

РАЗРАБОТКА ПИД-РЕГУЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ЗАДАВАЕМОГО ЗАКОНА ИЗМЕНЕНИЯ УГЛА ПОВОРОТА КОЛЕС СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ МАШИНЫ

В.И. Поддубный, А.С. Ненайденко, А.И. Валекжанин

Рассмотрено решение задачи по реализации задаваемого угла поворота колес сельскохозяйственной машины с помощью электромеханического подруливающего устройства путем использования ПИД-регулирования. Разработан аппаратно-программный комплекс для определения и апробации параметров регулирования. По результатам лабораторного эксперимента, с использованием разработанной Simulink – модели, были определены коэффициенты ПИД-регулятора. Приведены результаты испытаний разработанной системы на экспериментальном стенде. Определены перспективы дальнейшего использования полученных результатов.

Ключевые слова: точное земледелие, колесная сельскохозяйственная машина, угол поворота управляемых колес, ПИД-регулирование, подруливающее устройство, Simulink-модель.

Системы глобального позиционирования (GPS, ГЛОНАСС) и информационные технологии в целом, со своим развитием все чаще находят свое применение в сфере АПК. Ярким примером являются системы точного земледелия. Их использование позволяет обеспечить рабочее движение сельскохозяйственных машин по задаваемой траектории без участия водителя с высокой точностью. Это позволяет уменьшить пройденный путь, повысить качество выполняемых работ, снизить расход топлива и психомоторные затраты механизатора на управление. Для реализации подхода точного земледелия используется подруливающее устройство и системы автопилотирования таких известных фирм как Leica, Trimble, TeeJet, JohnDeer, Klaas и другие [1]. Системы перечисленных фирм зарекомендовали себя достаточно хорошо, однако существенным их недостатком является высокая стоимость для отечественных сельхозпроизводителей и то, что в большинстве случаев они не могут быть использованы на российской сельскохозяйственной технике вследствие несогласованности параметров (в частности тугое рулевое управление отечественных колесных тракторов) [2]. К сожалению, следует отметить отсутствие на нашем рынке систем подруливания и автопилотирования отечественного производства.

В Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова проводятся исследования, целью которых является разработка и создание системы управления движением колесной сельскохозяй-

ственной машиной для отечественной техники, сопоставимой по характеристикам с импортными системами и имеющую более низкую стоимость. Внешний вид разрабатываемого подруливающего устройства представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 - Внешний вид подруливающего устройства

Одной из наиболее важных задач при создании системы управления является разработка алгоритма управления, обеспечивающего движение колесной сельскохозяйственной машины по задаваемой траектории, и его программно-аппаратная реализация. Алгоритм управления можно условно разделить на два модуля – глобальное и локальное регулирование [3].



Рисунок 2 – Схема взаимодействия программно-аппаратных частей системы

Глобальное регулирование должно по величине отклонения от задаваемой траектории определять величину текущего значения угла поворота управляемых колес (или угла слома рамы трактора).

Обычно при разработке алгоритма глобального регулирования используют теорию автоматического регулирования [4, 5] или упрощенные полуэмпирические алгоритмы [6]. Локальное регулирование должно обеспечивать реализацию задаваемого текущего значения угла поворота управляемых колес.

В данной статье речь пойдет о решении задачи локального регулирования разрабатываемой подруливающей системы, а именно об аспектах создания программы ПИД-регулирования [7], необходимой для реализации задаваемого закона изменения угла поворота колес сельскохозяйственной машины. Схема взаимодействия составных аппаратных и программных частей системы представлена на рисунке 2.

На вход программы управления поступают значение требуемого угла поворота, сигнал с датчика угла поворота колес и значения напряжения с датчиков Холла, установленных в электродвигателе (используются для программного определения направления вращения двигателя). На основании этих параметров происходит расчет управляющего напряжения, которое необходимо подать на

бесколлекторный электродвигатель для реализации необходимого угла поворота. Преобразование аналоговых сигналов в цифровые и наоборот происходит с помощью ЦАП/АЦП, совмещенного в одном устройстве L-CARD E14-140M [8]. С программной точки зрения, управление поворотом колес представляет собой систему управления с обратной связью, которая строится на основе алгоритма ПИД регулятора.

Определение вида передаточной функции механической системы.

Для того, чтобы определить пропорциональный (K_p), интегральный (K_i) и дифференциальный (K_d) коэффициенты ПИД регулятора, необходимо знать передаточную функцию управляемой механической системы. В рассматриваемом случае система включает в себя электромеханическое подруливающее устройство и элементы рулевого управления с колесами. Был произведен эксперимент на стенде «рулевое управление – передняя подвеска легкового автомобиля». На вход электронного блока управления электродвигателя подавалось напряжение 1 вольт в течение нескольких секунд и с заданной частотой в 20 Гц и регистрировались показания датчика угла поворота колес. Результаты эксперимента представлены на рисунке 3.

РАЗРАБОТКА ПИД-РЕГУЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ
ЗАДАВАЕМОГО ЗАКОНА ИЗМЕНЕНИЯ УГЛА ПОВОРОТА КОЛЕС СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ
МАШИНЫ

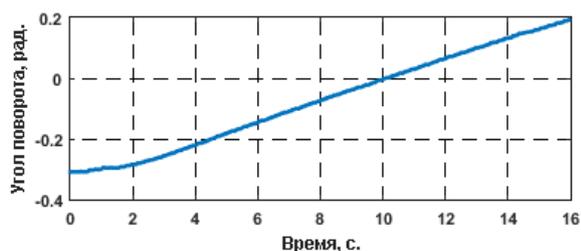


Рисунок 3 – Зависимость изменения угла поворота колес при подачи на двигатель постоянного напряжения 1 вольт

На основе полученных данных с использованием надстройки System Identification Toolbox пакета Matlab, была определена передаточная функция, представляющая собой интегрирующее звено с коэффициентом передачи 0.0349:

$$W(s) = \frac{0.0349}{s}$$

Определение параметров ПИД регулятора в Matlab Simulink.

После получения вида передаточной функции экспериментального стенда, в пакете Simulink [9] была построена модель ПИД регулятора системы управления поворотом колес (рисунок 4), а также произведена настройка коэффициентов регулятора. В результате моделирования были получены

следующие значения: $K_p = 98.1509$, $K_i = 62.5818$, $K_d = -6.2052$.

Использование датчиков Холла для определения направления вращения электродвигателя.

Для поворота управляемых колес не только на необходимый угол, но и в нужную сторону, необходимо знать в любой момент времени - в какую сторону вращается электродвигатель подруливающего устройства. Для этого были задействованы три датчика Холла, установленные в двигателе, напряжение с которых было выведено на каналы используемого аналого-цифрового преобразователя. Для определения последовательности сигналов, соответствующих вращению двигателя по часовой или против часовой стрелки, была произведена регистрация этих сигналов при вращении двигателя в обе стороны. Полученные последовательности переходов сигналов приведены на рисунке 5, по часовой стрелке (график слева) и против часовой (график справа), соответственно. После анализа полученных измерений были установлены представленные в таблице 1 последовательности сигналов для разных направлений вращения (1 – сигнал на канале присутствует, 0 – отсутствует).

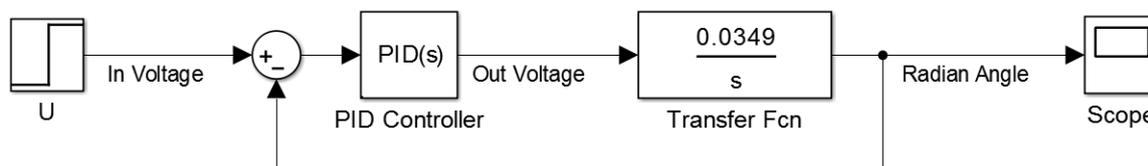


Рисунок 4 – Модель ПИД регулятора в Simulink

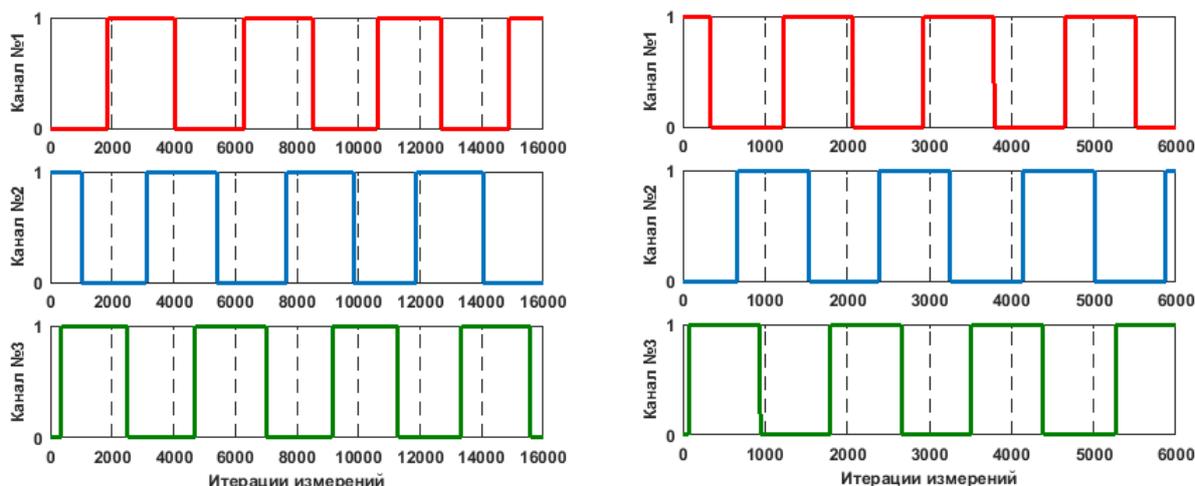


Рисунок 5 – Сигналы с датчиков Холла по часовой стрелке (слева) и против часовой стрелки (справа)

Таблица 1 – Последовательности переходов сигналов для вращения двигателя в разные направления

По часовой стрелке	№ комбинации	Нач. состояние			Конеч. состояние		
		K1	K2	K3	K1	K2	K3
	1	0	0	1	1	0	1
	2	0	1	0	0	1	1
	3	1	0	0	1	1	0
	4	0	1	1	0	0	1
	5	1	1	0	0	1	0
	6	1	0	1	1	0	0
Против часовой	№ комбинации	Нач. состояние			Конеч. состояние		
		K1	K2	K3	K1	K2	K3
	1	0	0	1	0	1	1
	2	0	1	0	1	1	0
	3	1	0	0	1	0	1
	4	0	1	1	0	1	0
	5	1	1	0	1	0	0
	6	1	0	1	0	0	1

Для повышения скорости определения направления вращения была применена потоковая высокочастотная работа с АЦП в непрерывном режиме.

Экспериментальная апробация программного обеспечения на стенде.

Полученная система управления поворотом колес была апробирована на экспериментальном стенде [10]. Для этого было разработано специальное программное обеспечение с использованием языков высокого уровня C++ и C#. В ходе эксперимента система управления должна была поворачивать управляемые колеса по синусоидальному закону с различными значениями амплитуды и периода. Зависимость задаваемого и фактически реализованного углов поворота от времени представлена на рисунке 6, а зависимость подаваемого на блок управления двигателем напряжения от времени - на рисунке 7.

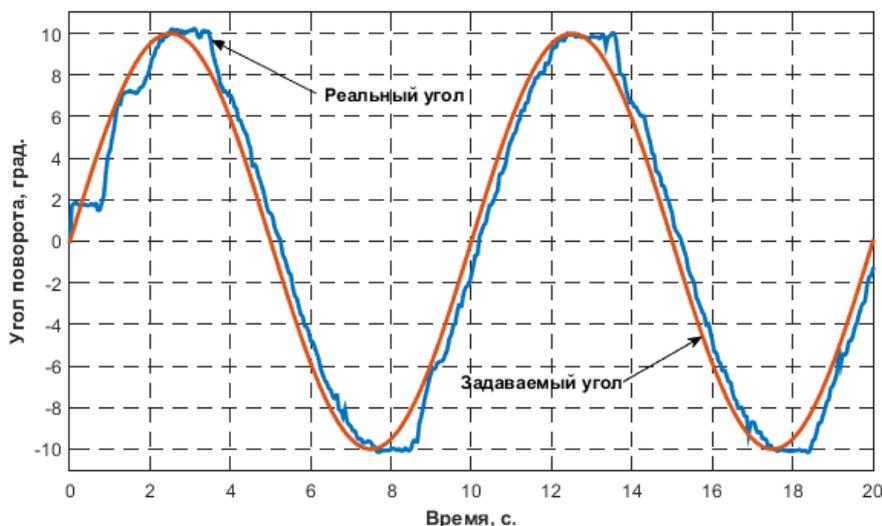


Рисунок 6 – Зависимость задаваемого и реального углов поворота от времени

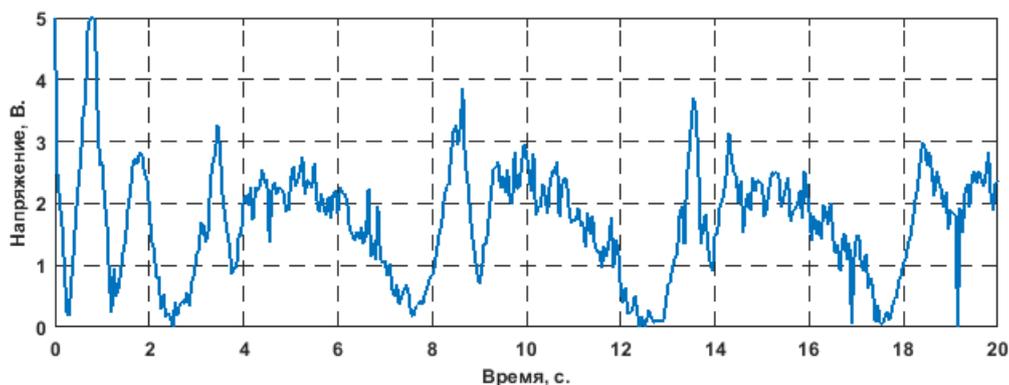


Рисунок 7 – Зависимость подаваемого на блок управления двигателем напряжения от времени

РАЗРАБОТКА ПИД-РЕГУЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ЗАДАВАЕМОГО ЗАКОНА ИЗМЕНЕНИЯ УГЛА ПОВОРОТА КОЛЕС СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ МАШИНЫ

Испытания показали, что полученная система управления поворотом колес с достаточной точностью реализует задаваемый закон поворота, что свидетельствует о работоспособности разработанного ПИД-регулятора. Отклонения реализованного угла от задаваемого не превышают 1,5-2 градуса за исключением начальной фазы поворота. Данное запаздывание после смены направления вращения двигателя объясняется наличием времени торможения, а также присутствием люфтов в механизме подруливающего устройства.

Разработанная и апробированная в лабораторных условиях методика определения коэффициентов ПИД-регулятора поворотом управляемых колес может быть применена для различных образцов колесной сельскохозяйственной техники. Планируется в ближайшей перспективе использование разработанного регулятора при управлении движением колесной сельскохозяйственной машины по задаваемой траектории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подруливающие устройства. [Электронный ресурс]. URL: <http://аронавигация.рф/podrulivayushchie-devices/> (дата обращения 27.01.2017)
2. Березовский, Е. Внедрение технологий точного земледелия: опыт Тимирязевской академии [Текст] / Е. Березовский, А. Захаренко, В. Полин // Аграрное обозрение. - 2009. - № 4. - С. 12-17.
3. Wielenberg, Andreas; Harchenko, Jewgenij; Jäker, K.-P.; Trächtler, Ansgar: Modellbasierte Entwicklung eines volltragenden, vollaktiven Federungssystems für ein geländegängiges Nutzfahrzeug. 4. VDI/VDE-Fachtagung zur Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren (AUTOREG 2008), Feb. 2008.
4. Поддубный, В.И. Применение прикладного пакета CAMeL-View для моделирования управляемого движения колесного трактора [Текст] / В.И. Поддубный, Е.А. Перепелкин, А. Варкентин, М.Ган // Информационные технологии. - 2010. - №7. - С. 24-30.
5. E.A. Perepelkin, V.I. Poddubny, V.A. Kashirin, Parametric Synthesis of Multivariable Systems Based on the Solution of the Lyapunov Differential Equation / Automatic Control and Computer Sciences // 2014, Vol. 48, No. 4, ISSN 0146_4116, pp. 191-195. © Allerton Press, Inc., 2014. Original Russian Text © E.A. Perepelkin, V.I. Poddubny, V.A. Kashirin, 2014, published in Avtomatika i Vychislitel'naya Tekhnika, 2014, No. 4, pp. 5-11.
6. Поддубный В.И., Управление движением колесных мобильных машин с использованием спутниковых радионавигационных систем [Текст]/

В.И. Поддубный, А.С. Пенюшкин // Ползуновский вестник. - 2012. - № 1-1. - С. 239-242.

7. Лазарева, Т.Я. Основы теории автоматического управления [Текст]: учеб. пособие. /Т.Я. Лазарева, Ю.Ф. Мартемьянов. - 2-е изд., перераб. и доп. - Тамбов: Изд-во Тамб. Гос. техн. ун-та, 2004. - 352 с.

8. Модули АЦП / ЦАП | E14-140-M на шину USB. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.lcard.ru/products/external/e-140m> (дата обращения 27.01.2017)

9. Дьяконов, В.П. Матлаб 6.5+Simulink 4/5. М.: СОЛОН-Пресс, 2002. - 768 с.

10. Поддубный, В.И. Лабораторные испытания электромеханической системы управления движением колесной сельскохозяйственной машины [Текст] / В.И. Поддубный, С.Е. Куприянов, В.Ю. Шестаков // Горизонты образования. Выпуск 16-Тезисы XI всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь» - секция «Наземные транспортные машины». - 2014 г.

http://edu.secna.ru/media/f/transport_sistem_tez_2014.pdf

Поддубный Владимир Иванович, д.т.н., доцент, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 656038 Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина 46. тел. 29-08-54 e-mail: poddubny@list.ru

Ненайденко Александр Степанович, аспирант, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 656038 Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина 46. e-mail: nenaydenko.a.s@mail.ru

Валекжанин Александр Иванович, к.т.н., Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 656038 Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина 46. тел. 29-08-14 e-mail: awalekjanin@mail.ru