

МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГОРИЗОНТИРОВАНИЯ КРУТОСКЛОННОЙ МОБИЛЬНОЙ МАШИНЫ С ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ДАТЧИКОМ КРЕНА

Статья посвящена моделированию элементов системы горизонтирования мобильной машины с использованием гидравлического датчика, управляющего гидромеханической системой. Выполненный обзор современных систем горизонтирования мобильных машин позволил определить критерии оценки качества таких систем и подготовить схематическое решение, в основе которого используется мембранный гидравлический датчик. Разработанная математическая модель управляющего датчика крена позволяет исследовать процесс горизонтирования при изменяющихся условиях эксплуатации крутосклонной мобильной машины. Выполнен вычислительный эксперимент в программной среде *Matlab Simulink*, на основе модулей подпрограммы *Simscape*, с применением численных методов, позволивший идентифицировать процессы при изменяющихся нагрузках на шасси мобильной машины. Доказана работоспособность предлагаемого решения на примере гидромеханической системы крутосклонного комбайна «Дон 1200К», определены рабочие диапазоны функционирования гидромеханической системы горизонтирования и ее динамические качества. Найденные закономерности раскрывают зависимости: угловых и линейных перемещений системы горизонтирования; изменения давления в мембранных камерах датчика крена; расхода жидкости через дроссель и перемещений золотника управляющего гидрораспределителя; нагрузки на телескопических гидроцилиндрах шасси; скорости перемещения плунжеров гидроцилиндров системы горизонтирования.

Полученные результаты могут быть использованы при модернизации имеющихся мобильных машин, а также при создании новых крутосклонных технологических и транспортных машин с улучшенными характеристиками. Использование разработанных математических и компьютерных моделей позволит сократить затраты времени и средств при проектировании систем горизонтирования мобильных машин, разработке опытных образцов и пусконаладочных работах.

Ключевые слова: системы горизонтирования, гидравлический датчик крена, крутосклонные машины, математическое моделирование, *Matlab Simulink*, динамические характеристики.

Введение. Работа технологической машины на склоне, холмистом рельефе — это сложная ситуация для оператора-водителя и проблема выполнения качественного технологического процесса [1, 2]. В настоящее время на рынке высоко-технологичных крутосклонных технологических

машин и сельскохозяйственной техники для работы в холмистых и горных условиях представлено ограниченное количество систем и устройств горизонтирования положения их остова, платформы или рабочего механизма, которые фиксируют изменение рельефа на склонах под углами

наклона до 20 градусов и автоматически выравнивают машину [3–4]. При этом акцент делается на разработку и внедрение конструкторских решений, обеспечивающих их работоспособность. Одновременно возникает проблема повышения эффективности функционирования существующих конструкций датчиков крена [5, 6], разработки методик анализа и синтеза их рациональных и оптимальных параметров на основе математического моделирования с использованием современных информационных технологий. Эта проблема актуальна при непрерывно возрастающей конкуренции на рынке высокотехнологичных крутосклонных технологических машин и сельскохозяйственной техники с системами горизонтирования [1]. В связи с вышеизложенным целью работы является разработка математических моделей, отражающих функциональные зависимости между основными параметрами устройств и механизмов горизонтирования с использованием современных информационных технологий и ПО. Математическая модель силовой нагрузки гидроцилиндров горизонтирования, при изменении угла склона, позволит определять текущие значения их нагрузок в процессе автоматического бокового выравнивания технологической машины и использовать ее при моделировании работы гидропривода АСГ (автоматической системы горизонтирования). Математическая модель мембранного датчика крена позволит решать задачи анализа и синтеза как его составных частей, так и датчика в целом и использовать ее при моделировании работы гидропривода АСГ.

Математическая модель. При работе на склоне автоматической системы горизонтирования технологической машины, на примере комбайна «Дон-1200К» [7], нагрузка гидроцилиндров выравнивания изменяется в зависимости от угла склона [8, 9]. Расчетная схема распределения силовой нагрузки гидроцилиндров при изменении угла склона, разработанная применительно к зерноуборочному комбайну, представлена на рис. 1.

Математическую модель, описывающую воздействие силовой нагрузки на гидроцилиндры горизонтирования при изменении угла склона, получали по правилам теоретической механики из условия, что

$$G_T \cdot l(i) = H1(i) \cdot L(i) - H2(i) \cdot L(i), \quad (1)$$

где G_T — вес комбайна; $l(i) = Z \cdot \sin(\alpha(i))$ и $L(i) = L \cdot \cos(\alpha(i))$ — текущее значение длины плеч силовых нагрузок на гидроцилиндрах горизонтирования при изменении угла склона; $H1(i) = H1 \cdot \cos(\alpha(i))$, $H2(i) = H2 \cdot \cos(\alpha(i))$, $H2(i) = G_T - H1(i)$, — текущие значения силовых нагрузок на гидроцилиндрах горизонтирования при изменении угла склона.

После преобразования выражения (1) получаем:

$$G_T \cdot [Z \cdot \cos(\alpha(i)) \cdot \sin(\alpha(i)) + L \cdot (\cos(\alpha(i)))^2] = 2H1(i) \cdot L \cdot \cos(\alpha(i)). \quad (2)$$

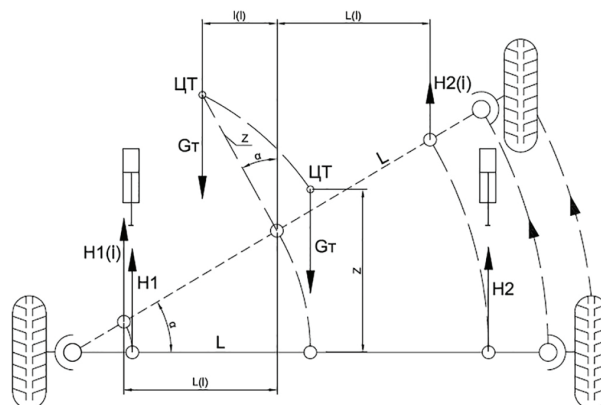


Рис. 1. Схема силовой нагрузки на гидроцилиндры горизонтирования при изменении угла склона

Полученные математические модели изменения силовых нагрузок $H1$ и $H2$ на гидроцилиндрах горизонтирования при изменении угла склона имеют вид:

$$H1(i) = \frac{G_T \cdot [L \cdot (\cos(\alpha(i)))^2 + Z \cdot \cos(\alpha(i)) \cdot \sin(\alpha(i))]}{2(L \cdot \cos(\alpha(i)))}, \quad (3)$$

$$H2(i) = \frac{G_T \cdot [L \cdot (\cos(\alpha(i)))^2 - Z \cdot \cos(\alpha(i)) \cdot \sin(\alpha(i))]}{2(L \cdot \cos(\alpha(i)))}. \quad (4)$$

Задаваясь интервалом изменения угла склона α , например, от 0° до 10° и параметрами физической модели технологической машины (принимая $G_T = 43220$ Н — для пустого бункера и $G_T = 67960$ Н — для бункера с зерном; $Z = 1,4$ м — координата центра тяжести; $L = 1,941$ м, можно получить зависимость нагрузки на силовых цилиндрах от угла склона.

Коэффициенты изменения нагрузки гидроцилиндров при режиме автоматического горизонтирования определяются по формулам:

$$Km(i) = \frac{H1(i)}{H2(i)}; \quad K1m(i) = \frac{H1(i)}{H1(-1)}; \\ K2m(i) = \frac{H2(i)}{H2(-1)}. \quad (5)$$

Полученная математическая модель силовых нагрузок гидроцилиндров горизонтирования позволяет определить их текущие значения в процессе автоматического бокового выравнивания технологической машины.

Для исследования мембранного датчика крена и гидросистемы в аналитических выражениях и символах Matlab Simulink [10, 11] использовали буквенные обозначения параметров, приведенные в табл. 1 и табл. 2.

Для математического моделирования и исследования гидравлических систем горизонтирования в данной работе использовали программное обеспечение SimHydraulics — среда моделирования для инженерного проектирования и имитации гидравлических систем в Matlab Simulink, а также Simscape — основную библиотеку

Геометрические и кинематические параметры матмодели

№	Параметр	Обозначение	Значение	Единицы
1	Угол склона	$\alpha(i)$	0...5...10	градусы
2	Интервалы варьирования	i, j	-1...9...19	
3	Расстояние между центрами мембран	L	1,94	м
4	Перепад высот между центрами мембран при наклоне датчика крена	$h(i)$	0...0,337	м
5	Эффективная площадь мембраны	$S_m(i)$	$9,53 \cdot 10^{-3}$	м ²
6	Перемещение жесткого центра мембраны	X_m	$(0...2,37...4,73) \cdot 10^{-3}$	м
7	Диаметр трубопровода датчика	d_p	$12 \cdot 10^{-3}$	м
8	Диаметр дросселя	d_{th}	$3 \cdot 10^{-3}$	м
9	Скорость перемещения жестких центров мембран датчиков, м/с	V_1, V_2	$0...0,6 \cdot 10^{-3}$	м/с
10	Сила предварительного сжатия пружины	F_0	3	Н
11	Сила действия пружины по центру нижней мембраны при наклоне датчика крена	$F_1(i)$	3...5,37...7,73	Н
12	Сила давления жидкости по центру нижней мембраны при наклоне датчика крена	$F_2(i)$	29,645	Н
13	Сила действия пружины по центру верхней мембраны при наклоне датчика крена	$F_n(i)$	3...0,63... 0... - 1,73	Н
14	Гидростатическое давление по центру нижней мембраны при наклоне датчика крена	$P(i)$	744	Па
15	Жесткость пружины	C_i	1	Н/мм
16	Длина трубопровода	l	2,1	м

Simulink для моделирования таких объектов. Это позволяет строить модели объектов для различных задач анализа и разработки систем горизонтирования технологических мобильных машин [10, 11].

Математическая модель, разработанная для датчика крена, представлена уравнениями расхода жидкости через дроссель, изменения давления в камерах и уравнениями движения мембранного элемента датчика [12, 13].

При этом принимали в качестве допущений постоянство площади мембраны датчика S_{m1} и сил сопротивления движению мембраны, со-

средоточенных в одну результирующую R [14]. Расчетная схема датчика представлена на рис. 2.

Для определения изменения давлений в камерах датчика крена, влияющих на его функционирование, необходимо найти объемный расход рабочей жидкости (дизтопливо) между камерами датчика. Объемный расход жидкости между камерами датчика крена можно определить как расход жидкости через дроссель (рис. 2) по формуле:

$$Q_{th} = \mu_{th} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_{th}^2 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_2 - p_1 - p_p)}, \quad (6)$$

Гидравлические параметры математической модели

№	Параметр	Обозначение	Значение	Единицы
1	Удельный вес рабочей жидкости	γ	8613	Н/м ³
2	Плотность рабочей жидкости	ρ	878	кг/м ³
3	Коэффициент кинематической вязкости рабочей жидкости	ν	$6 \cdot 10^{-6}$	м ² /с
4	Расход жидкости через дроссель	Q_{th}	$2 \cdot 10^{-5}$	м ³ /с
5	Изменение расхода при перемещении мембраны	Q_m	$6 \cdot 10^{-6}$	м ³ /с
6	Коэффициент расхода дросселя	μ_{th}	0,66	
7	Начальный объём жидкости в камерах датчика	W_0	$0,199 \cdot 10^{-3}$	м ³
8	Изменение объёма жидкости в камерах	W_{m1}	$0,237 \cdot 10^{-3}$	м ³ /с
9	Коэффициент гидравлического трения	λ	32	
10	Суммарный коэффициент местного сопротивления	$\Sigma \zeta$	2,7	
11	Модуль упругости жидкости в датчике	E	$4,2 \cdot 10^7$	Па
12	Приведенные массы жидкости	m_1	0,279	кг
		m_2	0,279	

где

$$p_p = \left(\lambda \cdot \frac{l}{d_p} + \Sigma \zeta \right) \cdot \frac{8 \cdot \rho \cdot Q_{th}^2}{\pi^2 \cdot d_p^4}, \quad (7)$$

$$\frac{dp_1}{dt} = (Q_{th} - Q_{m1}) \frac{E}{W_{01} + W_{m1}}, \quad (8)$$

$$\frac{dp_2}{dt} = (-Q_{th} + Q_{m2}) \frac{E}{W_{02} + W_{m2}}, \quad (9)$$

Движение центров мембран датчика крена описывается следующими уравнениями, с учетом вышеупомянутых допущений:

$$\frac{dv_1}{dt} = \frac{p_1 \cdot S_{m1} - c_1 \cdot (x_{01} + x_{m1}) - R_1}{m_1}, \quad (10)$$

$$\frac{dv_2}{dt} = \frac{p_2 \cdot S_{m2} - c_2 \cdot (x_{02} + x_{m2}) - R_2}{m_2}. \quad (11)$$

Полученная математическая модель может быть решена различными численными методами (методы Эйлера, Рунге – Кутга, и т.д.) или с помощью специальных вычислительных программ, таких как Matlab, Mathcad и т.п. Модель позволяет оценивать переходные процессы, возникающие

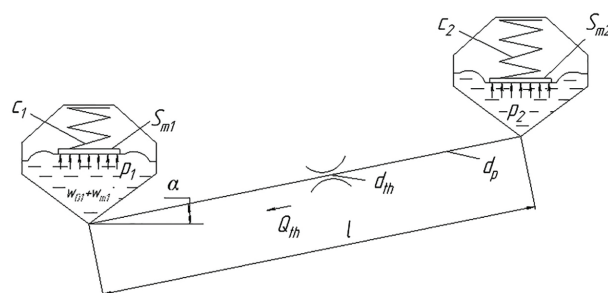


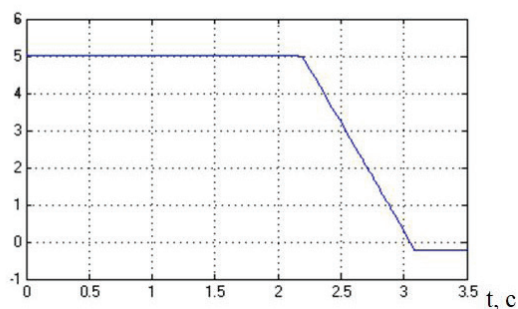
Рис. 2. Расчетная схема датчика крена мембранного типа

в датчике крена при различных управляющих воздействиях (изменениях угла наклона).

Разработанная Simulink модель гидропривода АСГ создана в виде подсистемы, имеющей входы и выходы для взаимодействия с подсистемой датчика крена в общей Simulink-модели технологической машины [9].

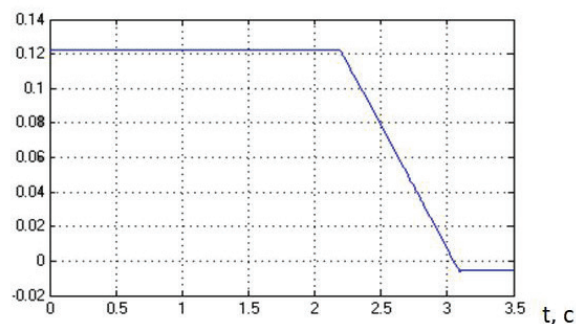
Результаты экспериментальных исследований. Результаты динамического расчета гидропривода АСГ в графической форме приведены на рис. 3–8.

При въезде технологической машины на склон с параметром угла α , равным пяти градусам, ее корпус с закрепленным на нем датчиком

α , градус

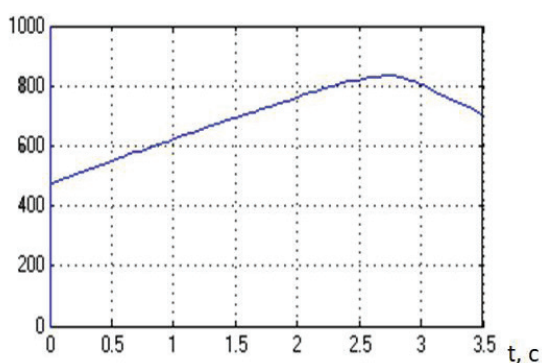
а)

h, м

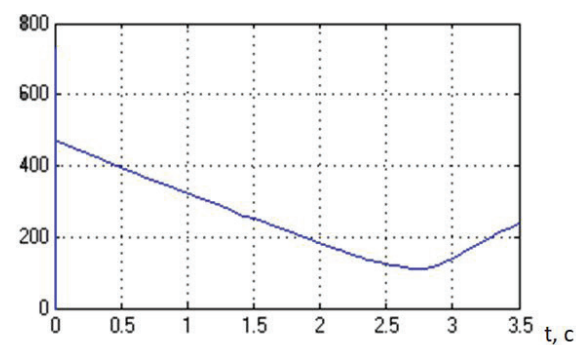


б)

Рис. 3. Угловые и линейные перемещения системы АСГ

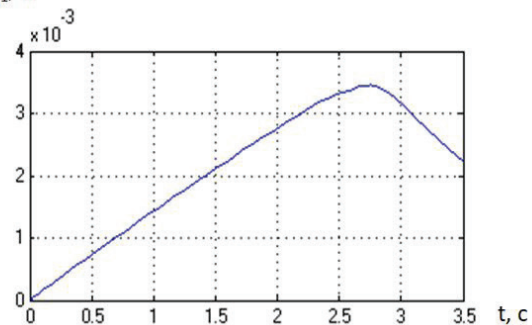
 P_{m1} , Па

а)

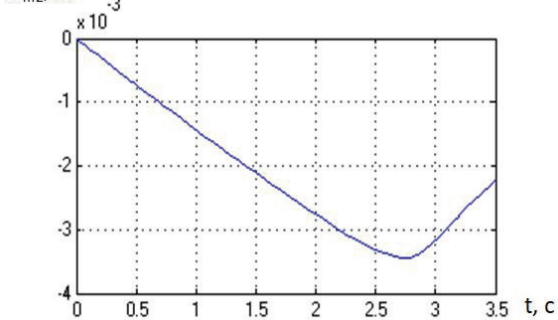
 P_{m2} , Па

б)

Рис. 4. Давление в мембранных камерах 1 и 2

 X_{m1} , м

а)

 X_{m2} , м

б)

Рис. 5. Перемещение жесткого центра мембран датчика крена

крена, отклоняется от горизонта на параметр $h=0,122$ м (рис. 3).

Через промежуток времени $t=2,2$ с срабатывает блок выходного контроля и начинается процесс горизонтирования, угол наклона и смещение корпуса машины уменьшаются и на отметке времени $t=3,1$ с — равны нулю, а датчик крена принимает горизонтальное положение.

Давление на жесткий центр мембраны нижней рабочей камеры датчика крена возрастает и при максимальном перемещении мембран $X_m=3,5 \cdot 10^{-3}$ м на отметке времени $t=2,8$ с со-

ставляет 820 Па (рис. 4а и 5а), а на жестком центре верхней мембранной камеры, наоборот, уменьшается до 100 Па (рис. 5б).

Расход жидкости через дроссель датчика в интервале времени от $t=0,8$ с до $t=2,2$ с изменяется незначительно: от $Q_{dr}=1,4 \cdot 10^{-5}$ до $Q_{dr}=1,2 \cdot 10^{-5}$ м³/с, а на отметке $t=2,8$ с — $Q_{dr}=0$. Далее Q_{dr} меняет знак и затем возвращается к нулевому значению (рис. 7а).

Динамическая характеристика перемещения управляющего золотника (рис. 6б), на отметке времени срабатывания его электромагнита,

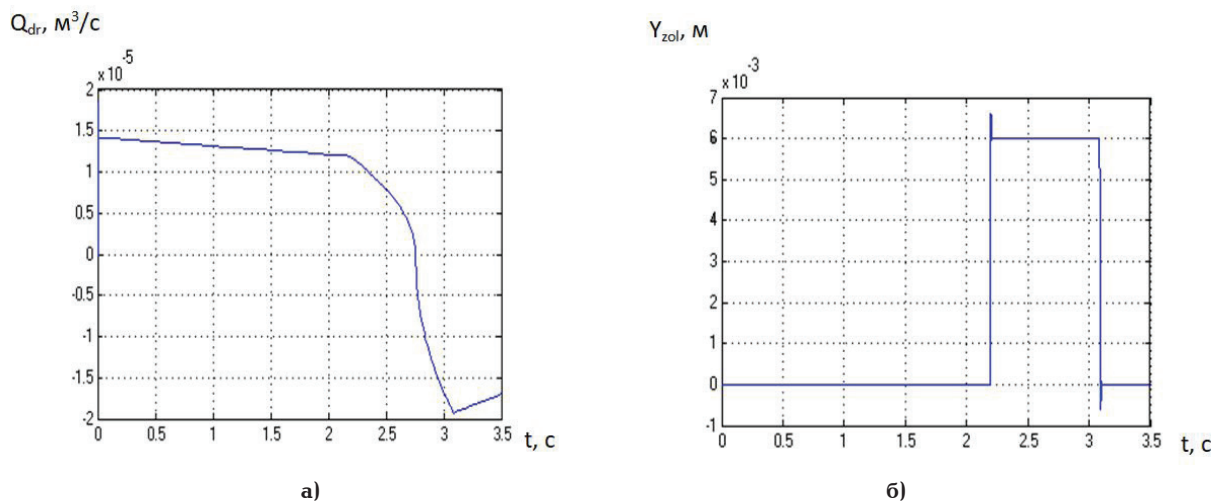


Рис. 6. Расход жидкости через дроссель и перемещения золотника гидрораспределителя

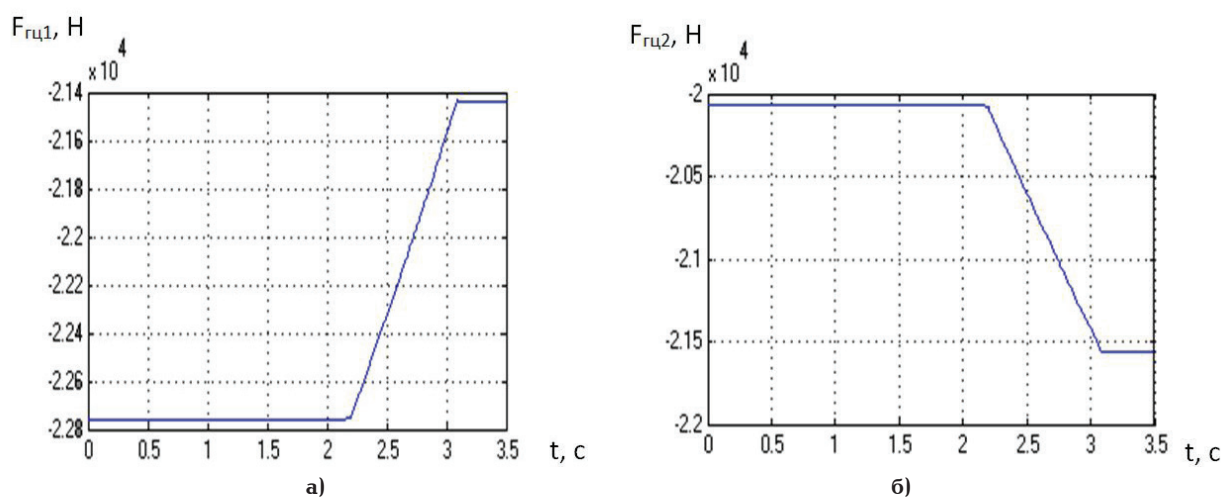


Рис. 7. Нагрузка на телескопических гидроцилиндрах

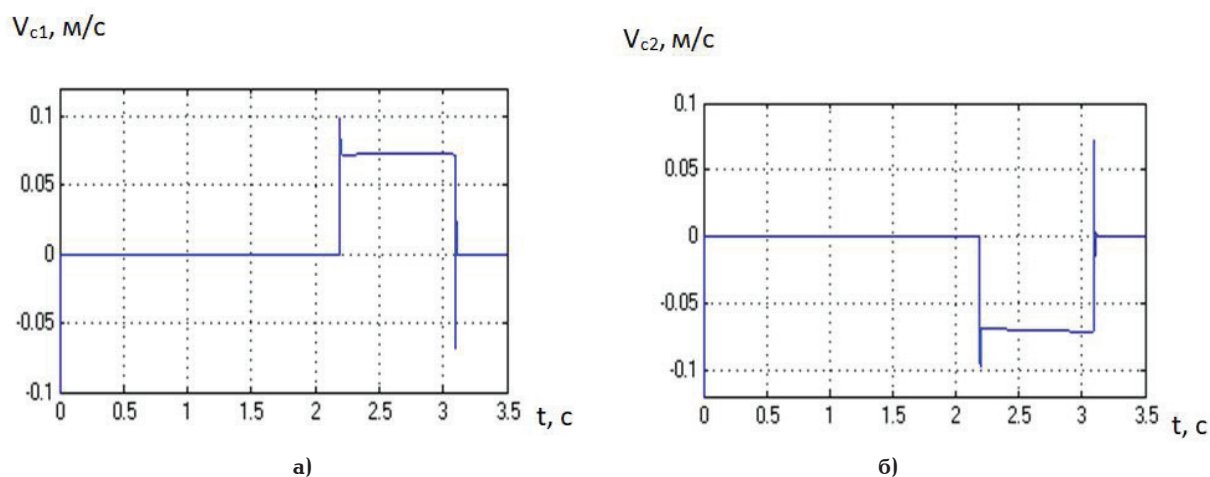


Рис. 8. Скорость движения плунжеров гидроцилиндров

$t=2,2$ с, имеет скачок $Y_{zol} = 6,0 \cdot 10^{-3}$ м, а на отметке $t=3,1$ с золотник возвращается в нейтральное положение $Y_{zol} = 0$, что соответствует окончанию процесса выравнивания корпуса машины.

Изменение нагрузки на гидроцилиндрах, заданной как функция угла склона [15–17], по-

казано на рис. 7. Нагрузка при горизонтировании на нижнем гидроцилиндре возрастает до $2,14 \cdot 10^4$ Н, а на верхнем — уменьшается до $2,16 \cdot 10^4$ Н.

Перемещение плунжеров гидроцилиндров (рис. 8) на отметке времени $t=3,1$ с составило

$X_c = 0,06$ м. Динамические характеристики скорости перемещения плунжеров гидроцилиндров в интервале времени от $t = 2,2$ с до $t = 3,1$ с имеют установившееся значение $V_c = 0,075$ м/с, характерное для таких систем [18]. На отметке времени $t = 2,2$ с, в момент начала перемещения плунжеров гидроцилиндров, имеет место скачок скорости до $V_c = 0,1$ м/с [19, 20].

Выводы. Разработанные математические модели в среде Simulink, как совокупность моделей подсистем датчика и гидропривода сложной АСГ крутосклонной машины, позволили решить задачи анализа и оценки параметров ее основных устройств. Выполненные экспериментальные исследования подтверждают работоспособность разработанных моделей подсистем АСГ, которые позволяют определять ее рациональные параметры и диапазоны функционирования, что актуально при совершенствовании других типов мобильных и стационарных машин.

Библиографический список

- Жалнин Э. В. Основные требования к перспективной системе зерноуборочных машин // Модернизация сельскохозяйственного производства на базе инновационных машинных технологий и автоматизированных систем: сб. докладов XII Междунар. науч.-техн. конф. Всерос. науч.-исслед. ин-т механизации сельского хоз-ва. М.: Известия, 2012. С. 623–631.
- Щербаков В. С., Зырянова С. А., Кoryтов М. С. Система автоматизированного моделирования стрелового грузоподъемного крана: моногр. Омск: СибАДИ, 2009. 106 с.
- Щербаков В. С., Кoryтов М. С., Григорьев М. Г. Автоматизация проектирования устройств управления положением платформы строительной машины: моногр. Омск: СибАДИ, 2011. 119 с. ISBN 978-5-93204-576-3.
- Семенов С. Е., Андреев М. А. Алгоритм горизонтирования транспортной платформы // Инженерный вестник. 2014. № 10. С. 12–18.
- Lu L., Wang X., Wang H. Leveling System Controlled by Electro-hydraulic Proportional Valves in self-propelled modular transporter (SPMT) // International Journal of Scientific & Engineering Research. 2014. Vol. 5, Issue 6. P. 1250–1254.
- Сущенко О. А. Математическая модель системы определения курса в режиме точного горизонтирования // Вісник національного авіаційного університету. 2006. Т. 1, № 27. С. 52–56.
- Сороченко С. Ф. Конкурентоспособность зерноуборочных комбайнов, предназначенных для работы на склонах // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2016. № 9 (143). С. 158–164.
- Тумаков А. А., Полешкин М. С., Ульяненко Д. С. [и др.]. Автоматизированная система управления гидроприводом горизонтирования мобильной машины // Инновации, экология и ресурсосберегающие технологии (ИнЭРТ–2014): материалы XI Междунар. науч.-техн. форума, 7–10 окт. 2014 г. / ДГТУ. Ростов н/Д, 2014. С. 577–597.
- Зорченко М. Ю., Тумаков А. А. Исследование силовой нагрузки гидроцилиндров горизонтирования крутосклонной технологической машины в режиме бокового выравнивания // Молодой исследователь Дона. 2017. № 3 (6). С. 29–34.
- Хант Б. Р. Matlab R2007 с нуля: пер. с англ. М.: Лучшие книги, 2008. 352 с. ISBN 978-5-93673-095-5.
- Чен К., Джиблин П., Ирвинг А. Matlab в математических исследованиях: пер. с англ. М.: Мир, 2001. 346 с. ISBN 5-03-002821-8.
- Попов Д. Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. М.: Машиностроение, 1976. 424 с.
- Tumakov A. A., Grishchenko V. I., Kozhukhova A. V. Mathematical modeling of the sensor tilt membrane type // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. P. 421–426. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.495.
- А. с. 1675129 СССР, МПК В 60 G 21/05. Система автоматической стабилизации положения остова крутосклонного транспортного средства / Негодов В. Н., Тумаков А. А., Чернавский В. А. № 4660528; заявл. 09.03.89; опубл. 07.09.91, Бюл. № 33.
- Щербаков В. С., Кoryтов М. С., Григорьев М. Г. Алгоритм работы системы автоматического горизонтирования опорной платформы строительной машины // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6, № 3. С. 88–91.
- Мушкин О. В., Николаева Н. Д., Труханов В. М. Оптимизация системы горизонтирования и вывешивания платформы // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2015. № 11 (173). С. 61–65.
- Григорьев М. В. Система автоматической стабилизации платформы // Вестник СибАДИ. 2009. № 3 (13). С. 54–58.
- Аверченков В. И., Федоров В. П., Хейфец М. Л. Основы математического моделирования технических систем. Изд. 2-е, стер. М.: Флинта, 2011. 274 с. ISBN 978-5-9765-1267-2.
- Смолинский С. В. Технические принципы устойчивости работы машинных агрегатов на склоне // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 9-3 (20-3). С. 164–168.
- Сидоренко В. С., Антоненко В. И., Фридрих Р. А. [и др.]. Сельскохозяйственные машины: теория, расчет, конструкция, использование: моногр. Зерноград: АЧГАА, 2013. Т. 7, ч. 2. 696 с. ISBN 978-5-91833-133-0.

ГРИЩЕНКО Вячеслав Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика, гидропневмоавтоматика и тепловые процессы». SPIN-код: 1839-5387
AuthorID (РИНЦ): 544150
Адрес для переписки: vig84@yandex.ru

ТУМАКОВ Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Гидравлика, гидропневмоавтоматика и тепловые процессы». SPIN-код: 1232-4663
AuthorID (РИНЦ): 774736
Адрес для переписки: tumakov40@mail.ru

ПОЛЕШКИН Максим Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика, гидропневмоавтоматика и тепловые процессы». SPIN-код: 9550-9990
AuthorID (РИНЦ): 730446
Адрес для переписки: poleshkin.maks@gmail.com

КИЛИНА Мария Степановна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика, гидропневмоавтоматика и тепловые процессы». SPIN-код: 8039-0060
AuthorID (РИНЦ): 790940
Адрес для переписки: Mariya-kilina@yandex.ru

ДЫМОЧКИН Денис Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика, гидропневмоавтоматика и тепловые процессы».
 SPIN-код: 8580-4935
 AuthorID (РИНЦ): 765380
 Адрес для переписки: dydedmi_77_06_02@mail.ru

тической системы горизонтирования крутосклонной мобильной машины с гидравлическим датчиком крена // Омский научный вестник. 2019. № 2 (164). С. 11–18. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-164-11-18.

Для цитирования

Грищенко В. И., Тумаков А. А., Полешкин М. С., Килина М. С., Дымочкин Д. Д. Моделирование автома-

Статья поступила в редакцию 21.01.2019 г.

© В. И. Грищенко, А. А. Тумаков, М. С. Полешкин, М. С. Килина, Д. Д. Дымочкин

УДК 621.9.015:629.014.7

DOI: 10.25206/1813-8225-2019-164-18-22

**М. И. БИСЕРИКАН
 С. В. ПЕТРОЧЕНКО
 К. В. АВЕРКОВ**

Омский государственный
 университет путей сообщения,
 г. Омск

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ВАГОННОГО КОЛЕСА ПОВЫШЕННОЙ ТВЕРДОСТИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С РЕЛЬСОМ

Выполнен анализ процессов, протекающих при взаимодействии колеса с рельсом. Проведены исследования процессов, протекающих при взаимодействии колеса с рельсом по методу подобия. Визуально проконтролировано возникновение контактно-усталостных поверхностных дефектов. Сделан вывод о связи максимальной высоты волнистости на поверхности ролика и скорости повреждения его поверхности. Построена зависимость, позволяющая определить число циклов воздействия приложенной к поверхности ролика нагрузки, в зависимости от макрогеометрических параметров его поверхности. Сделаны выводы об ускорении развития контактно-усталостных дефектов при увеличении макрогеометрических отклонений.

Ключевые слова: контактно-усталостные явления, износ, усталостный дефект, колесо повышенной твердости, взаимодействие колеса и рельса, механическая обработка.

Движение колеса грузового вагона по рельсу характеризуется значительными динамическими нагрузками, изменяющимися в широких пределах. В связи с этим возрастают механические напряжения в ободу колеса, что вызывает ускорение процесса накопления усталостных повреждений и скорости абразивного изнашивания трущихся поверхностей. Для уменьшения данного эффекта был изменен химический состав стали, применяемой для производства колес грузовых вагонов, за счет увеличения значения временного сопротивления до $\sigma_b = 1020 - 1180$ МПа и твердости до $HV = 3200 - 3600$ МПа, при сохранении значения ударной вязкости $KCU = 16$ Дж/см² [1]. В результате

данного мероприятия уменьшилось число отцепок грузовых вагонов на неплановые ремонты в результате износа по таким дефектам как прокат поверхности катания на 30–35 % и подрез гребня на 45–54 %. Вместе с тем было отмечено увеличение числа отцепок по термомеханическим повреждениям — ползунам на поверхности катания и усталостным повреждениям — выщербинам [2]. Наличие выщербин на поверхности катания колеса является фактором, напрямую влияющим на эксплуатационный ресурс колес. Колесные пары с подобными дефектами изымаются из эксплуатации и подвергаются восстановлению профиля поверхности катания за счет лезвийной обработки на специализированном