

not fully comply with the requirements of mixed crop patterns, including the design features of the seed disk and economic cost-estimation indicators of its manufacturing. Federal Agroengineering Centre VIM is designing seeders with an original seed dispenser based on new metering pneumatic systems. This paper presents a sowing machine with a universal seed disk of a new collapsible design used for dotted and mixed sowing of calibrated and uncalibrated seeds of different crops. Laboratory tests have experimentally determined the parameters of a cone-shaped cell of the seed disk, which ensures uniform dispersion of seeds without gaps in a row: the diameter of through holes on side walls of the cone-shaped cells – 3 mm; the lower diameter – 6 mm; depth – 18 mm; the upper diameter – 24 mm. The authors have also studied the effect of excess pressure in a seed chamber (from 2.5 to 4.5 kPa) on the quality of the metering unit as exemplified by maize seeds of the Dobrynya variety in Krasnodar Krai. They have determined the optimum value of excess pressure (3.0 kPa) for the considered design of a pneumatic device, which ensures single-seed sowing without gaps with a total number of 98,5%, which corresponds to agrotechnical requirements. The authors have experimentally determined the capabilities of the universal seed disk of a new design, providing reliable sowing of seeds with both dotted and mixed methods with a reduction in metal intensity of a unit by 20% as compared to analog units.

Key words: sowing machine, hopper, air nozzle, seed disk, cone-shaped cell, coulter, ejector seeds.

References

1. Izmailov A.Yu., Shogenov Yu.Kh. Intensivnyye mashinnyye tekhnologii i tekhnika novogo pokoleniya dlya proizvodstva osnovnykh grupp sel'skokhozyaystvennoy produktsii [Intensive machine technology and a new generation of machinery for the production of major groups of farm produce]. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela*, 2017; 7(241): 2-6. (in Rus.).
2. Gollin D., Morris M. & Byerlee D. Technology adoption in intensive post-greenrevolution systems. *American Journal of Agricultural Economics*, 2005; 87(5): 1310-1316. DOI: org/10.1111/j.1467-8276.2005.00824.x.
3. Cao S., Chen L. & Yu X. Impact of China's Grain for Green Project on the landscape of vulnerable arid and semiarid agricultural regions: a case study in northern Shaanxi Province. *Journal of Applied Ecology*, 2009; 4: 536-543.
4. Akhalaya B.Kh., Shogenov Yu.Kh. Mechanization and Automation of Working Processes of Tillage and Seeding. *Russian Agricultural Sciences*, 2017; 43(3): 277-280. DOI: 10.3103/S106836741703003X.
5. Akhalaya B.Kh. Modernizatsiya pnevmaticheskoy seyalki [Modernization of a pneumatic seed drill]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*, 2011; 1: 35-36. (in Rus.).
6. Firsov A.S., Golubev V.V. Perspektivy razvitiya diskovykh vysevyayushchikh apparatov [Prospects of development of disk seed drills]. *Agrotekhnika i energoobespecheniye*, 2015; 1(5): 18-22. (in Rus.).
7. Universal'nyy vysevyayushchiy disk [Universal seed disk]; Patent No. 2640280 Rossiyskaya Federatsiya, MPK A01S/04(2006.01) / B.Kh. Akhalaya; applied on 21.10.2016; issued on 27.12.2017, Bul. No. 36. (in Rus.)

The paper was received on June 29, 2018

УДК 631.3:004

DOI 10.26897/1728-7936-2018-5-11-20

ТАРКИВСКИЙ ВИТАЛИЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ, канд. техн. наук

E-mail: Tarkivskiy@yandex.ru

Новокубанский филиал ФГБНУ Росинформагротех (КубНИИТиМ); 352243, ул. Красная, 15, г. Новокубанск, Краснодарский край, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ И ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА ДАТЧИКА ПОВОРОТА КОЛЕСА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ТРАКТОРА

Обоснована необходимость определения буксования колёс сельскохозяйственных тракторов при проведении испытаний с целью определения функциональных характеристик. Рассмотрен принцип работы и конструкция инерциального датчика угла поворота ведущего колеса ИП-291, базирующегося на датчике инерциальной навигационной системы MPU-9250. Проанализированы основные существующие математические методы нелинейной фильтрации исходных данных девяти осевых инерциальных датчиков ориентации. Разработано программное обеспечение, реализующее различные варианты математических моделей для обработки данных инерциальных датчиков ориентации. Описана конструкция

стенда и программное обеспечение для испытаний датчика ИП-291 с целью определения точности и стабильности показаний в диапазоне от 0 до 360° с различными вариантами математических моделей цифровых фильтров. Приведены результаты реализации и испытаний на датчике ИП-291. Основными преимуществами инерциального датчика ИП-291 является простота монтажа на колесо трактора, отсутствие питающих и информационных кабелей. Установлено, что с целью выбора оптимального математического фильтра необходимо соответствовать следующим критериям: погрешность измерения – не более 1%, среднее квадратическое отклонение показаний – не более 0,5°, рабочий диапазон измерений от 0 до 360°. По результатам испытаний был выбран лучший по точности измерения (основная приведённая погрешность 0,678%) и стабильности показателей (среднее квадратическое отклонение 0,117°) расширенный фильтр Калмана на основе вычисления Якобиана. Выбранная математическая модель фильтра позволяет использовать технологию инерциальной навигации для расчёта изменения угла поворота ведущего колеса трактора с последующим вычислением скорости и буксования.

Ключевые слова: цифровая обработка, математические методы, математическая модель, инерциальный датчик поворота колеса, фильтр ориентации, фильтр Калмана.

Введение. Принятие Постановления Правительства от 01.08.2016 № 740 «Об определении функциональных характеристик (потребительских свойств) и эффективности сельскохозяйственной техники и оборудования» [1] связано с необходимостью оптимизации порядка проведения испытаний сельскохозяйственной техники и оборудования в системе машиноиспытательных станций Минсельхоза России в соответствии с требованиями современных условий.

В перечень определяемых критериев эффективности для тракторов сельскохозяйственного назначения входит величина буксования при максимальном тяговом КПД. Кроме того, величина буксования определяется при проведении испытаний сельскохозяйственных тракторов в соответствии с ГОСТ 30745-2001 «Тракторы сельскохозяйственные. Определения тяговых показателей» [2] и ГОСТ Р 52777-2007 «Техника сельскохозяйственная. Методы энергетической оценки» [3].

В соответствии с требованием стандарта ГОСТ 30745-2001 [2] максимальное тяговое усилие, развиваемое на крюке трактора, должно ограничиваться началом неустойчивой работы двигателя или буксованием, предельное значение которого должно быть: на треках не более 7% – для гусеничных и 15% – для колёсных тракторов и гусеничных с эластичной (резиновой) гусеницей, а на почвенных фонах – 15 и 30% соответственно.

Величина буксования движителей измеряется устройством, состоящим из трёх частей (классическая схема) [4, 5]: датчика угла поворота ведущего колеса, датчика пройденного пути и устройства обработки информации.

В качестве датчика пройденного пути используется 5-е колесо, датчик спутниковой навигации (GPS/ГЛОНАСС) или отмеренный участок (только при тяговых испытаниях тракторов).

Датчик угла поворота ведущего колеса – это датчик, имеющий в своём составе формирователь импульсов через определённый угол поворота колеса.

Использование навигационных методов позволяет определять положение колеса относительно оси вращения в любой момент времени.

Инерциальная навигация определяет положение объекта относительно системы координат, используя углы Эйлера, описывающие поворот абсолютно твёрдого тела в трёхмерном евклидовом пространстве.

На основе инерциальной системы навигации в КубНИИТиМе разработан датчик угла поворота ведущего колеса ИП-291 [6] (рис. 1), где в качестве основного элемента использован 9-осевой датчик инерциальной навигационной системы (ИНС) MPU-9250 [7] (рис. 1, б).

Преимущества инерциального датчика угла поворота ведущего колеса ИП-291 следующие:

- простой монтаж. Датчик достаточно лёгкий и не имеет вращающихся частей, его достаточно прикрепить на двухсторонний скотч на диске колеса в любом месте и в любом положении (рис. 1, в);

- передача данных по радиоканалу. Отпадает необходимость прокладки кабелей для связи датчика с информационной системой, вычисляющей величину буксования;

- нет необходимости в обслуживании и смазке подшипника ротора.

Инерциальный датчик угла поворота ведущего колеса ИП-291 должен решать следующие задачи:

- с достаточной частотой (не менее 100 раз в секунду) определять угол наклона датчика относительно горизонта для мгновенного расчёта угловой скорости вращения колеса;

- быть нечувствительным к вибрациям и высокочастотным колебаниям, которые неизбежно возникают при качении колеса, работе двигателя трактора и т.д.

- с точностью до 10^{-3} с определять время между каждым измерением положения;

- обеспечивать по запросу от управляющей системы передачу данных по радиоканалу.

Для решения двух первых задач в состав датчика ИП-291 входит модуль ИНС MPU-9250. Он включает три независимых датчика: акселерометр, гироскоп и цифровой компас (магнитометр). Каждый датчик выдаёт информацию в 16-битном виде по трём осям (X-Y-Z), расположенным под углом 90° в трёх плоскостях (поэтому такие системы называют 9-осевыми).

По отдельности ни один из датчиков не может решить ни одну из перечисленных выше задач, поэтому системы инерциальной навигации всегда строятся из комбинации датчиков, и самое сложное – это вычислительные алгоритмы, позволяющие соединить сильные стороны каждого из датчиков для устранения их недостатков.

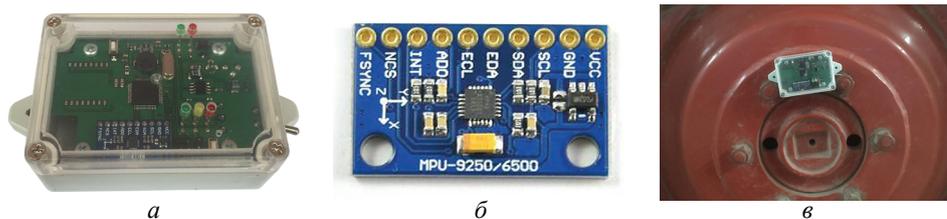


Рис. 1. Инерциальный датчик угла поворота ведущего колеса ИП-291:
 а – общий вид; б – микросхема ИНС MPU-9250; в – датчик на колесе трактора

Вычислительные алгоритмы, построенные на математических моделях нелинейной цифровой фильтрации для использования в навигации, называются фильтрами ориентации.

Цель исследований – обоснование и выбор математической модели фильтра ориентации для инерциального датчика положения ведущего колеса ИП-291 на базе ИНС MPU-9250.

Материал и методы. Конструктивно датчик ИП-291 представляет собой пластиковую коробку размером 80×60×30 мм и весом 150 г.

Внутри находится плата с электронными компонентами и литий-полимерный аккумулятор ёмкостью 2000 мА · ч. На плате установлены контроллер STM32F405RG с элементами обвязки, микросхема ИНС MPU-9250, модуль радиосвязи HC-12, система стабилизации питания и зарядки аккумулятора и пяти информационных светодиодов.

У каждого датчика свои возможности и слабые стороны. Гироскоп, встроенный в микроэлектромеханический (MEMS) модуль ИНС MPU-9250, измеряет угловую скорость, которую при известных начальных условиях можно интегрировать с течением времени, чтобы получать его перемещение в пространстве и ориентацию датчика. Накопление ошибок при интегрировании из-за неточности измерения времени приведёт к накоплению ошибки в вычислении ориентации. Таким образом, гироско-

пы сами по себе не могут обеспечить абсолютное измерение ориентации. Акселерометр и магнитометр измеряют гравитационные и магнитные поля нашей планеты и соответственно могут определять абсолютное значение ориентации в пространстве.

Тем не менее и они подвергаются воздействию высокочастотных помех, таких как вибрация и дополнительное ускорение во время движения трактора, что приведёт к сдвигу контролируемого направления силы тяжести. Задача фильтра ориентации состоит в вычислении единой оценки ориентации, полученной путём анализа и объединения измерений акселерометра, гироскопа и магнитометра.

Фильтр Калмана – один из самых популярных алгоритмов фильтрации, используемый во многих областях науки и техники.

Фильтр Калмана использует динамическую модель системы, известные управляющие воздействия и множество последовательных измерений для формирования оптимальной оценки состояния. Алгоритм состоит из двух повторяющихся фаз: предсказания и корректировки. В первой фазе рассчитывается предсказание состояния в следующий момент времени (с учетом неточности их измерения). Во второй фазе новая информация с датчика корректирует предсказанное значение с учетом неточности и зашумленности этой информации. Математическая модель фильтра Калмана представлена на рисунке 2.

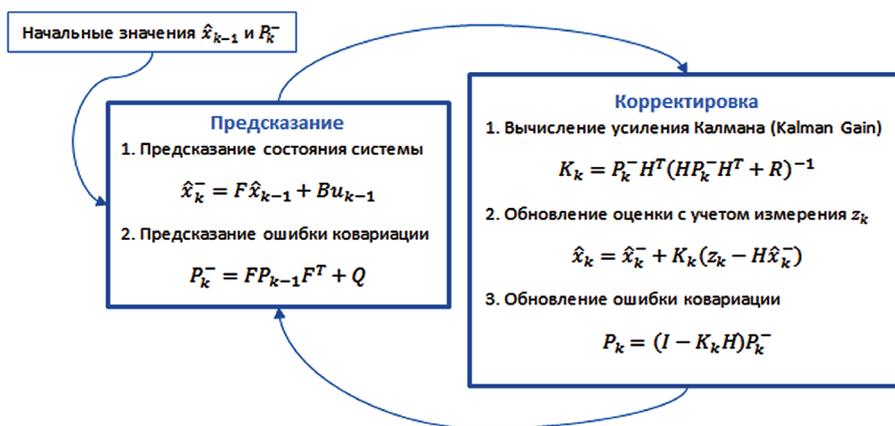


Рис. 2. Модель фильтра Калмана для случая линеаризованной упрощенной математической модели динамической системы: F – матрица перехода между состояниями (динамическая модель системы); B – матрица применения управляющего воздействия; u_{k-1} – управляющее воздействие в прошлый момент времени; Q – ковариация шума процесса; P_{k-1} – ошибка в прошлый момент времени; P_k – предсказание ошибки; \hat{x}_{k-1} – состояние системы в прошлый момент времени; \hat{x}_k^- – предсказание состояния системы в текущий момент времени

Уравнения представлены в матричной форме. В случае с одной переменной матрицы вырождаются в скалярные значения.

Описанный выше вариант фильтра Калмана даёт наименьшую среднеквадратическую ошибку лишь при соблюдении нескольких гипотез: например, шум является белым и распределен по нормальному закону, математическое ожидание шумов равно нулю, отсутствуют корреляции между шумами и перекрестные связи между фазовыми координатами (переменными состояния). Эти ограничения довольно серьезные, и на практике гипотезы часто нарушаются. Существует также расширенный фильтр Калмана (ЕКФ) [8], который по структуре своей похож на линейный фильтр Калмана. Он отличается тем, что уравнения динамики и наблюдений содержат нелинейные (степенные, тригонометрические и пр.) функции от фазовых координат. Это отличие также предполагает наличие перекрестных связей между фазовыми координатами (например, произведение двух координат).

При использовании ЕКФ необходимо на каждом шаге итераций вычислять Якобиан – матрицу частных производных от фазовых координат. Таким образом, ЕКФ реализует в себе прослойку ли-

неаризации нелинейной динамической системы, но из-за этого сильно возрастает вычислительная сложность и нагрузка на процессор.

Существуют различные варианты фильтра Калмана, которые используют другие подходы расчёта математического ожидания и ковариации. На современном этапе в развитии методов нелинейной фильтрации на базе фильтра Калмана можно выделить несколько основных направлений. Прежде всего это сигма-точечный фильтр Калмана (UKF) [9] и подход, основанный на численной аппроксимации многомерных вероятностных интегралов специального вида, – квадратурный фильтр Калмана (СКФ).

Фильтр ориентации построен на основе метода «градиентного спуска» – фильтр Мэджвика [10]. Математическая модель фильтра представлена на рисунке 3. В этом фильтре используются аналитические вычисления и оптимизируются выходные данные – кватернионы.

Преимущества фильтра заключаются в низких требованиях к вычислительным ресурсам (277 простых арифметических операций на каждое обновление фильтра) и эффективности при низких частотах дискретизации показаний датчиков (от 10 Гц).

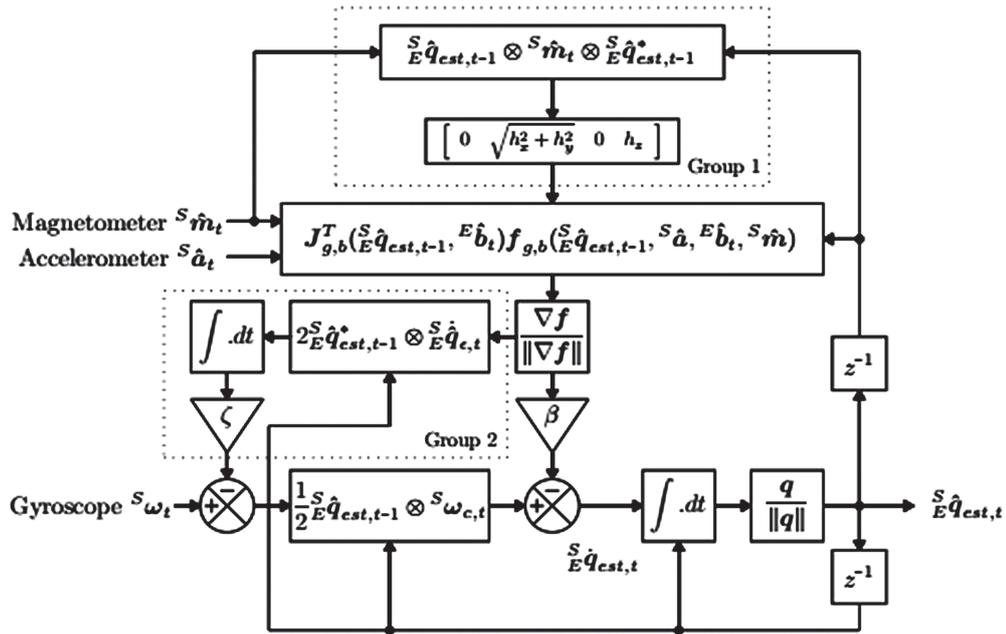


Рис. 3. Блок-схема полного фильтра Мэджвика

Результаты исследования. Так как вычислительным ядром датчика ИП-291 является контроллер STM32F405RG на базе архитектуры ARM с тактовой частотой 168 МГц и встроенным математическим сопроцессором для вычислений с плавающей точкой, то вычислительной мощности для реализации различных вариантов фильтра ориентации достаточно.

С целью исследования и выбора фильтра ориентации для инерциального датчика ИП-291 на основе данных ИНС MPU-9250 были разработаны

и реализованы в программном коде датчика пять вариантов фильтра Калмана:

- расширенный фильтр Калмана (на основе расчёта Якобиана);
- расширенный фильтр Калмана (на основе метода Рунге-Кутты 4-го порядка);
- сигма-точечный фильтр Калмана (UKF);
- кубатурный фильтр Калмана (СКФ);
- квадратно-корневой кубатурный фильтр Калмана (SRCKF).

Также был реализован вариант фильтра Мэджвика для трёх датчиков (акселерометр, гироскоп, магнитометр).

Все варианты фильтров были написаны на языке C с использованием бесплатного компилятора ARM и бесплатной среды разработки CoIDE.

Программа фильтров устанавливала следующие скоростные характеристики датчика ИП-291:

- частота процессора STM32F405RG – 168 МГц;
- скорость получения значений, встроенных в ИНС MPU-9250 акселерометра, гироскопа и цифрового компаса, – 1000 Гц;
- скорость канала передачи данных – 115200 бит/с.

В качестве стенда для проверки стабильности показаний была использована делительная головка для фрезерных станков УДГ-Д-250, в патроне которой закреплён диск с датчиком ИП-291 и оптическим квадрантом КО-60 для контроля угла наклона датчика к горизонту (тангажа) (рис. 4).

Выходными данными всех вариантов фильтров является кватернион – четырехмерное комплексное число, используемое для представления ориентации остроконечного тела или

координат в трехмерном пространстве [11], который передается из датчика ИП-291 на компьютер с частотой 10 Гц с помощью радиомодуля HC-12 (рис. 4).

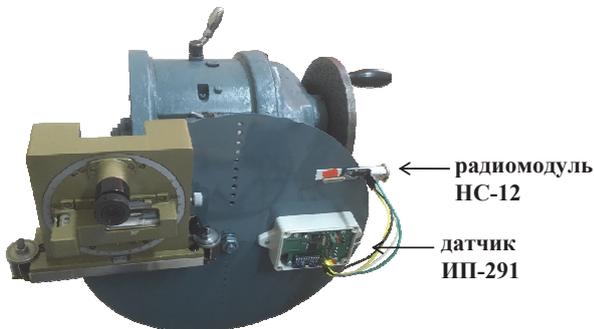


Рис. 4. Датчик ИП-291 на испытательном стенде

Для обработки данных была написана специальная программа (рис. 5).

Программа рассчитывает положение в пространстве датчика из кватерниона по формулам 1-3:

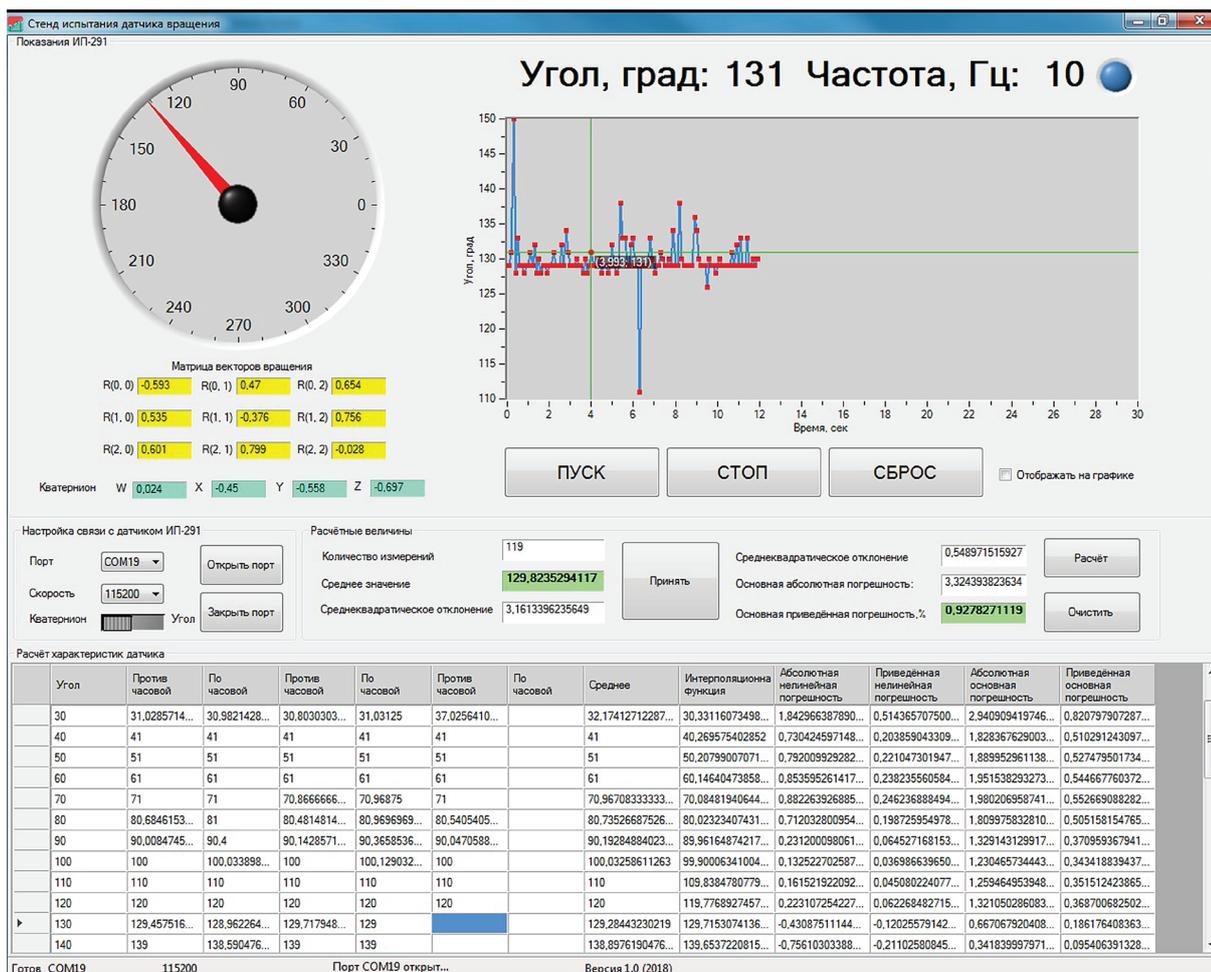


Рис. 5. Интерфейс программы для анализа данных датчика ИП-291

Тангаж:

$$pitch = \arcsin(-2 \cdot (q_1 \cdot q_3 - q_0 \cdot q_2)), \quad (1)$$

где q_0, q_1, q_2, q_3 – значения компонентов кватерниона.

Крен:

$$roll = \arctan(2 \cdot (q_0 \cdot q_1 + q_2 \cdot q_3) / (q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2)). \quad (2)$$

Курс:

$$yaw = \arctan(2 \cdot (q_1 \cdot q_2 + q_0 \cdot q_3) / (q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2)). \quad (3)$$

Результаты расчёта визуализируются на графике в реальном времени.

Методика проведения исследований.

1. После включения датчика измеряется время, необходимое для стабилизации показателей.

2. После стабилизации показаний датчика проводятся измерения длительностью не менее 10 с при каждом положении датчика ИП-291 в диапазоне от 0 до 360° с шагом 10° не менее 3-х измерений в каждом положении. Истинный угол измеряется с помощью квадранта

КО-60. Направление вращения датчика: сначала против часовой стрелки, затем по часовой стрелке.

3. Проводится расчёт статистических показателей процесса: среднеквадратическое отклонение, основная абсолютная погрешность, основная приведённая погрешность.

В таблице приведены результаты испытаний датчика ИП-291 с различными вариантами фильтров ориентации.

Из исследуемых фильтров ориентации только фильтр UKF по значению приведённой погрешности вышел за порог в 1%. Фильтр SRCKF после нескольких изменений угла положения датчика ИП-291 вызвал «зависание» контроллера, что сразу исключает его реализацию для дальнейшего исследования и использования.

Лучшим по стабильности показаний во всём диапазоне измеряемых углов и величине основной приведённой погрешности (0,678%) оказался расширенный фильтр Калмана на основе определителя матриц Якоби. Этот фильтр самый трудоёмкий в реализации и ресурсоёмкий с точки зрения потребности вычислительных ресурсов.

Результаты испытаний фильтров ориентации в датчике ИП-291

№	Фильтр ориентации	Задержка до стабилизации показателей после включения, с	Статистические характеристики		
			среднеквадратическое отклонение, °	основная абсолютная погрешность, °	основная приведённая погрешность, %
1	ЕКФ (на основе Якобиана)	0,01	0,117	2,433	0,678
2	ЕКФ (на основе метода Рунге-Кутты 4-го порядка)	0,01	0,549	3,324	0,988
3	UKF	0,01	1,531	6,421	1,796
4	СКФ	0,01	0,222	2,560	0,713
5	SRCKF	≈ 25	-	-	-
6	Madgwick filter	≈ 1	0,421	3,084	0,859

Кубатурный фильтр Калмана (СКФ) показал высокую стабильность показаний и хорошее значение основной приведённой погрешности (0,713%),

за исключением положения 300° (рис. 6), где амплитуда показателей составила до 20°, а среднеквадратическое отклонение выборки 0,9°.

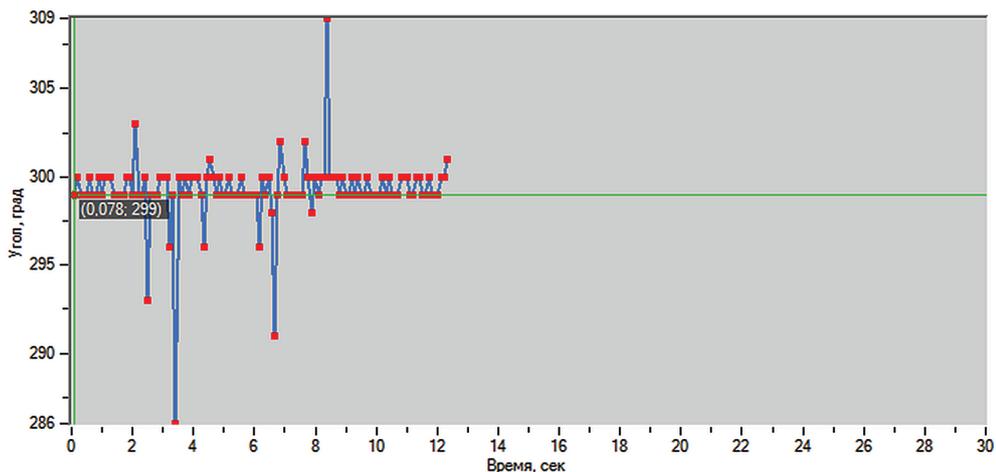


Рис. 6. Разброс показателей датчика ИП-291 с фильтром СКФ в положении 300°

Фильтр Мэджвика самый «лёгкий» с точки зрения вычислительных ресурсов и обеспечивает достаточную точность получения данных – основная

приведённая погрешность составила 0,859%. Проблемным для фильтра Мэджвика также оказалось положение 300° (рис. 7).

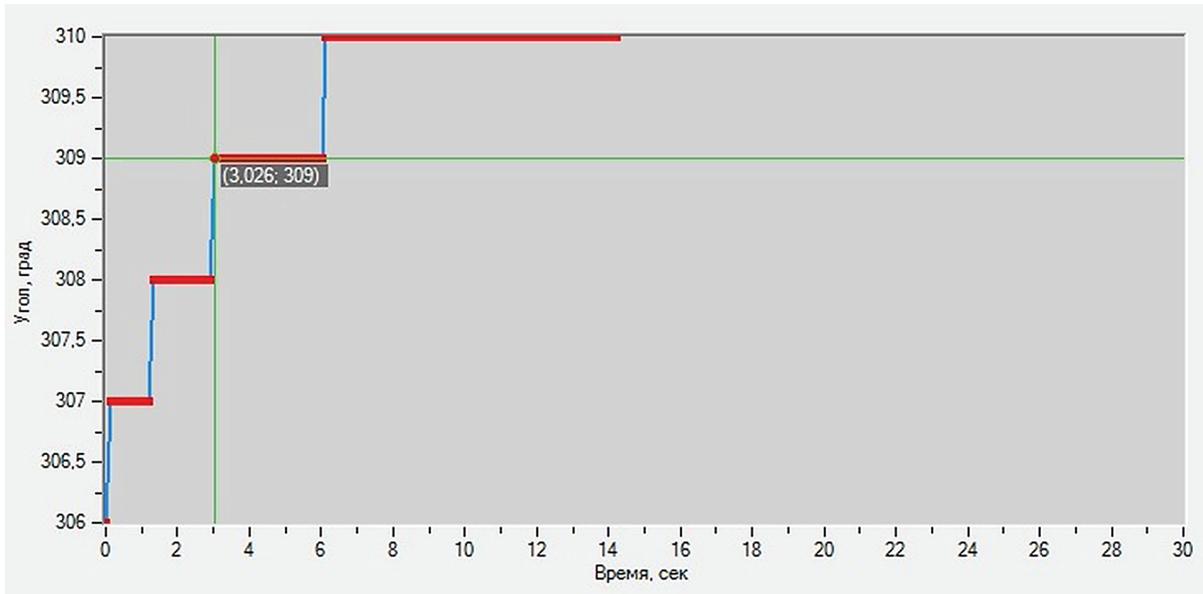


Рис. 7. Поведение показателей датчика ИП-291 с фильтром Мэджвика в положении 300°

В некоторых случаях требуется до 10 с для стабилизации показаний в этом положении.

Расширенный фильтр Калмана на основе метода Рунге-Кутта показал большую нестабильность

показателей в диапазоне 10...40° и 130...140° (рис. 8), что исключает возможность его применения в качестве фильтра ориентации для датчика ИП-291.

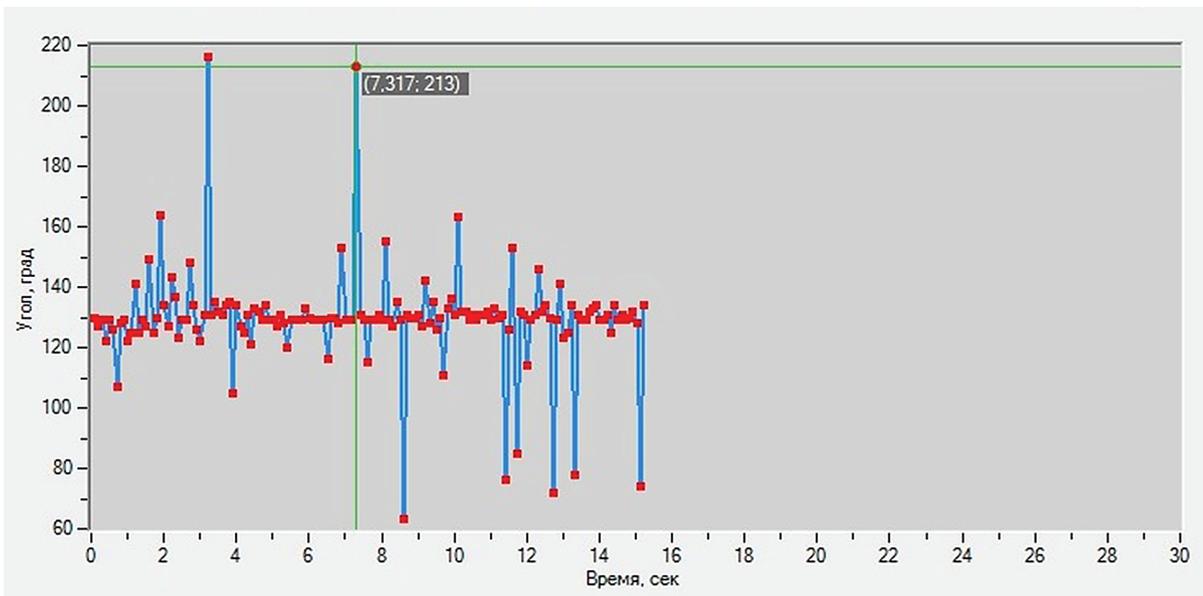


Рис. 8. Поведение показателей датчика ИП-291 с фильтром ЕКФ Рунге-Кутта в положении 130°

На диаграммах (рис. 9) приведены зоны стабильности показателей датчика ИП-291 с различ-

ными вариантами фильтров ориентации в диапазоне от 0 до 360°.

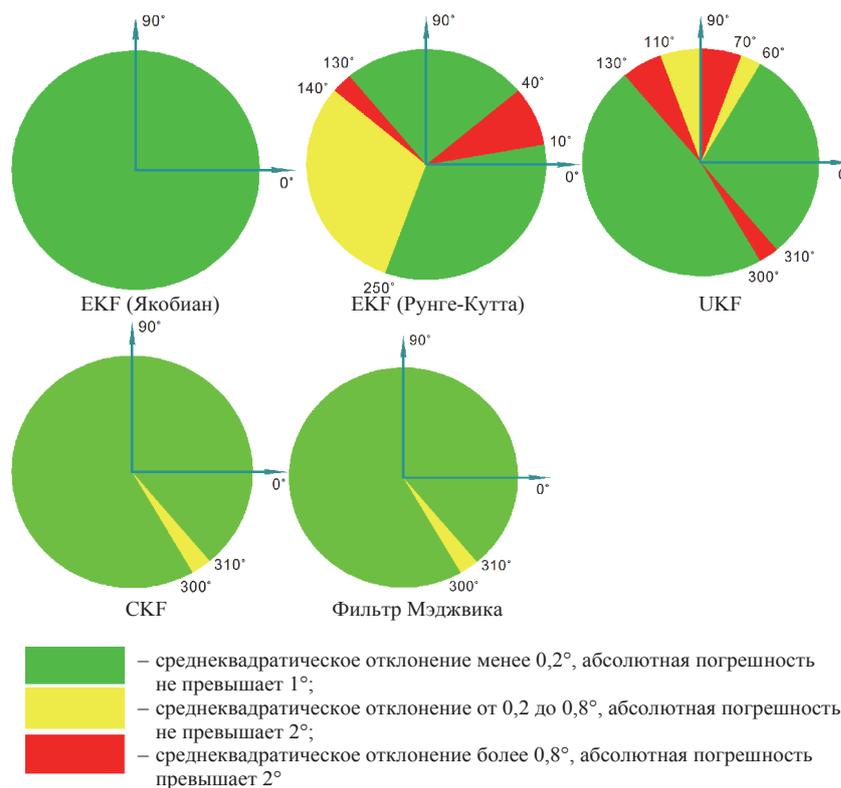


Рис. 9. Зоны стабильности показаний датчика ИП-291 с различными фильтрами ориентации

Выводы

Разработанный стенд для испытаний и программное обеспечение датчика ИП-291 реализуют шесть вариантов фильтров ориентации.

По результатам испытаний лучшим по точности измерения и стабильности показателей по всему диапазону измерения углов оказался вариант фильтра Калмана на основе вычисления Якобиана. Основная приведенная погрешность фильтра – $0,678\%$. Также хорошие показатели показали кубатурный фильтр Калмана и фильтр Мэдживка.

Варианты сигма-точечного и квадратно-корневого кубатурного фильтров Калмана показали высокую погрешность и нестабильность показаний.

С целью использования в качестве фильтра ориентации для инерциального датчика угла поворота ведущего колеса трактора ИП-291 выбран расширенный фильтр Калмана на основе вычисления Якобиана.

Библиографический список

1. Об определении функциональных характеристик (потребительских свойств) и эффективности сельскохозяйственной техники и оборудования: Постановление Правительства от 01.08.2016 № 740 // Собрание законодательства Российской Федерации. 2016. № 32. Ст. 5120.

2. ГОСТ 30745-2001 (ИСО 789-9-90) Тракторы сельскохозяйственные. Определение тяговых показателей. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. 11 с.

3. ГОСТ Р 52777-2007 Техника сельскохозяйственная. Методы энергетической оценки. М.: Стандартинформ, 2008. 7 с.

4. Лопарев А.А., Комкин А.С. Исследование буксования ведущих колес трактора в транспортно-технологическом сельскохозяйственном агрегате // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики: Материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. «Наука – Технология – Ресурсосбережение». Киров: Изд-во Вятской ГСХА, 2016. С. 158-161.

5. Видикер А.А., Бережнов Н.Н. Адаптация аппаратных средств измерительно-информационного комплекса для проведения контрольного динамометрирования энергонасыщенных МТА // Материалы VIII региональной науч.-практ. конф. студентов и аспирантов, посвященной 80-летию НГАУ-НСХИ (10-11 ноября 2016 г.). Новосибирск, 2016. С. 52-58.

6. Федоренко В.Ф., Мишуков Н.П., Трубицын Н.В., Таркинский В.Е. Применение инерциальной навигации для определения буксования сельскохозяйственных тракторов // Вестник Мордовского университета. 2018. № 1. Т. 28. С. 8-23.

7. MPU-9250. Product Specification. Revision 1.1. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/9-axis/mpu-9250/> (дата обращения: 01.04.2018).

8. Куликова М.В., Куликов Г.Ю. Численные методы нелинейной фильтрации для обработки сигналов и измерений // Вычислительные технологии. 2016. № 4. С. 64-98.

9. Кудрявцева И.А. Анализ эффективности расширенного фильтра Калмана, сигма-точечного фильтра Калмана и сигма-точечного фильтра частиц // Научный Вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2016. № 224 (2). С. 43-51.

10. Sebastian O.H. Madgwick An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor ar-

rays [Электронный ресурс]. URL: http://x-io.co.uk/res/doc/madgwick_internal_report.pdf (дата обращения: 01.04.2018).

11. Конвей Дж.Х., Смит Д.А. О кватернионах и октавах, об их геометрии, арифметике и симметриях. М.: МЦНМО, 2009. 184 с.

Статья поступила 05.04.2018

STUDYING METHODS OF OBTAINING AND DIGITAL PROCESSING OF SENSOR SIGNALS OF WHEEL TURNS OF FARM TRACTORS

VITALY YE. TARKIVSKY, PhD (Eng)

E-mail: Tarkivskiy@yandex.ru

Novokubansk Branch of Federal Scientific Budgetary Institution Rosinformagrotech (KubNIITiM); 352243, Krasnaya Str., 15, Novokubansk, Krasnodar Krai, Russian Federation

The author proves the necessity of determining the slipping of farm tractor wheels during testing with the purpose of determining their functional characteristics and gives account of the operating principle and design of an inertial sensor of the driving wheel turning angle ИП-291, based on the sensor of the inertial navigation system MPU-9250. The main existing mathematical methods for nonlinear filtering of the initial data of 9-axis inertial orientation sensors have been analyzed for this purpose. A software has been developed to implement various variants of mathematical models for processing data of inertial orientation sensors. The bench design and the software for testing the ИП-291 sensor are described with the purpose of determining the accuracy and stability of the indications in the range from 0 to 360° with various variants of mathematical models of digital filters. The author presents the implementation and test results of the sensor IP-291. The main advantages of the inertial sensor ИП-291 are the ease of its mounting on a tractor wheel, as well as no need in power and information cables. It has been established that in order to select the optimal mathematical filter it is necessary to meet the following criteria: measurement error – no more than 1%, standard deviation of indications – no more than 0,5°, and an operating range of measurements – from 0 to 360°. Proceeding from the test results, the authors have chosen the best accuracy measurement (the main full-scale error of 0.678%) and the stability of indices (standard deviation of 0.117°) for the extended Kalman filter based on the Jacobian calculation. The selected mathematical model of the filter allows using the inertial navigation technology to calculate the change in the rotation angle of the driving wheel of a tractor with subsequent calculation of speed and skidding.

Key words: digital processing, mathematical methods, mathematical model, inertial wheel rotation sensor, orientation filter, Kalman filter.

References

1. Ob opredelenii funktsional'nykh kharakteristik (potrebitel'skikh svoystv) i effektivnosti sel'skokhozyaystvennoy tekhniki i oborudovaniya: postanovleniye Pravitel'stva ot 01.08.2016 No. 740 [On the determination of functional characteristics (consumer properties) and the effectiveness of agricultural machinery and equipment: Government Decree of 01.08.2016 No. 740]. Sobraniye zakonodatel'stva Rossiyskoy Federatsii, 2016. No. 32. Art. 5120. (in Rus.).

2. GOST 30745-2001 (ISO 789-9-90) Traktory sel'skokhozyaystvennyye. Opredeleniye tyagovykh pokazateley [Farm tractors. Determination of traction indicators]. Moscow, IPK Izdatel'stvo standartov, 2002: 11. (in Rus.).

3. GOST R52777-2007 Tekhnika sel'skokhozyaystvennaya. Metody energeticheskoy otsenki [Farm machinery. Methods of energy estimation]. Moscow, Standartinform, 2008: 7. (in Rus.).

4. Loparev A.A., Komkin A.S. Issledovaniye buksovaniya vedushchikh koles traktora v transportno-tekhnologicheskoy sel'skokhozyaystvennoy aggregate [Study of the slippage of tractor driving wheels in a transport-technological farm machine]. *Uluchsheniye ekspluatatsionnykh pokazateley sel'skokhozyaystvennoy energetiki: Mat-ly IX Mezhdunar. nauch. – prak. konf. "Nauka – Tekhnologiya – Resursoberezheniye"*. Kirov, Izd-vo Vyatskaya GSKHA, 2016: 158-161. (in Rus.).

5. Vidiker A.A., Berezhnov N.N. Adaptatsiya apparatnykh sredstv izmeritel'no-informatsionnogo kompleksa dlya provedeniya kontrol'nogo dinamometrirovaniya energonasyshchennykh MTA [Adaptation of the measuring and information hardware for the control dynamometry of an energy-saturated machine-and-tractor unit]. *Mat-ly VIII regional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov i aspirantov, posvyashchennoy 80-letiyu NGAU-NSKHI* (November 10-11, 2016). Novosibirsk, 2016: 52-58. (in Rus.).

6. Fedorenko V.F., Mishurov N.P., Trubitsyn N.V., Tarkivskiy V.Ye. Primeneniye inertsiyal'noy navigatsii dlya opredeleniya buksovaniya sel'skokhozyaystvennykh traktorov [Applying inertial navigation to determine the slippage of farm tractors]. *Vestnik Mordovskogo universiteta*, 2018; 1(28): 8-23. (in Rus.).

7. MPU-9250. Product Specification. Revision 1.1. [Electronic resource]. URL: <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/9-axis/mpu-9250/> (Access date 01.04.2018). (in Rus.).

8. Kulikova M.V., Kulikov G.Yu. Chislennyye metody nelineynoy fil'tratsii dlya obrabotki signalov i izmereniy [Numerical methods of nonlinear filtering for processing signals and measurements]. *Vychislitel'nyye tekhnologii*, 2016; 4: 64-98. (in Rus.).

9. Kudryavtseva I.A. Analiz effektivnosti rasshirenogo fil'tra Kalmana, sigma-tochechnogo fil'tra Kalmana

i sigma-tochechnogo fil'tra chastits [Analysing the efficiency of the extended Kalman filter, the Kalman sigma-point filter and the sigma-point particle filter]. *Nauchnyy Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoy aviatsii*, 2016; 224 (2): 43-51. (in Rus.).

10. Sebastian O.H. Madgwick. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays [Electronic resource]. URL: http://x-io.co.uk/res/doc/madgwick_internal_report.pdf (Access date 01.04.2018).

11. Conway J.Ch., Smith D.A. O kvaternionakh i oktavakh, ob ikh geometrii, arifmetike i simmetriyakh [On quaternions and octaves, their geometry, arithmetics and symmetries]. Moscow, MTSNMO, 2009: 184. (in Rus.).

The paper was received on April 5, 2018

УДК 631.361.022

DOI 10.26897/1728-7936-2018-5-20-24

ПАСТУХОВ АЛЕКСАНДР ГЕННАДИЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор

E-mail: pastukhov_ag@mail.ru

БАХАРЕВ ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент

E-mail: baharevdn_82@mail.ru

Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина, 308503, ул. Вавилова, 1, пос. Майский, Белгородский район, Белгородская область, Российская Федерация

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТА ФАСОННОГО ШИПА И ЗЕРНА КУКУРУЗЫ В МОЛОТИЛЬНОЙ КАМЕРЕ

Для эффективного обмолота початков кукурузы рабочие органы современных молотильных устройств комплектуются стальными шипами различной формы. Конструкционные параметры данных шипов обоснованы экспериментально, без предшествующих теоретических исследований. Предлагается конструкция нового фасонного шипа молотильного устройства для початков кукурузы, полученного на основании анализа конструктивных особенностей биологических прототипов шипов и отличающегося от широко распространенного круглого шипа кривизной рабочей поверхности. В качестве биологических прототипов были приняты жвалы амбарных вредителей (элементы ротового аппарата насекомых, поедающих зерно кукурузы). Проведено 3D-моделирование контакта оболочки зерна кукурузы со стальными шипами существующей круглой формы и шипами новой фасонной формы. Установлено, что площадь контакта круглого шипа и оболочки зерна кукурузы представляет собой эллипсоид, а площадь контакта нового фасонного шипа и оболочки зерна кукурузы – сложную фигуру, состоящую из эллипсоида и эллиптического параболоида. Проведены теоретические исследования, в результате которых получены выражения для определения объемов оболочки зерна, вдавленной внутрь круглым и фасонным шипом. Проанализированы области контакта зерна с круглым и фасонным шипом по размеру площади контакта и глубине проникновения шипа в зерно. Установлено относительное равенство вдавливаемых объемов оболочки зерна как круглым, так и фасонным шипом и выявлена значительная разница в размерах площади контакта: для круглого шипа площадь контакта с оболочкой зерна кукурузы составляет 3,12 мм², а нового фасонного шипа – 5,17 мм². Следовательно, при использовании фасонных шипов новой конструкции обмолачивающая сила распределяется по большей области, что снизит вероятность нанесения зерну макро- и микроповреждений.

Ключевые слова: зерно кукурузы, обмолот, фасонный шип, биологический прототип, деформация зерна.

Введение. Переработка урожая кукурузы начинается с обмолота. При обмолоте зерно получает макро- и микроповреждения [1-4]. Через поврежде-

ния к внутренним тканям зерна проникают различные микроорганизмы и грибки, которые ухудшают семенные, продовольственные или фуражные свой-