLES ON SURFACES WITH A TRANSVERSE SLOPE

Ключевые слова: транспортное средство, угол наклона поверхности, жидкий груз, поперечная устойчивость, опрокидывающий момент

Анализируется проблема улучшения поперечной устойчивости специализированной техники, предназначенной для перевозки жидких сред, особенно при частичном заполнении резервуаров. В отличие от перевозки твёрдых предметов, расположение которых в кузове остаётся статичным (за исключением сыпучих тел), что позволяет достаточно точно рассчитать устойчивость, так как центр масс груза неизменен. Транспортировка жидких грузов сопряжена с уникальными рисками при движении по дорожному полотну, имеющему отклонение от горизонтальной плоскости. Главная причина неустойчивости заключается в отклонении центра масс жидкости внутри емкости, за счет возникновения дополнительного опрокидывающего момента. Условием сохранения поперечной устойчивости является равенство или превосходство восстанавливающего момента над опрокидывающим моментом. В ходе экспериментов выявлена зависимость между уровнем заполнения цистерны и величиной смещения центра масс жидкости при различных критических углах наклона машины. Установлено, что при росте предельного угла наклона до 20° центр масс смещается на 0,1 м, если цистерна заполнена лишь на 40%. При повышении уровня заполнения в рамках изученных параметров смещение центра масс сокращается на четверть (25%), что позитивно сказывается на поперечной устойчивости, улучшает стабильность и маневренность автоцистерны. Также выяснено, что увеличение объема заполнения на 35% снижает смещение

центра масс на 18%, что дает возможность безопасно эксплуатировать транспорт на дорогах с уклоном, превышающим стандартный на 12%. Полученные данные позволяют моделировать устойчивость техники при неполной загрузке во время движения по кривой траектории с учетом допустимых продольных углов наклона.

Keywords: vehicle, surface slope angle, liquid cargo, lateral stability, overturning moment.

The issue of improving the lateral stability of specialized vehicles designed for transporting liquids, especially when the tanks are partially filled, is discussed. Unlike the transportation of solid objects which location within the vehicle body remains static (with the exception of bulk solids) and that allows for a fairly accurate stability calculation since the center of mass of the cargo remains constant, transporting liquid cargo is associated with unique risks when driving on a road surface that deviates from the horizontal plane. The main cause of instability is the deviation of the center of mass of the liquid within the tank due to the occurrence of an additional overturning moment. To maintain lateral stability, the righting moment must be equal to or greater than the overturning moment. Experiments revealed a relationship between the tank fill level and the magnitude of the displacement of the liquid's center of mass at various critical vehicle inclination angles. It was found that with an increase of the critical inclination angle to 20°, the center of mass shifts by 0.1 m if the tank is only 40% full. With an increased fill level within the studied parameters, the center of gravity shift is reduced by a quarter (25%) which positively impacts lateral stability and im-