

Рисунок 5 – Изменение температуры факела T_ϕ от влагосодержания W

Заключение. Проведенные исследования позволят оптимизировать технологии получения эмульсии на основе нефтесодержащих отходов с помощью ударных волн, возникающих при работе пневматического излучателя и сжигания топлива с добавлением приготовленной эмульсии в котельных установках. Это, в свою очередь, позволит не только решить проблему охраны труда и здоровья работников предприятий от воздействия отработавших нефтесодержащих продуктов и растворов технических моющих средств, но и снизить концентрацию оксидов азота в дымовых газах котельных установок.

Выводы:

- уменьшению размеров неразрушенных капель в эмульсии, а следовательно, и повышению ее стабильности способствуют: увеличение волнового числа максимально неустойчивого возмущения и критерия Струхала, повышение плотности более легкой жидкости, уменьшение скорости течения при одновременном росте круговой частоты ее пульсации и снижение величины поверхностного натяжения жидкости;
- увеличение влагосодержания топлива, сжигаемого в котельных установках, за счет использования в качестве добавки к топливу мелкодисперсной эмульсии на основе отработавших нефтесодержащих продуктов позволило снизить содержание оксидов азота в дымовых газах котла на 24–45 %;

- снижение концентрации оксидов азота достигнуто за счет сокращения времени горения капель влагосодержащего топлива, уменьшения длины факела и снижения температуры факела по сравнению с горением обезвоженного топлива.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Иванов, В.П. Охрана труда рабочих и защита окружающей среды от вредного влияния нефтесодержащих отходов : научное издание / В.П. Иванов, В.А. Дронченко. – Новополоцк : ПГУ, 2016. – 248 с.
2. Информация о сборе отработанных масел в РБ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.belta.by/>. – Дата доступа : 15.11.2016.
3. Нефтепродукты отработанные. Общие технические условия: ГОСТ 21046–86. – Введ. 01.01.87 – Москва : Издательство стандартов, 2004. – 5 с.
4. Охрана окружающей среды и природопользование. Отходы. Правила использования углеводородсодержащих отходов в качестве топлива : ТКП 17.11-01-2009 (02120). – Введ. 03.03.2009. – Минск : Минприроды, 2009. – 16 с.
5. Дронченко, В.А. Влияние содержания воды на стабильность эмульсии на основе отработавших нефтесодержащих продуктов / В.А. Дронченко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. – Сер. В: Промышленность. Прикладные науки. – 2015. – № 11. – С. 82–86.
6. Стирикович, М.А. Энергетика и окружающая среда / М.А. Стирикович // Теплоэнергетика. – 1975. – № 4. – С. 2–5.
7. Сигал, И.Я. Очистка промышленных выбросов от оксидов серы и азота / И.Я. Сигал, В.И. Славин, В.В. Шило. – Харьков : Оригинал, 1999. – 142 с.
8. Иванов, В.П. Утилизация сточных вод с нефтесодержащими отходами эмульгированием и сжиганием / В.П. Иванов, В.А. Дронченко // Вестник Белорус. гос. с.-х. акад. – 2015. – № 4. – С. 141–146.
9. Семенов, В.И. Снижение выбросов оксидов азота при работе котельных установок / В.И. Семенов, В.А. Дронченко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. – Сер. В: Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – № 3. – С. 186–190.
10. Иванов, В.П. Разрушение поверхности раздела двух несмешивающихся жидкостей при эмульгировании / В.П. Иванов, В.А. Дронченко // Вестник БрГТУ. – 2014. – № 4 (88): Машиностроение. – С. 38–42.

Материал поступил в редакцию 27.10.2017

DRONCHENKO V.A. Obtaining finely divided emulsions based on oil-containing waste and its recycling

The results of theoretical and experimental studies allowed to develop the process of obtaining emulsion with the required stability on the basis of oil-containing waste generated at the site of disassembly and cleaning of process equipment using shock waves generated by a pneumatic transducer. The results of the study of the process of using the resulting emulsion as an additive to the main fuel when operating a boiler plant. The addition of the emulsion based on oily waste to the primary fuel increases the efficiency of combustion and reduces the emission of nitrogen oxides into the atmosphere.

УДК 681.5+531.3.01

Прокопеня О.Н., Воробей И.С.

К ИССЛЕДОВАНИЮ ДИНАМИКИ ДВУХКОЛЕСНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Введение. Мобильные роботы широко применяются в различных сферах. Для работ в недетерминированных условиях в настоящее время развивается особый класс робототехнических систем, называемых в технической литературе "мобильными роботами", отличительной чертой которых является способность к перемещениям в пространстве. В зависимости от назначения они могут иметь разнообразную конструкцию [1–3]. Роботы отличаются количеством ко-

лес, которые могут быть приводными или не приводными. Поворот колес может осуществляться разными способами на разные углы. Известны конструкции с двигательными модулями, состоящими из пары колес с индивидуальными приводами [4, 5]. Такой модуль способен перемещаться поступательно при равенстве скоростей колес и поворачиваться за счет разности скоростей.

Прокопеня Олег Николаевич, к.т.н., зав. кафедрой автоматизации технологических процессов и производств Брестского государственного технического университета.

Воробей Иван Сергеевич, магистрант Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

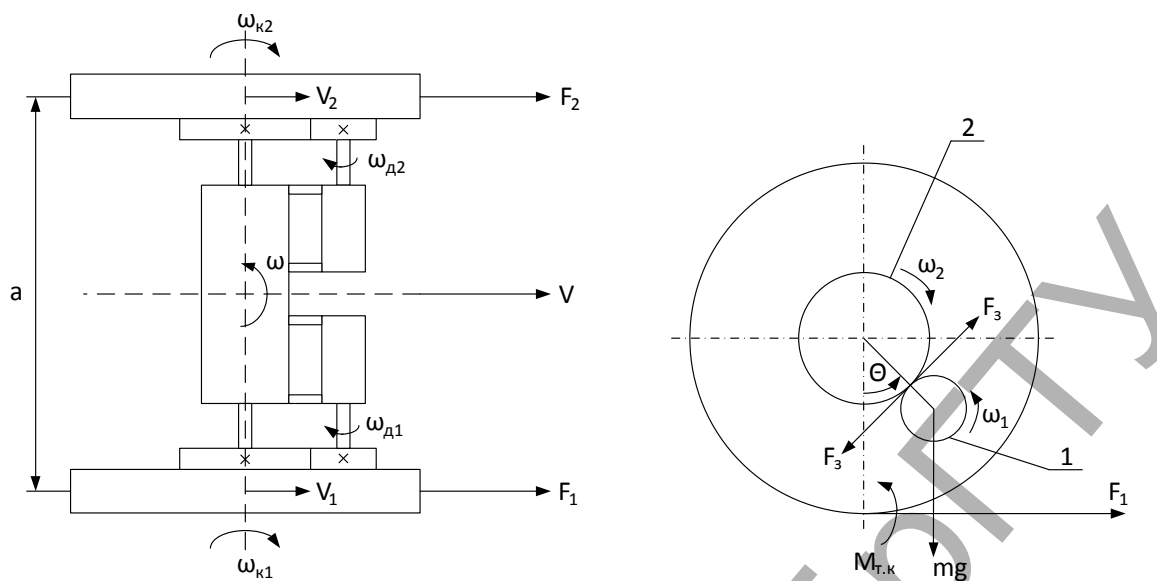


Рисунок 1 – Схема скоростей и сил, действующих на звенья робота

В данной работе рассматривается двухколесный робот, фактически представляющий собой один такой модуль. Устройство получается достаточно простым и компактным, однако возникает проблема устойчивости, поскольку вся конструкция может поворачиваться относительно оси колес. В определенных ситуациях это может играть положительную роль, поскольку робот не может «прокидываться», после полного оборота он возвращается в исходное состояние. Тем не менее, необходимо, чтобы корпус робота сохранял свое положение в процессе движения. Для этого центр тяжести робота должен быть расположен ниже оси колес. При передаче вращающего момента на колеса он отклоняется под действием приводов в сторону движения. Возможны разновидности реализации, когда привод каждого колеса установлен на своей платформе, выполняющей роль противовеса. В любом случае система управления должна обеспечивать движение с минимальными колебаниями. Возникает также задача выбора параметров звеньев, при которых система в наименьшей степени склонна к колебаниям, а их гашение системой управления производится наиболее эффективно. Решение данных задач возможно на основе анализа динамики движения робота, что требует создания соответствующих математических моделей.

Постановка задачи. Для упрощения задачи будем рассматривать конструкцию с отдельным отклоняемым грузом (платформой) для каждого колеса. Передача момента вращения на колесо осуществляется за счет отклонения подвижной платформы, на которой установлен привод, и центр масс которой находится ниже оси колес. В этом случае взаимодействие приводов происходит только через систему управления, которая вырабатывает соответствующие управляющие сигналы.

Решение будем выполнять в предположении, что проскальзывание колес относительно поверхности, по которой перемещается робот, отсутствует. При моделировании данное условие легко проконтролировать, вычисляя текущее значение сил сцепления с поверхностью.

Таким образом, задача состоит в создании математической модели робота, включая механическую часть, приводы колес и систему управления, которая должна адекватно описывать динамику движения. Наличие такой модели позволяет, не только оценивать параметры движения, но и осуществить настройку системы управления для обеспечения заданного качества регулирования и точности обработки траектории.

Математическое описание. Схема двухколесного мобильного робота представлена на рисунке 1. Каждое колесо имеет индивидуальный привод со своим отклоняемым грузом (платформой). Передача вращающего момента от двигателя к колесу осуществляется за

счет отклонения платформы, на которой установлен привод. Отклонение платформы происходит за счет качения приводимого от двигателя зубчатого колеса 1 по зубчатому колесу 2, закрепленному на колесе робота. При отключенных приводах вся конструкция может поворачиваться относительно оси колес, а при неподвижных колесах платформы могут отклоняться за счет работы приводов.

Уравнение для ротора двигателя постоянного тока

$$J_{д.пр.} \cdot \dot{\omega}_d = c_M \cdot I_a - F_3 \cdot \frac{d_1}{2 \cdot u_p}, \quad (1)$$

где $J_{д.пр.}$ – приведенный момент инерции к валу двигателя; ω_d – угловая скорость вала двигателя; c_M – постоянный коэффициент двигателя; I_a – ток якоря; F_3 – сила в зацеплении зубчатых колес; d_1 – диаметр зубчатого колеса 1; u_p – передаточное число редуктора привода.

Уравнение для угла отклонения платформы, рассматриваемой как сосредоточенная масса

$$m \cdot \frac{(d_1 + d_2)^2}{4} \cdot \dot{\Omega} = \frac{d_2}{2} \cdot F_3 - m \cdot g \cdot \frac{d_1 + d_2}{2} \cdot \sin \theta, \quad (2)$$

где m – масса платформы; d_2 – диаметр зубчатого колеса 2; θ – угол отклонения платформы; Ω – угловая скорость платформы.

Уравнение для вращательного движения колеса

$$J_k \cdot \dot{\omega}_2 = \frac{d_2}{2} \cdot F_3 - \frac{D}{2} \cdot F - M_{т.к.}, \quad (3)$$

где J_k – момент инерции колеса; ω_2 – угловая скорость зубчатого колеса 2 и соответственно, колеса робота; F – сила сцепления с поверхностью; D – диаметр колеса; $M_{т.к.}$ – момент трения качения.

Уравнения динамики движения робота

$$J \cdot \dot{\omega} = (F_1 - F_2) \cdot 0,5 \cdot a, \quad (4)$$

$$M \cdot \dot{V} = F_1 + F_2, \quad (5)$$

где J – момент инерции робота относительно вертикальной оси, проходящей через центр масс; ω – угловая скорость робота; a – расстояние между колесами робота; M – масса робота; V – скорость робота; F_1 и F_2 – силы сцепления колес с поверхностью.

Уравнение кинематики, описывающее отношение угловых скоростей,

$$\frac{\omega_2 \cdot d_2}{2} + \frac{\Omega \cdot d_2}{2} = \frac{\omega_1 \cdot d_1}{2} \text{ или}$$

$$\omega_2 \cdot d_2 + \Omega \cdot d_2 = \omega_1 \cdot d_1 \rightarrow$$

$$\dot{\omega}_2 \cdot d_2 + \dot{\Omega} \cdot d_2 = \dot{\omega}_1 \cdot d_1, \quad (6)$$

где ω_1 – угловая скорость зубчатого колеса 1.

Уравнения кинематики движения робота

$$V = 0,5 \cdot (V_1 + V_2) \rightarrow$$

$$\dot{V} = 0,5 \cdot (\dot{V}_1 + \dot{V}_2); \quad (7)$$

$$\omega = (V_1 - V_2)/a \rightarrow$$

$$\dot{\omega} = (\dot{V}_1 - \dot{V}_2)/a, \quad (8)$$

где V_1, V_2 – линейные скорости колес.

Уравнение (3) при записи через линейную скорость колеса V_K

$$J_K \cdot \frac{2}{D} \cdot \dot{V}_K = \frac{d_2}{2} \cdot F_3 - \frac{D}{2} \cdot F \rightarrow$$

$$\dot{V}_K = \frac{D \cdot d_2}{4 \cdot J_K} \cdot F_3 - \frac{D^2}{4 \cdot J_K} \cdot F. \quad (9)$$

При подстановке (1) в (2) (с учетом $\omega_\partial = \omega_1 u_p$) получаем

$$m \cdot \frac{(d_1 + d_2)^2}{4} \cdot \left(\frac{c_M}{J_{\partial, пр.} \cdot u_p} \cdot I_{я} - \frac{d_1}{2 \cdot u_p^2 \cdot J_{\partial, пр.}} \cdot F_3 \right) -$$

$$- m \cdot \frac{(d_1 + d_2)^2}{4} \cdot \dot{\omega}_2 = \frac{d_2}{2} \cdot F_3 - m \cdot g \cdot \frac{d_1 + d_2}{2} \cdot \sin \theta. \quad (10)$$

При подстановке F_3 из (3) в (10) получаем

$$\frac{c_M \cdot d_1 \cdot (d_1 + d_2)^2 \cdot M}{4 \cdot d_2 \cdot u_p \cdot J_{\partial, пр.}} \cdot I_{я} - \left(\frac{d_1^2 \cdot (d_1 + d_2)^2 \cdot M}{8 \cdot d_2 \cdot u_p^2 \cdot J_{\partial, пр.}} + \frac{d_2}{2} \right) \times$$

$$\times \left(\frac{2 \cdot J_K}{d_2} \cdot \dot{\omega}_2 + \frac{D}{d_2} \cdot F \right) + \frac{2}{d_2} \cdot M_{м.к.} = m \cdot \frac{(d_1 + d_2)^2}{4} \cdot \dot{\omega}_2 -$$

$$- m \cdot g \cdot \frac{d_1 + d_2}{2} \cdot \sin \theta. \quad (11)$$

С учетом, что $\dot{\omega}_2 = \dot{V}_K \cdot 2/D$ уравнение (11) будет иметь вид

$$\left(\frac{d_1^2 \cdot (d_1 + d_2)^2 \cdot M \cdot D}{8 \cdot d_2 \cdot u_p^2 \cdot J_{\partial, пр.}} + \frac{D}{2} \right) \cdot F = \frac{c_M \cdot d_1 \cdot (d_1 + d_2)^2 \cdot M}{4 \cdot d_2 \cdot u_p \cdot J_{\partial, пр.}} \cdot I_{я} +$$

$$+ m \cdot g \cdot \frac{d_1 + d_2}{2} \cdot \sin \theta - \left(\frac{d_1^2 \cdot (d_1 + d_2)^2 \cdot M \cdot D \cdot J_K}{4 \cdot d_2^2 \cdot u_p^2 \cdot J_{\partial, пр.}} + J_K +$$

$$+ m \cdot \frac{(d_1 + d_2)^2}{4} \right) \cdot \dot{\omega} - \left(\frac{d_1^2 \cdot (d_1 + d_2)^2 \cdot M \cdot D}{4 \cdot d_2^2 \cdot u_p^2 \cdot J_{\partial, пр.}} + 1 \right) \cdot M_{м.к.} \quad (12)$$

Уравнение (12) сводится к виду

$$0,5 \cdot D \cdot (C+1) F = c_M \cdot u_{12} \cdot u_p \cdot I_{я} + m \cdot g \cdot \frac{d_1 + d_2}{2} \cdot \sin \theta -$$

$$- (C \cdot J_K + J_K + J_{\Pi}) \cdot \dot{\omega} - (C+1) \cdot M_{м.к.}, \quad (13)$$

где $J_{\Pi} = \frac{m \cdot (d_1 + d_2)^2}{4}$ – момент инерции платформы относительно оси колес;

$u_{12} = \frac{d_2}{d_1}$ – передаточное отношение зубчатых колес 1 и 2;

$$C = \frac{d_1^2 \cdot (d_1 + d_2)^2 \cdot M}{4 \cdot d_2^2 \cdot u_p^2 \cdot J_{\partial, пр.}} = \frac{J_{\Pi} \cdot M}{m \cdot u_{12}^2 \cdot u_p^2 \cdot J_{\partial, пр.}}.$$

Из (13) сила сцепления с поверхностью

$$F = \frac{c_M \cdot u_{12} \cdot u_p \cdot I_{я}}{0,5 \cdot D \cdot (C+1)} \cdot I_{я} + \frac{m \cdot g \cdot (d_1 + d_2)}{0,5 \cdot D \cdot (C+1)} \cdot \sin \theta -$$

$$- \frac{(C+1) \cdot J_K + J_{\Pi}}{0,5 \cdot D \cdot (C+1)} \cdot \dot{\omega} - M_{м.к.}/0,5D. \quad (14)$$

Подставляя (14) в (4) для двух модулей и обозначая $\rho = 0,5(d_1 + d_2)$, $u = u_{12} \cdot u_p$, получаем

$$J \cdot \dot{\omega} = 0,5 \cdot a \cdot \left(\frac{c_M \cdot u \cdot C}{0,5 \cdot D \cdot (C+1)} \cdot (I_{я1} - I_{я2}) + \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot \rho}{D \cdot (C+1)} \cdot (\sin \theta_1 - \sin \theta_2) - \right.$$

$$\left. \frac{(C+1) \cdot J_K + J_{\Pi}}{0,5 \cdot D \cdot (C+1)} (\dot{\omega}_{к1} - \dot{\omega}_{к2}) - \frac{2}{D} (M_{м.к.1} - M_{м.к.2}) \right) \quad (15)$$

С учетом $\dot{\omega}_{к1} - \dot{\omega}_{к2} = \frac{2 \cdot a}{D} \cdot \dot{\omega}$, уравнение (15) запишется

следующим образом

$$\frac{2 \cdot J}{a} \cdot \dot{\omega} + \frac{2 \cdot a}{D} \cdot \frac{(C+1) \cdot J_K + J_{\Pi}}{0,5 \cdot D \cdot (C+1)} \cdot \dot{\omega} = \frac{c_M \cdot u \cdot C}{0,5 \cdot D \cdot (C+1)} \cdot (I_{я1} - I_{я2}) +$$

$$+ \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot \rho}{D \cdot (C+1)} \cdot (\sin \theta_1 - \sin \theta_2) - \frac{2}{D} \cdot (M_{м.к.1} - M_{м.к.2}). \quad (16)$$

Из (16) получаем

$$\dot{\omega} = \frac{a \cdot D \cdot c_M \cdot u \cdot C}{(J \cdot D^2 + 2 \cdot J_K \cdot a^2) \cdot (C+1) + 2 \cdot J_{\Pi} \cdot a^2} \cdot (I_{я1} - I_{я2}) +$$

$$+ \frac{a \cdot D \cdot m \cdot g \cdot \rho}{(J \cdot D^2 + 2 \cdot J_K \cdot a^2) \cdot (C+1) + 2 \cdot J_{\Pi} \cdot a^2} \cdot (\sin \theta_1 - \sin \theta_2) -$$

$$- \frac{a \cdot D \cdot (C+1)}{(J \cdot D^2 + 2 \cdot J_K \cdot a^2) \cdot (C+1) + 2 \cdot J_{\Pi} \cdot a^2} \cdot (M_{м.к.1} - M_{м.к.2}). \quad (17)$$

Подставляя (14) в (5) для двух модулей, получаем

$$M \cdot \dot{V} = \frac{2 \cdot U \cdot c_M \cdot C}{D \cdot (C+1)} \cdot (I_{я1} + I_{я2}) + \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot \rho}{D \cdot (C+1)} \cdot (\sin \theta_1 + \sin \theta_2) -$$

$$- \frac{((C+1) \cdot J_K + J_{\Pi}) \cdot 8}{D^2 \cdot (C+1)} \cdot \dot{V} - \frac{2}{D} (M_{м.к.1} + M_{м.к.2}). \quad (18)$$

Из (18) выражаем

$$\dot{V} = \frac{2 \cdot D \cdot u \cdot c_M \cdot C}{(M \cdot D^2 + 8 \cdot J_K) \cdot (C+1) + 8 \cdot J_{\Pi}} \cdot (I_{я1} + I_{я2}) +$$

$$+ \frac{2 \cdot D \cdot m \cdot g \cdot \rho}{(M \cdot D^2 + 8 \cdot J_K) \cdot (C+1) + 8 \cdot J_{\Pi}} \cdot (\sin \theta_1 + \sin \theta_2) -$$

$$- \frac{2 \cdot D \cdot (C+1)}{(M \cdot D^2 + 8 \cdot J_K) \cdot (C+1) + 8 \cdot J_{\Pi}} \cdot (M_{м.к.1} + M_{м.к.2}). \quad (19)$$

Для угловой скорости отклонения платформы

$$\dot{\Omega} = \frac{c_M \cdot u}{J_{\Pi}} \cdot I_{я} - \frac{m \cdot g \cdot \rho}{J_{\Pi}} \cdot \sin \theta. \quad (20)$$

В соответствии с (17, 19, 20) математическая модель двухколесного робота с двумя отклоняющимися платформами

$$\dot{\omega} = \frac{a \cdot D \cdot c_M \cdot u \cdot C}{(J \cdot D^2 + 2 \cdot J_K \cdot a^2) \cdot (C+1) + 2 \cdot J_{\Pi} \cdot a^2} \cdot (I_{я1} - I_{я2}) +$$

$$+ \frac{a \cdot D \cdot m \cdot g \cdot \rho}{(J \cdot D^2 + 2 \cdot J_K \cdot a^2) \cdot (C+1) + 2 \cdot J_{\Pi} \cdot a^2} \cdot (\sin \theta_1 - \sin \theta_2) -$$

$$- \frac{a \cdot D \cdot (C+1)}{(J \cdot D^2 + 2 \cdot J_K \cdot a^2) \cdot (C+1) + 2 \cdot J_{\Pi} \cdot a^2} \cdot (M_{м.к.1} - M_{м.к.2});$$

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{2 \cdot D \cdot c_M \cdot u \cdot C}{(M \cdot D^2 + 8 \cdot J_K) \cdot (C+1) + 8 \cdot J_{II}} \cdot (I_{я.1} + I_{я.2}) + \\ &+ \frac{2 \cdot D \cdot m \cdot g \cdot \rho}{(M \cdot D^2 + 8 \cdot J_K) \cdot (C+1) + 8 \cdot J_{II}} \cdot (\sin \theta_1 + \sin \theta_2) - \\ &- \frac{2 \cdot D \cdot (C+1)}{(M \cdot D^2 + 8 \cdot J_K) \cdot (C+1) + 8 \cdot J_{II}} \cdot (M_{м.к.1} + M_{м.к.2}); \\ \dot{\Omega}_1 &= \frac{c_M \cdot u}{J_{II}} \cdot I_{я.1} - \frac{m \cdot g \cdot \rho}{J_{II}} \cdot \sin \theta_1; \\ \dot{\Omega}_2 &= \frac{c_M \cdot u}{J_{II}} \cdot I_{я.2} - \frac{m \cdot g \cdot \rho}{J_{II}} \cdot \sin \theta_2; \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= \omega; \\ \dot{S} &= V; \\ \dot{\theta}_1 &= \Omega_1; \\ \dot{\theta}_2 &= \Omega_2. \end{aligned}$$

Управление приводами осуществляется за счет задания токов двигателей. При поступательном перемещении токи поддерживаются одинаковыми. Поворот осуществляется за счет разности токов. Заданные значения формируются регуляторами скорости и угла поворота. Настройка данных регуляторов определяет качество переходных процессов при обработке скорости и угла поворота.

На основе полученных подсистем управления приводами построена система управления движением по опорным точкам, которая позволяет осуществлять перемещение в точку с заданными координатами под заданным углом разворота относительно начального положения. Данный алгоритм управления движением [4, 5] основан на использовании информации о текущих значениях угла отклонения целевой точки от оси робота и расстояния до целевой точки. Математическая модель данной системы в приложении SIMULINK показана на рисунке 2. Система управления содержит контур регулирования скорости и контур регулирования угла поворота, что позволяет управлять движением робота по заданной траектории.

Результаты тестирования модели. На начальном этапе исследовался характер движения робота при обработке заданных значений скорости и угла поворота, что позволило выполнить настройку регуляторов. Анализ переходных процессов показал, что требуемое качество в контуре регулирования скорости обеспечивается при использовании П-регулятора, а в контуре регулирования угла поворота – ПД-регулятора при соответствующих настройках. На рисунке 3 приведены кривые изменения скоростей и перемещений при движении из неподвижного состояния, которые показывают отсутствие перерегулирования по всем переменным и приемлемое время регулирования.

Далее исследовалась работа системы управления, обеспечивающая попадание робота в заданную целевую точку под требуемым

углом. В процессе моделирования задавались различные значения координат целевой точки и угла поворота робота. Установлено, что робот обрабатывает заданные значения с достаточно высокой точностью. Отклонения по координатам не превышают 0,06 м, по углу 2-3 градуса.

Результаты моделирования иллюстрируются рисунком 4, на котором показана траектория движения с обработкой заданного углового поворота на 90°. Поворот осуществляется плавно, без колебаний. На рисунке 5 показаны кривые изменения угловой и линейной скорости модуля, а также углового и линейного перемещения. Поворот робота происходит без перерегулирования. При этом скорость принимает заданное установившееся значение примерно за 0,15 с. Поворот на заданный угол осуществляется за 0,6 с. Данное быстродействие является вполне приемлемым для рассматриваемого типа роботов.

Заключение. Результаты тестирования математического описания робота, которое реализовано в виде моделирующей программы в приложении SIMULINK, показали адекватное описание динамики процесса движения. После экспериментальной оценки достоверности данная модель может быть использована для исследования влияния параметров конструкции и управляющей части на показатели, характеризующие точность движения и качество переходных процессов. Данная математическая модель позволяет решать задачи выбора рациональных параметров конструкции робота, настройки регуляторов в приводах перемещения и системы управления движением. Выполненные с ее помощью исследования динамики робота позволяют сделать вывод о возможности построения системы управления, обеспечивающей хорошее качество переходных процессов и достаточно высокую точность обработки траектории на базе стандартных типов регуляторов.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кампион, Г. Структурные свойства и классификация кинематических и динамических моделей колесных мобильных роботов / Г. Кампион, Ж. Бастен, Б. д'Андреа-Новель // Нелинейная динамика. – 2011. – Т. 7. – № 4. – С. 733–769.
2. Мартыненко, Ю.Г. Управление движением мобильных колесных роботов / Ю.Г. Мартыненко // Фундаментальная и прикладная математика. – 2005. – Т. 11. – Вып. 8. – С. 29–80.
3. Буданов, В.М. О движении колесных роботов / В.М. Буданов, Е.А. Девянин // Прикладная механика и математика. – 2003. – Т. 67. – Вып. 2. – С. 244–255.
4. Штеттер, Р. The problem of mobile robots movement control / Р. Штеттер, О.Н. Прокопеня, К.А. Козлович // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: материалы Международной научно-технической конференции, Брест, 29–30 октября 2014 г. – Брест : БрГТУ, 2014. – С. 4–6.
5. Прокопеня, О.Н. Система управления двигательным модулем мобильного робота / О.Н. Прокопеня, К.А. Козлович, В.В. Халитов // Автоматизация и роботизация процессов и производств: материалы Республиканского научно-практического семинара. – Минск, 13 февраля 2014 г. – Минск : Бизнесофсет, 2014. – С. 65–67.

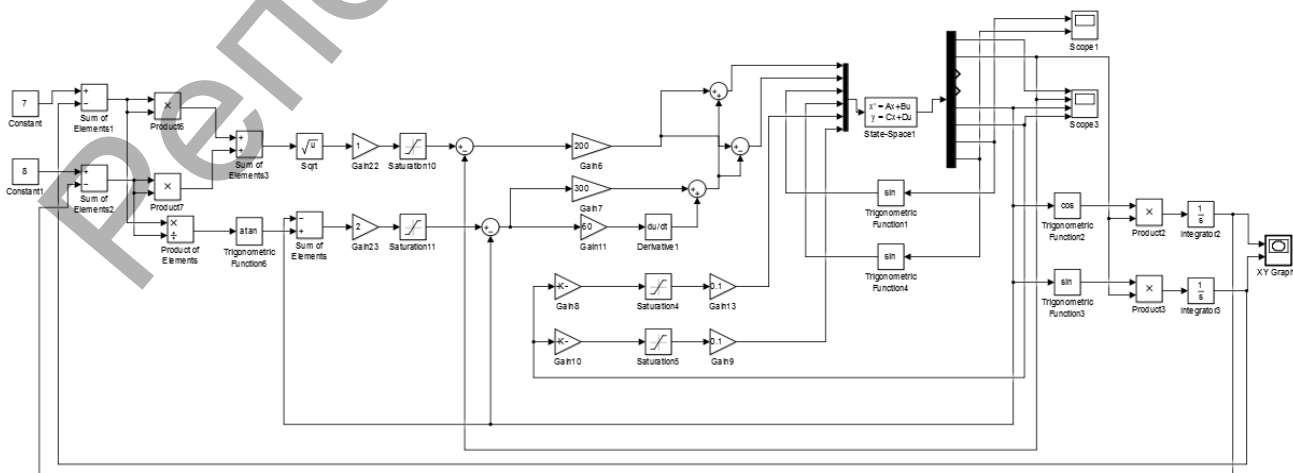


Рисунок 2 – Модель робота в приложении SIMULINK

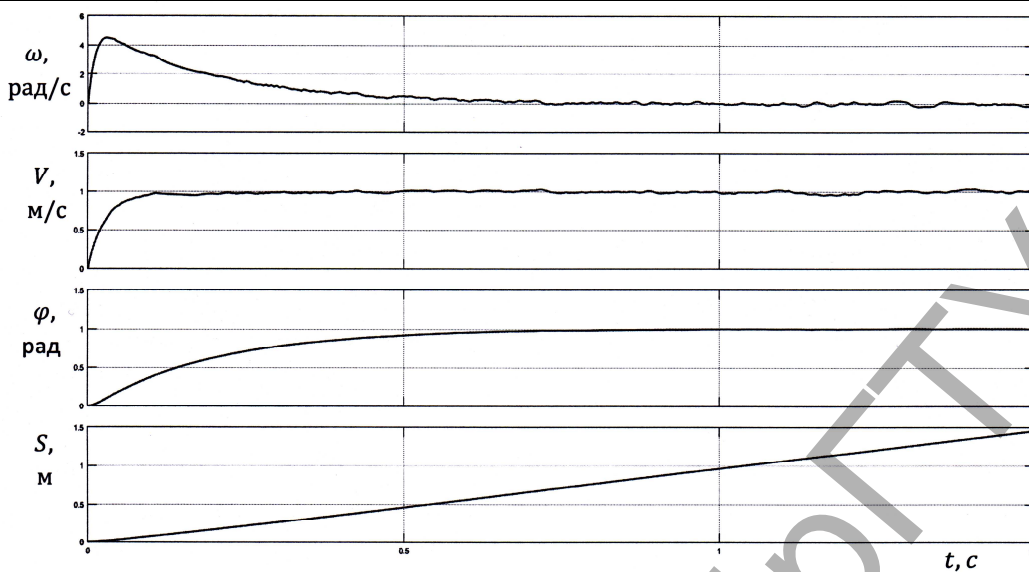


Рисунок 3 – Переходные характеристики

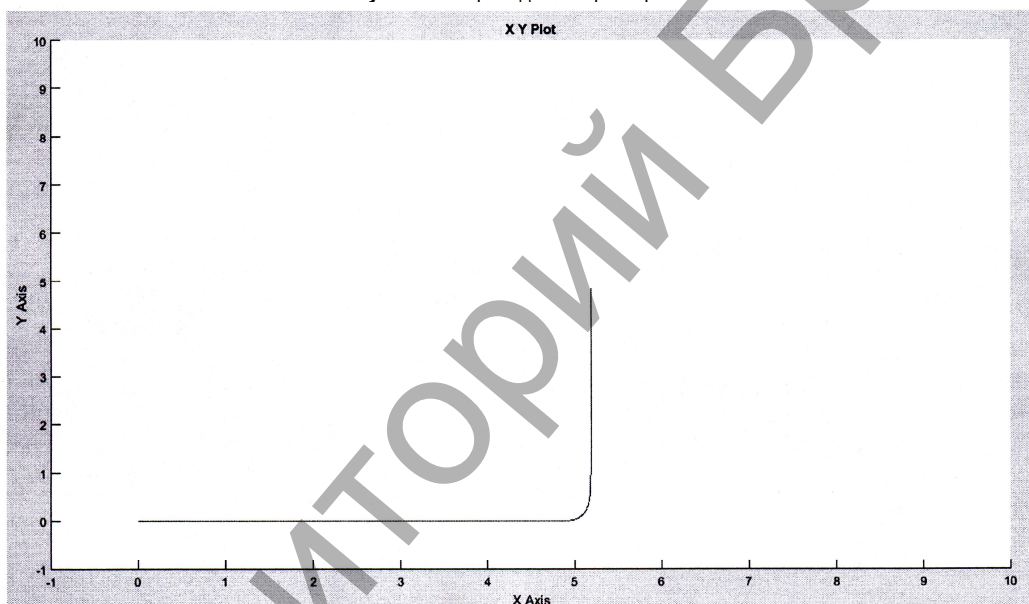


Рисунок 4 – Траектория движение робота с поворотом на 90°

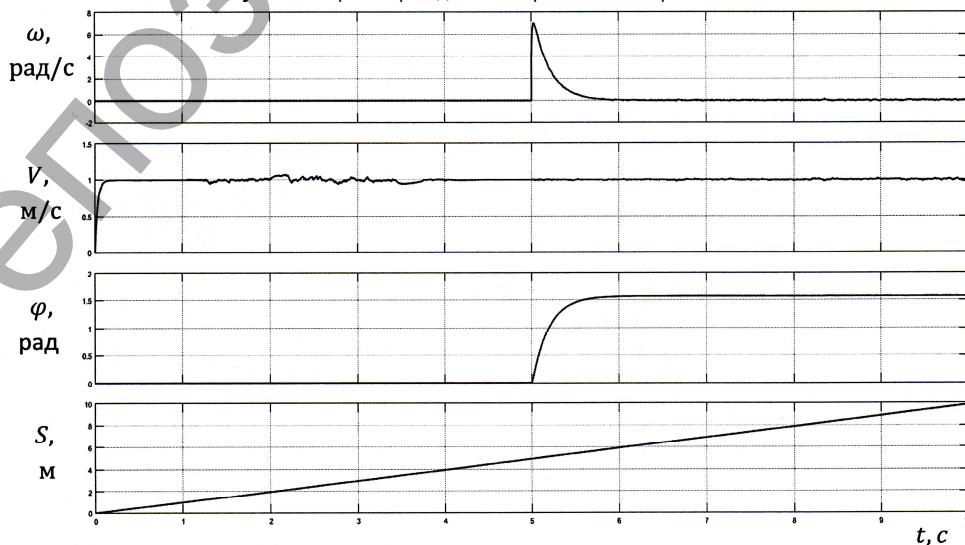


Рисунок 5 – Переходные характеристики при обработке поворота на 90° в процессе движения

The mathematical model of two wheels mobile robot is developed. It is realized in Simulink and may be used for simulation of dynamic processes in robot. The program allows to research the influence of robot parameters on its movement performances. The results may be utilized in production of robots with similar construction for adjustment of the control system.

УДК 629.113

Волощук А.А., Ким В.А., Монтик С.В., Березуцкая С.О.

УРАВНЕНИЯ ТОРМОЖЕНИЯ ТРАКТОРНОГО ПОЕЗДА В СОСТАВЕ КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА И ПРИЦЕПА ПО ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Введение. Основной задачей промышленности Республики Беларусь при создании автомобильной техники было и всегда будет повышение безопасности колёсных машин.

О безопасности автомобиля на дороге можно судить по величине его тормозного пути, который во многом зависит от эффективности тормозной системы – колёсного тормоза.

Правила ЕЭК ООН №13 [1] предъявляют требования к рабочей тормозной системе такие, чтобы она воздействовала на все колеса транспортного средства.

На сегодняшний день у серийного трактора рабочая тормозная система воздействует только на задние колёса. У трактора с передним ведущим мостом (ПВМ) торможение передних колёс происходит за счёт кинематической связи трансмиссии с задними колёсами. Если трактор без ПВМ, то передние колёса и вовсе не участвуют в торможении. Возникает проблема создания тормозных механизмов передних колёс трактора, и поэтому она должна быть решена [2].

Проектирование колёсного тормоза всегда начинается с определения нагрузки, которую несет на себе передний мост трактора.

Рассмотрим процесс торможения тракторного поезда в составе колесного трактора и прицепа (прицеп не оснащен колесными тормозными механизмами). Для составления дифференциальных уравнений торможения тракторного поезда в составе колес-

ного трактора и прицепа по горизонтальной опорной поверхности рассмотрим расчетную схему [3], представленную на рисунке 1.

В приведенной на рисунке 1 расчетной схеме дышло закреплено к платформе прицепа шарнирно и его угол поворота относительно собственной оси представляет собой обобщенную координату φ_D .

Для определения местоположения масс тракторного поезда на горизонтальной опорной поверхности вводим следующие обобщенные координаты (рисунок 1): X_{CT} – линейная координата горизонтального перемещения центра масс трактора по продольной оси; Z_{CT} – линейная координата вертикального перемещения центра масс трактора; Z_{1T} – линейная координата вертикального перемещения центра масс передних колёс трактора; $Z_{1П}$ – линейная координата вертикального перемещения центра масс передних колёс прицепа; $Z_{2П}$ – линейная координата вертикального перемещения центра масс задних колёс прицепа; φ_T – угловая координата поворота корпуса трактора вокруг его поперечной оси; φ_d – угловая координата поворота дышла прицепа вокруг поперечной оси, проходящей через точки крепления его к прицепу; $\varphi_{П}$ – угловая координата

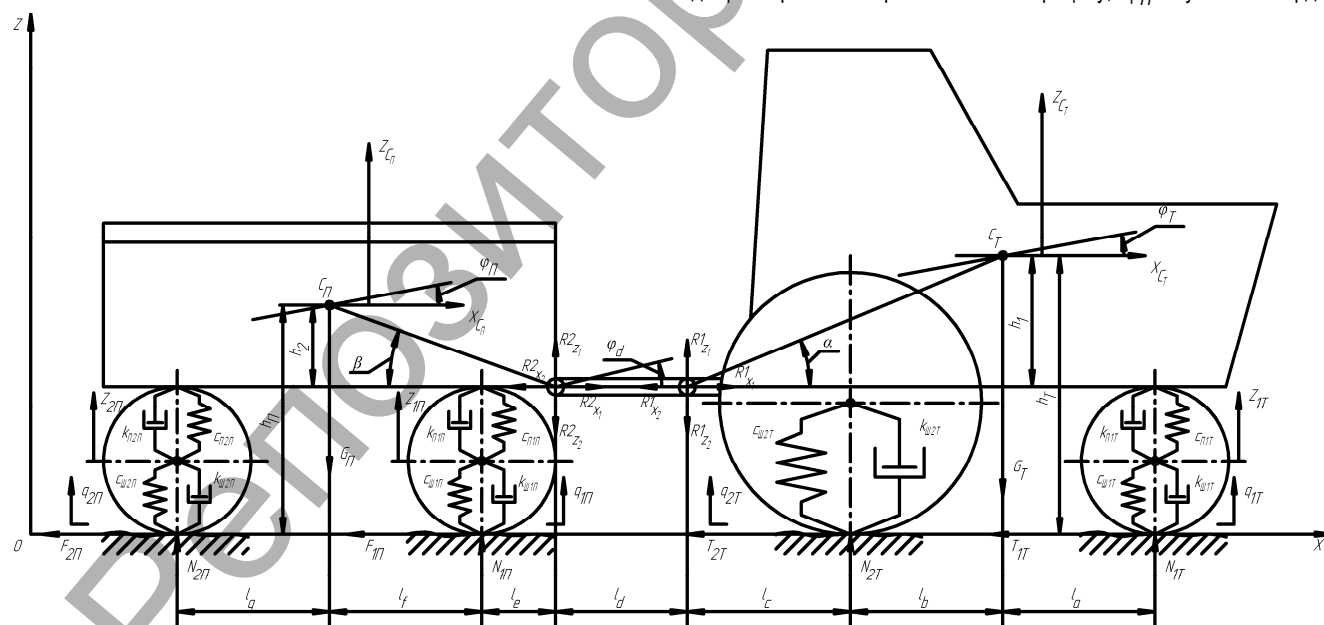


Рисунок 1 – Расчетная схема тракторного поезда

Волощук Антон Анатольевич, исследователь в области технических наук, старший преподаватель кафедры машиностроения и эксплуатации автомобилей Брестского государственного технического университета.

Монтик Сергей Владимирович, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой машиностроения и эксплуатации автомобилей Брестского государственного технического университета.

Березуцкая Светлана Олеговна, м.т.н., ассистент кафедры машиностроения и эксплуатации автомобилей Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Ким Валерий Андреевич, д.т.н., профессор кафедры технической эксплуатации автомобилей Белорусско-Российского университета.

Беларусь, 212000, г. Могилев, пр-т Мира, 43.