



## Цифровые методы обработки данных при оценке тягового усилия тракторов

В. Ф. Федоренко<sup>1</sup>, В. Е. Таркивский<sup>2\*</sup>, Н. П. Мишуров<sup>1</sup>,  
Н. В. Трубицын<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБНУ «Росинформагротех» (р. п. Правдинский, Российская Федерация)

<sup>2</sup>Новокубанский филиал ФГБНУ «Росинформагротех»  
(г. Новокубанск, Российская Федерация)

\*[tarkivskiy@yandex.ru](mailto:tarkivskiy@yandex.ru)

**Введение.** При проведении энергетической оценки сельскохозяйственных машин и тяговых испытаний тракторов важнейшим показателем является величина тягового усилия. Существующие методы определения тягового усилия тракторов подразумевают использование специализированных средств измерений, таких как тензометрические датчики и устройства обработки и отображения информации. На точность определения тягового усилия оказывают значительное влияние физико-механические свойства почвы. Для обработки полезного сигнала во время измерения тягового усилия поток данных тензометрического датчика необходимо подвергать дополнительной цифровой фильтрации с учетом условий функционирования сельскохозяйственного агрегата.

**Материалы и методы.** Проанализированы функции изменения тягового усилия, полученные на тракторе К-744Р2 на различных передачах. Разработан алгоритм цифровой обработки сигнала тензометрического силоизмерителя на основе медианного фильтра, позволяющий повысить точность измерений. Преимуществом предложенного метода является способность отсекал резкие кратковременные импульсные помехи и колебания амплитуды измеренной величины.

**Результаты исследования.** Предложен метод определения величины тягового усилия с помощью медианной обработки сигнала. Разработано устройство для определения тягового усилия при испытаниях сельскохозяйственных тракторов и агрегатов. Обоснован выбор основных компонентов устройства определения величины тягового усилия. В результате исследований было сконструировано и изготовлено устройство для измерения и цифровой обработки сигнала силоизмерителя на базе микроконтроллера и специализированного программного обеспечения для обработки исходных данных в реальном времени.

**Обсуждение и заключение.** Разработанный метод позволяет исключить негативный эффект импульсных помех, возникающих в процессе измерения тягового усилия трактора. Предложенное устройство для измерения тягового усилия тракторов совместимо на уровне протокола обмена с существующими устройствами, обладает высокой скоростью работы в реальном времени, имеет многоканальный режим.

**Ключевые слова:** испытания, тяговое усилие, цифровой фильтр, импульсные помехи, тензометрический силоизмеритель, измерительная система

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Федоренко В. Ф., Таркивский В. Е., Мишуров Н. П., Трубицын Н. В., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

*Для цитирования:* Цифровые методы обработки данных при оценке тягового усилия тракторов / В. Ф. Федоренко, В. Е. Таркивский, Н. П. Мишуров, Н. В. Трубицын. – DOI [10.15507/2658-4123.031.202101.127-142](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.127-142) // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 1. – С. 127–142.

*Original article*

## Digital Data Processing Methods for Estimating Tractive Force of Tractors

V. F. Fedorenko<sup>a</sup>, V. E. Tarkivskiy<sup>b\*</sup>, N. P. Mishurov<sup>a</sup>,  
N. V. Trubitsyn<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Rosinformagrotech (Pravdinskiy, Russian Federation)*

<sup>b</sup>*Novokubansk Branch of Rosinformagrotech (Novokubansk, Russian Federation)*

\**tarkivskiy@yandex.ru*

*Introduction.* When carrying out an energy assessment of agricultural machines and traction tests of tractors, the most important indicator is the value of the tractive effort. The existing methods for determining the tractive effort of tractors imply the use of specialized measuring instruments, such as strain gauges and devices for processing and displaying information. The accuracy of determining the tractive effort is significantly influenced by the physical and mechanical properties of soil. To process the useful signal during the measurement of tractive effort, the data stream of the strain gauge sensor must be subjected to additional digital filtering taking into account the operating conditions of the agricultural unit.

*Materials and Methods.* The functions of changing the tractive effort obtained on the K-744R2 tractor in various gears have been analyzed. An algorithm for digital processing of the signal of a strain gauge force meter based on a median filter has been developed that makes it possible to increase the measurement accuracy. The advantage of the proposed method is the ability to cut off sharp short-term impulse noise and sharp fluctuations in the amplitude of the measured value.

*Results.* A method for determining the amount of tractive effort using median signal processing has been proposed. A device for determining the tractive effort during testing of agricultural tractors and units has been developed. The choice of the main components of the device for determining the magnitude of the tractive effort has been substantiated. As a result of the research, a device for measuring and digital processing of the signal of a force meter based on a microcontroller and specialized software for processing initial data in real time was designed and manufactured.

*Discussion and Conclusion.* The developed method makes it possible to exclude the negative effect of impulse noise arising in the process of measuring the tractive effort of the tractor. The proposed device for measuring the tractive effort of tractors is compatible at the level of the exchange protocol with existing devices, has a high speed of operation in real time, multi-channel operation.

**Keywords:** tests, tractive force, digital filter, pulse interference, strain gauge, measuring system

**Conflict of interest:** The authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Fedorenko V.F., Tarkivskiy V.E., Mishurov N.P., et al. Digital Data Processing Methods for Estimating Tractive Force of Tractors. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(1):127-142. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.127-142>

## Введение

При испытаниях сельскохозяйственных тракторов с целью определения их характеристик важным условием является установившийся режим работы при номинальном тяговом усилии. Экспериментальный и расчетный методы определения номинального тягового усилия тракторов сельскохозяйственного назначения отражены в межгосударственном стандарте ГОСТ 27021-86<sup>1</sup>.

Экспериментальный метод заключается в определении номинального тягового усилия при испытаниях на невзлущенной стерне озимых колосовых в соответствии с межгосударственным стандартом определения тяговых показателей<sup>2</sup>. В этом стандарте определены общие требования к испытываемому трактору и точности средств измерения для определения показателей. Также сделан акцент на требованиях к линии действия тягового усилия, которая должна быть горизонтальной и лежать в продольной плоскости симметрии трактора, отклонение не должно превышать 3°.

Наибольшую точность при определении тягового усилия, развиваемого трактором в реальном времени, дает метод прямого измерения. Он заключается в использовании силоизмерителя, устанавливаемого в соответствии с требованиями [1; 2]. Сигнал, полученный от силоизмерителя, увеличивается аппаратным усилителем. Далее нормализуется аппаратно-программным устройством, где убираются помехи и паразитные шумы. И, наконец, аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) превращает значение напряжения сигнала в числовой двоичный код, который используется при расчете показателей.

В стандартах на испытания тракторов определено, что начинать измерения тягового усилия можно только после обеспечения стабильного режима работы, но методы получения тягового усилия не конкретизируются. Также отсутствуют алгоритмы расчета значений тягового усилия в зависимости от режимов работы трактора (скорости, тягового усилия, буксования) и почвенного фона, которые обеспечивали бы высокую точность измерений и возможность получения информации непосредственно во время испытаний [3].

Широко распространенные в НИИ, вузах и системе испытаний сельскохозяйственной техники Минсельхоза России измерительные информационные системы для испытаний ИП-264 основаны на модулях ввода аналоговых сигналов I-7016 фирмы ICP или аналогичных. Частота преобразования аналоговых сигналов у них составляет 10 с<sup>-1</sup>. Модуль имеет 24-разрядный сигма-дельта АЦП и внутренний нормализатор входных сигналов в диапазоне от -20 до +20 мВ. В 1970–80-х годах было найдено широкое применение измерительным системам ЭМАП и ЭМАПМ. Частота преобразования сигналов тензOMETрических датчиков у них также составляла 10 с<sup>-1</sup> [4].

Во время проведения испытаний измерительная система аккумулирует и усредняет полученные значения напряжения аналогового сигнала, сформированного силоизмерительным датчиком.

Так как почва на участке испытаний в силу своей природы не является однородной, это может привести к резким изменениям значений тягового усилия. При использовании обычного усреднения эти скачки значений могут оказать

<sup>1</sup> ГОСТ 27021-86. Тракторы сельскохозяйственные и лесохозяйственные. Тяговые классы. М., 1986. 6 с.

<sup>2</sup> ГОСТ 30745-2001 (ИСО 789-9-90). Тракторы сельскохозяйственные. Определение тяговых показателей. М., 2002. 22 с.

существенное влияние на конечный результат. Исходя из вышесказанного, важной задачей при прямом измерении тягового усилия с помощью тензометрического силоизмерителя является разработка дополнительного метода обработки значений в реальном времени с целью отсеки значительных выбросов с учетом характера среды, где происходит измерение.

Цель работы – совершенствование технологии измерения величины тягового усилия во время испытаний сельскохозяйственных тракторов и агрегатов на основе цифровой обработки сигнала тензометрического силоизмерителя.

### Обзор литературы

Анализ отечественной и зарубежной литературы, посвященной точным измерениям с использованием тензометрических силоизмерителей, показывает, что комплексный подход повышения качества измерений включает в себя аппаратные и программные решения, которые комбинируются в той или иной степени. Для компенсации смещения нуля (разбалансировки тензометрического моста) и устранения негативного влияния длины проводов между датчиком и измерительной системой применяются различные варианты подключения, каскад усилителей, дополнительное измерение напряжения возбуждения датчика и т. д. Существуют различные аппаратные решения для повышения точности измерений, например, использование дополнительного АЦП, измеряющего величину компенсации сигнала длины информационных проводов между измерительной системой и датчиком [5–8]. Такие решения при испытаниях сельскохозяйственной техники применяются редко, так как требуют существенного усложнения аппаратной и программной частей измерительного комплекса, дополнительных проводов между датчиком и измерительной системой и служат только для

нейтрализации влияния электромагнитной составляющей помехи при измерении сигнала [9–12].

С целью выполнения задачи обработки сигнала от датчика до получателя последовательность данных необходимо преобразовать. Сигнал преобразуется в соответствии с алгоритмом, реализующим конкретную математическую задачу. Устройства, или программные алгоритмы обработки сигнала, называются фильтрами. Они бывают аппаратными и программными. Их характеристики выражаются в виде изменений таких параметров сигнала, как частота, фаза или амплитуда.

Цифровой обработке сигналов посвящены многочисленные исследования, основная цель которых улучшение качества полезного сигнала из последовательности данных, а также подавление вредных сигналов в входящих последовательностях отсчетов [13–15].

В зарубежной литературе предлагаются варианты обработки цифровых данных с помощью различных вариантов фильтров Калмана [16–19]. Такой подход имеет ряд недостатков, так как фильтры Калмана требуют предварительной настройки в зависимости от характера обрабатываемого сигнала, а также предъявляют высокие требования к аппаратной части (высокая производительность, объем памяти). Эти недостатки не позволяют использовать фильтры Калмана при обработке данных датчика тягового усилия трактора.

На рисунке 1 показаны графически зависимости значений тягового усилия, развиваемого трактором К-744Р2 на различных передачах. Диаграммы получены измерительной информационной системой ИП-264 без предварительной обработки с частотой преобразования  $10 \text{ с}^{-1}$ .

Для анализа функции сигнала тягового усилия применялось дискретное преобразование Фурье. С его помощью

можно преобразовать сигнал из временной области в частотную и представить любую функцию в виде набора гармонических сигналов разных частот.

На рисунке 2 представлены гистограммы плотности распределения вероятностей функции изменения тягового усилия.

На рисунке 3 представлены графики распределения частот по спектру сигнала датчика тягового усилия.

Из гистограмм на рисунке 2 следует, что вероятность изменения тягового сопротивления при установившемся режиме подчиняется нормальному закону распределения.

Как следует из зависимостей на рисунке 3, выбросы имеют случайный характер в диапазоне частот до 10 Гц. При этом амплитуда может достигать 97 кН, что при использовании обычного усреднения сигнала может существенно повлиять на результат измерения.

Для обработки сигнала тензометрического датчика тягового усилия предлагается применить алгоритм медианной фильтрации [20; 21].

Алгоритм медианной фильтрации выглядит следующим образом:

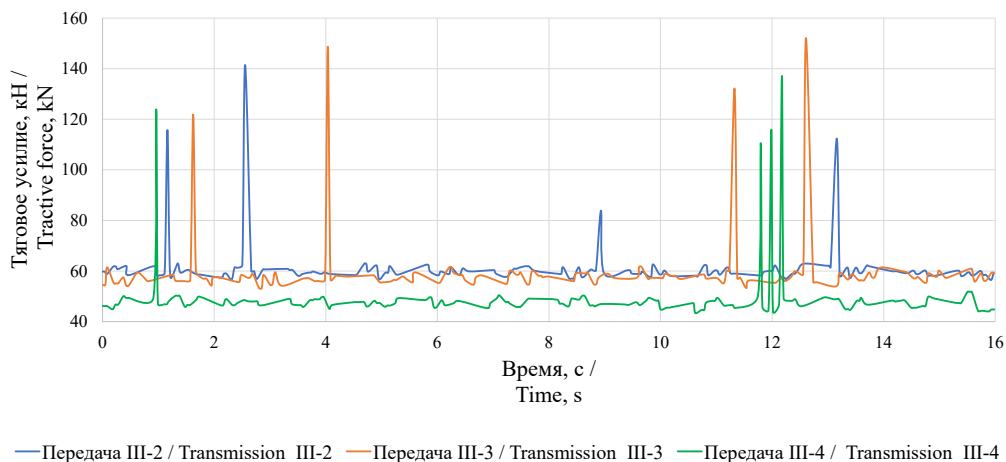
1) новое значение поступает в последовательный буфер, имеющий нечетный размер  $K$ , смещая все остальные на один шаг;

2) с помощью алгоритма быстрой сортировки значения в буфере перераспределяются по возрастанию или убыванию;

3) выходное значение фильтра принимается как элемент буфера со средним индексом  $K/2 + 1$ .

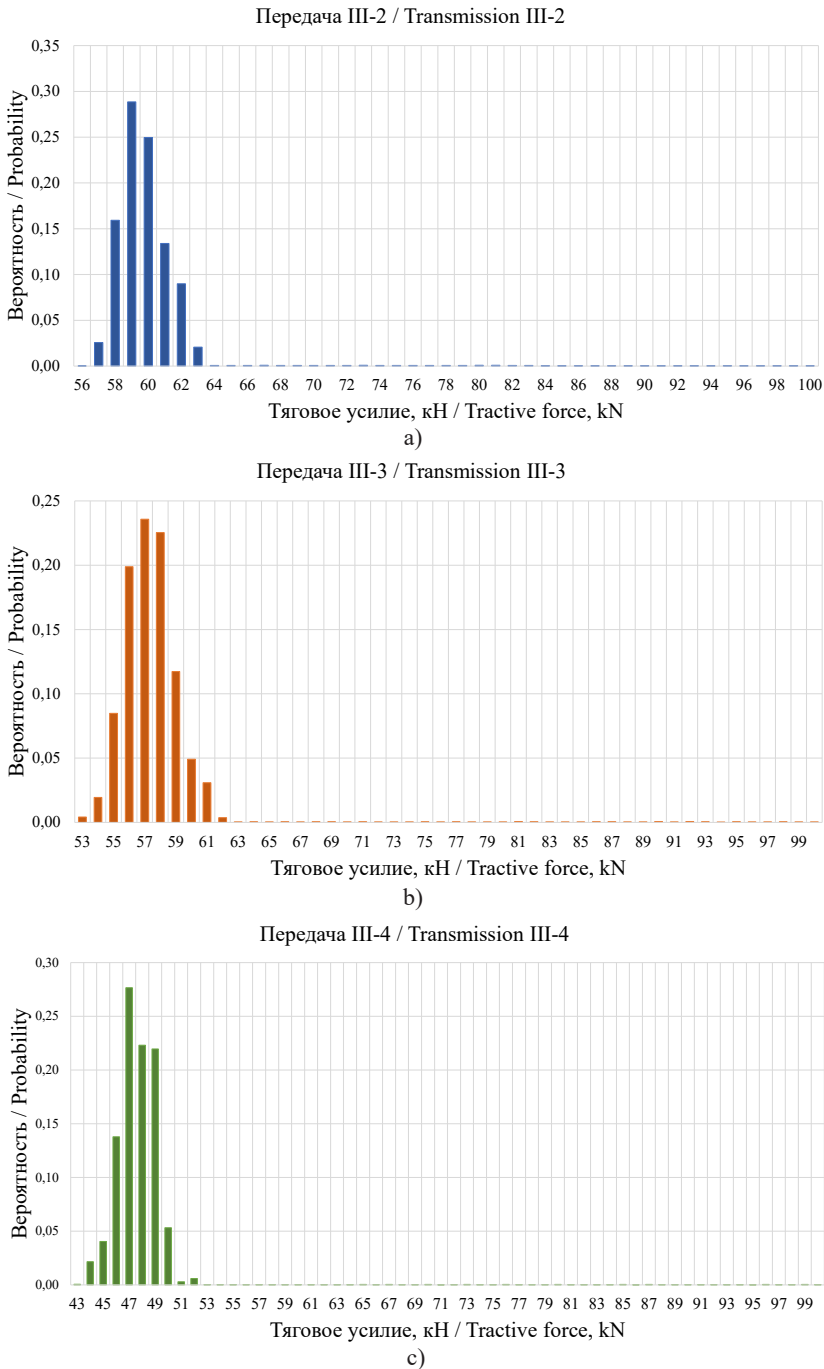
В случае использования буфера четной длины за результирующее значение принимается среднее двух соседних элементов с индексами  $K/2$  и  $K/2 + 1$ .

Алгоритм медианной фильтрации имеет ряд преимуществ по сравнению с фильтрами Калмана: эффективно удаляет импульсные помехи при высокочастотной оцифровке сигналов тензометрических датчиков, значения которых резко выделяются на фоне основного потока данных; нелинейный, что позволяет использовать его для обработки рядов данных неоднородных и нестационарных процессов, например при измерении тягового усилия трактора; прост в программной реализации и не требует производительной аппаратной части.



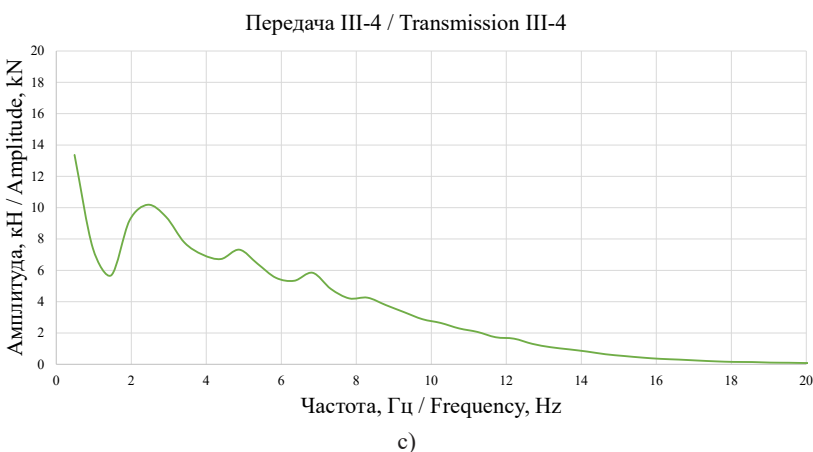
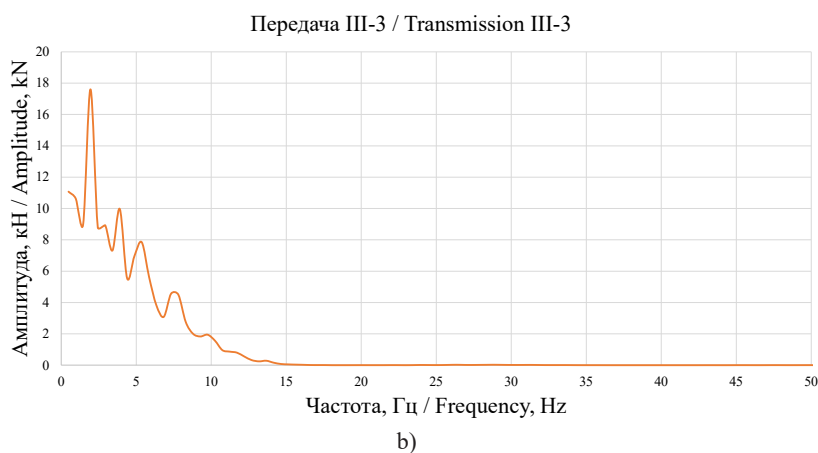
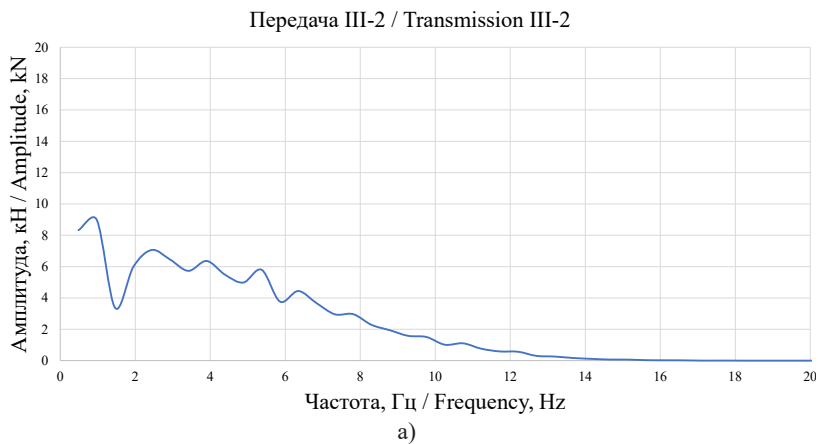
Р и с. 1. Графики значений тягового усилия трактора К-744Р2

F i g. 1. Graphs of tractor traction force values K-744P2



Р и с. 2. Гистограммы плотности распределения вероятностей:  
 а) передача III-2; б) передача III-3; в) передача III-4

F i g. 2. Density histograms of the probability distribution:  
 а) transmission III-2; б) transmission III-3; в) transmission III-4



Р и с. 3. Графики спектральной плотности сигнала датчика тягового усилия:  
а) передача III-2; б) передача III-3; в) передача III-4

F i g. 3. Graphs of the spectral density of the tractive effort sensor signal:  
а) transmission III-2; б) transmission III-3; в) transmission III-4



### Материалы и методы

Для проверки разработанного метода определения тягового усилия были проведены экспериментальные исследования, включающие следующие этапы:

1) разработка микропроцессорного устройства для определения тягового усилия трактора;

2) реализация алгоритма обработки данных в режиме реального времени в устройстве для определения тягового усилия;

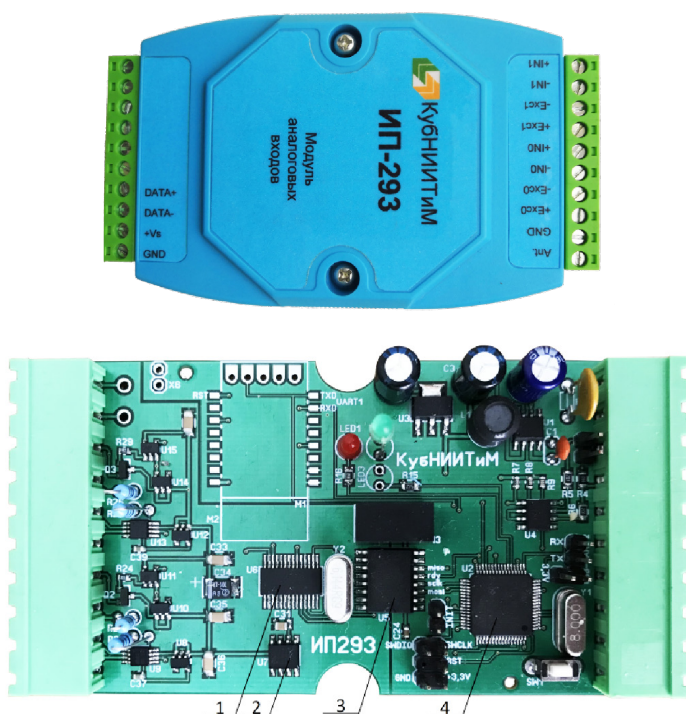
3) проведение измерений на тракторе, оборудованном устройством для определения тягового усилия;

4) анализ полученных результатов.

В результате исследований разработано измерительное устройство «Модуль

аналоговых входов ИП-293» для измерения величины тягового усилия трактора. Высокопроизводительный микропроцессор STM32 позволяет обрабатывать входной поток данных в режиме реального времени с помощью адаптивного цифрового фильтра. Частота преобразования сигнала тензодатчика достигает 2 кГц. Модуль имеет стандартные размеры и может устанавливаться в любой измерительной системе вместо модулей типа ICP или ADAM. Также поддерживаются протоколы связи DCON и Modbus.

Для преобразования сигнала датчика в цифровой вид служит микросхема АЦП AD7734, которая представляет собой сигма-дельта АЦП или АЦП с балансировкой заряда.



Р и с. 4. Модуль аналоговых входов ИП-293: 1 – четырехканальное АЦП AD7734; 2 – преобразователь интерфейсов UART-RS485; 3 – модуль буферной памяти Micron M25P80; 4 – процессор STM32F405RG

F i g. 4. Analog input module IP-293: 1 – 4-channel ADC AD7734; 2 – interface converter UART-RS485; 3 – Micron M25P80 Buffer Memory Module; 4 – processor STM32F405RG



Благодаря низкому уровню собственного шума сигма-дельта АЦП достигают высокой точности преобразования аналогового сигнала в цифровой. Для достижения высокой точности преобразования необходимо, чтобы частота работы цифрового фильтра была ниже частоты работы сигма-дельта модулятора, поэтому сигма-дельта АЦП имеют относительно низкую скорость преобразования (до 2 000 с<sup>-1</sup>).

Для расчета значений датчика тягового усилия применен контроллер STM32F405RG с «прошитой» программой цифровой фильтрации на основе предложенного алгоритма. Краткая техническая характеристика модуля аналоговых входов ИП-293 представлена в таблице 1.

В модуле имеется возможность записи напрямую во встроенную память модуля ИП-293 с частотой 2 000 преобразований в секунду одновременно по двум каналам. Емкость внутренней памяти на 30 мин непрерывной записи.

Также значения тягового усилия могут передаваться в режиме «запрос-

ответ» по протоколу Modbus RTU или DCON. Так как модули могут объединяться в сеть на основе интерфейса связи RS-485, у каждого модуля должен быть индивидуальный адрес от 0 до 99. Программное обеспечение модуля ИП-293 датчика написано в среде разработки MikroElektronika MikroC [22].

Проверка разработанного модуля и цифрового фильтра обработки была произведена на тракторе К-744 в агрегате с тяговой тележкой УВТН-100. Для измерения тягового усилия трактора использовался тензометрический силоизмеритель на 100 кН, подключенный к модулю ИП-293, установленному в измерительной системе СИ-302 (ИП-264).

#### Результаты исследования

В результате проведенных экспериментальных исследований были получены графики-зависимости изменения тягового усилия трактора К-744Р2 на передачах III-2, III-3 и III-4 во время тяговых испытаний. Они обработаны с помощью цифрового фильтра в модуле аналогового ввода ИП-293 (рис. 4).

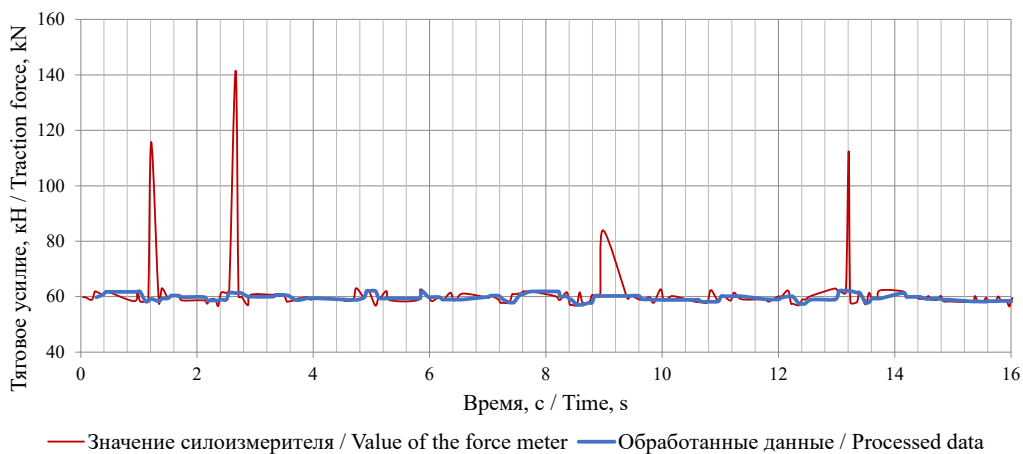
Таблица 1

Table 1

**Краткая техническая характеристика модуля аналоговых входов ИП-293**  
**Brief technical characteristics of the analog input module IP-293**

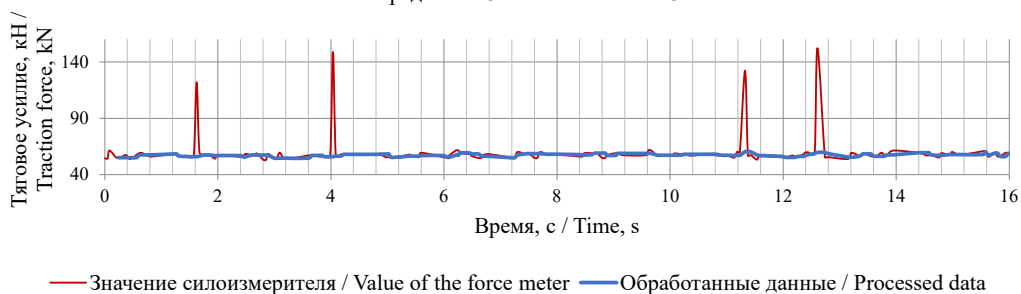
Показатели / Indicators	Значения / Indicator values
Напряжение питания, В / Supply voltage, V	10–30
Максимальная потребляемая мощность, Вт / Maximum power consumption, W	3
Количество аналоговых входов, ед. / Number of analog inputs, unit	2
Характеристики АЦП / ADC Specifications: – тип преобразования / type of conversion – разрядность, бит / resolution, bit – скорость преобразования, с <sup>-1</sup> / conversion rate, с <sup>-1</sup>	Сигма-дельта / Sigma-delta 24 2 000
Напряжение питания датчиков, В / Sensor supply voltage, V	5
Интерфейс связи / Communication interface	RS-485
Габаритные размеры, мм / Overall dimensions, mm	120 × 70 × 35
Масса, г / Weight, g	130
Рабочий диапазон температур окружающей среды, °С / Operating ambient temperature range, °С	0–55

Передача III-2 / Transmission III-2



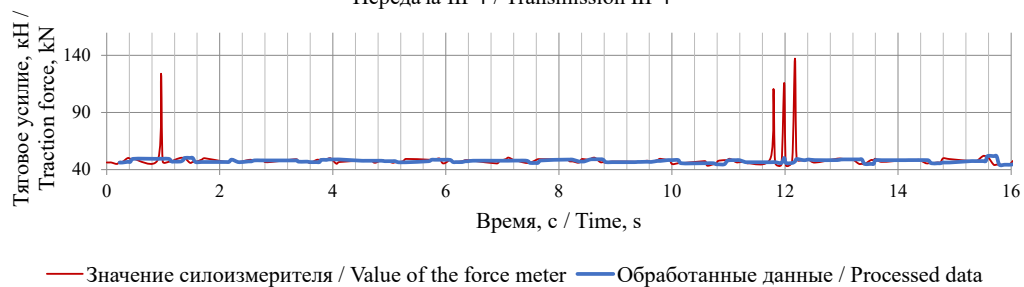
a)

Передача III-3 / Transmission III-3



b)

Передача III-4 / Transmission III-4



c)

Р и с. 5. Графики исходных и обработанных цифровым фильтром значений тягового усилия трактора К-744Р2: а) передача III-2; б) передача III-3; в) передача III-4

F i g. 5. Graphs of source and processed by digital filter values of traction of the tractor K-744P2: а) transmission III-2; б) transmission III-3; в) transmission III-4

На передаче III-2 (рис. 5а) отмечено шесть кратковременных выбросов значений тягового усилия, при этом пиковое значение достигает 154 кН при установившемся значении тягового усилия  $\approx 60$  кН. После обработки цифровым фильтром выбросов больше нет. На передаче III-3 (рис. 5б) отмечено четыре кратковременных выброса значений тягового усилия, при этом пиковое значение достигает 152 кН при установившемся значении тягового усилия  $\approx 57$  кН. После обработки выбросы отсутствуют. На передаче III-4 (рис. 5с) отмечено четыре кратковременных выброса значений тягового усилия, при этом пиковое значение достигает 137 кН при установившемся значении тягового усилия  $\approx 48$  кН.

В таблице 2 приведены результаты экспериментальных исследований.

### Обсуждение и заключение

После обработки сигнала разработанным цифровым фильтром изменилась в сторону уменьшения амплитудная характеристика, но при этом частотная осталась без изменений. Резко уменьшилась дисперсия и коэффициент вариации за счет отсеечения пиков.

Предложенные решения для определения тягового усилия трактора при испытаниях имеют следующие преимущества:

- эффективная работа цифрового фильтра по отсечению импульсных помех;
- несложный алгоритм предложенного цифрового фильтра, который позволяет реализовывать его на маломощных микроконтроллерах;
- возможность функционирования фильтра в режиме реального времени;

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

**Результаты применения цифрового фильтра при измерении тягового усилия трактора**  
**Results of applying a digital filter when measuring tractor traction**

Диапазон, передача / Range, transmission	Параметр / Parameter				
	Среднее, кН / Average, kN	Размах колебаний, кН / Fluctuation change, kN	Дисперсия, кН <sup>2</sup> / Dispersion, kN <sup>2</sup>	Стандартное отклонение, кН / Standard deviation, kN	Коэффициент вариации, % / The coefficient of variation, %
III-2: – значения силоизмерителя / force meter values – обработанные цифровым фильтром / digitally filtered	61,525	97,837	143,363	11,973	20,461
	59,524	5,054	1,358	1,165	1,957
III-3: – значения силоизмерителя / force meter values – обработанные цифровым фильтром / digitally filtered	59,149	98,888	152,201	12,337	20,857
	57,337	5,586	1,702	1,305	2,275
III-4: – значения силоизмерителя / force meter values – обработанные цифровым фильтром / digitally filtered	49,028	93,725	118,269	10,875	22,181
	47,470	7,482	1,988	1,410	2,970

– многоканальная реализация модуля аналогового ввода ИП-293, что позволяет подключать к нему одновременно несколько независимых датчиков;

– полная физическая и электрическая совместимость модуля ИП-293 с аналогичными модулями типа I-7016, что позволяет устанавливать его в штатное место измерительной информационной системы;

– совместимость на уровне протокола обмена данными с аналогами, что помогает использовать штатное программное обеспечение измерительных информационных систем;

– возможность непрерывной записи во внутреннюю память модуля ИП-293 процесса измерений.

Применение разработанного модуля аналогового ввода ИП-293 со встроенным цифровым фильтром обработки сигнала датчика тягового усилия позволяет: повысить точность измерения тягового усилия независимо от скорости движения агрегата и почвенного фона; сократить время испытаний сельскохозяйственных тракторов и машин за счет возможности мониторинга режима работы агрегата в реальном времени.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Трубицын, Н. В. Современные микропроцессорные системы для разработки средств испытаний / Н. В. Трубицын, В. Е. Таркивский // Техника и оборудование для села. – 2013. – № 12. – С. 31–32. – URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/download/60-arkhiv-zhurnala-za-2013/401-tekhnika-i-oborudovanie-dlya-sela-dekabr-12-198-2013-g> (дата обращения: 08.02.2021). – Рез. англ.

2. Арженовский, А. Г. Метод получения тяговой характеристики трактора в эксплуатационных условиях / А. Г. Арженовский, Д. С. Козлов, Н. А. Петрищев. – DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-5-25-30 // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2018. – № 5. – С. 25–30. – URL: <https://www.vimsmi.com/jour/article/view/287> (дата обращения: 08.02.2021). – Рез. англ.

3. Джаббаров, Н. И. Оценка тягово-динамических показателей почвообрабатывающих агрегатов / Н. И. Джаббаров, Д. А. Максимов, Г. А. Семенова // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2017. – № 93. – С. 53–64. – URL: <https://e.lanbook.com/reader/journalArticle/401479/#1> (дата обращения: 08.02.2021). – Рез. англ.

4. Уникальная система / В. Ф. Федоренко, Н. В. Трубицын, В. Е. Таркивский, М. В. Сазонов // Информационный бюллетень. – 2017. – № 8. – С. 45–47. – URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/byulleten/arkhiv-vypuskov/download/35-arkhiv-vypuskov-za-2017-god/317-avgust> (дата обращения: 08.02.2021).

5. Метод повышения точности измерения тягового сопротивления в навесном устройстве трактора / Р. А. Косульников, А. А. Карсаков, С. Д. Фомин, Е. А. Назаров // Известия нижегородского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2018. – № 1 (49). – С. 326–333. – URL: [http://www.volgau.com/Portals/0/izv\\_auk/izv\\_auk\\_full/izvestiya\\_2018\\_49\\_1.pdf?ver=2018-03-26-143653-023](http://www.volgau.com/Portals/0/izv_auk/izv_auk_full/izvestiya_2018_49_1.pdf?ver=2018-03-26-143653-023) (дата обращения: 08.02.2021). – Рез. англ.

6. Шилин, Д. В. Повышение точности взвешивания сыпучих материалов на поточном расходомере-дозаторе с двумя тензометрическими датчиками / Д. В. Шилин, Д. А. Шестов, П. Е. Ганин. – DOI 10.24160/1993-6982-2019-3-116-123 // Вестник Московского энергетического института. – 2019. – № 3. – С. 116–123. – URL: <http://vestnik.mpei.ru/index.php/vestnik/article/view/446> (дата обращения: 08.02.2021). – Рез. англ.

7. Пахоменков, Ю. М. Преобразователь сигналов мостовых тензометрических датчиков / Ю. М. Пахоменков // Системы управления и обработки информации. – 2017. – № 1. – С. 80–93. –

URL: <https://www.avrorasystems.com/upload/iblock/ef2/ef288dc4bda27d1b9dd828ef1786c97e.pdf> (дата обращения: 08.02.2021). – Рез. англ.

8. **Зеленцов, Ю. А.** Исследование влияния схем термокомпенсации дрейфа начального разбаланса мостовых схем на выходной сигнал тензометрического датчика / Ю. А. Зеленцов, В. Ю. Зеленцов // Метрология. – 2007. – № 4. – С. 39–47. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15245956> (дата обращения: 08.02.2021).

9. **Костюченко, В. И.** Удельное тяговое усилие колесного трактора, оптимальное по тяговому КПД / В. И. Костюченко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2011. – № 31. – С. 49–53. – URL: [https://www.susu.ru/sites/default/files/v\\_31\\_248\\_2011.pdf](https://www.susu.ru/sites/default/files/v_31_248_2011.pdf) (дата обращения: 08.02.2021).

10. **Лашова, С. С.** Вывод зависимости относительного удлинения, возникающего в тензометрическом датчике от его геометрических параметров / С. С. Лашова, В. И. Клевеко // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2017. – Т. 2. – С. 115–120. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35090189> (дата обращения: 08.02.2021). – Рез. англ.

11. **Мельник, В. И.** Согласование тяговых возможностей трактора и рабочего сопротивления почвообрабатывающих машин / В. И. Мельник, С. А. Чигрина // Инженерія природокористування. – 2016. – № 2 (6). – С. 113–118. – URL: <http://enm.khntusg.com.ua/index.php/enm/article/view/178/144> (дата обращения: 08.02.2021). – Рез. англ.

12. **Арженовский, А. Г.** Совершенствование методов и средств определения тягово-динамических и топливно-экономических показателей трактора в эксплуатационных условиях / А. Г. Арженовский // Тракторы и сельхозмашины. – 2017. – № 11. – С. 29–35. – URL: [https://old.mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory\\_i\\_selhozmashiny\\_No11\\_2017\\_dlya\\_sajta.pdf](https://old.mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory_i_selhozmashiny_No11_2017_dlya_sajta.pdf) (дата обращения: 08.02.2021). – Рез. англ.

13. Анализ функции преобразования датчика линейной плотности волокнистой ленты тензометрического типа / В. А. Авроров, В. В. Волков, В. С. Николаев, М. В. Горюнова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2009. – № 2. – С. 83–86. – URL: [https://ttp.ivgpu.com/?page\\_id=2526](https://ttp.ivgpu.com/?page_id=2526) (дата обращения: 08.02.2021).

14. **Куликова, М. В.** Численные методы нелинейной фильтрации для обработки сигналов и измерений / М. В. Куликова, Г. Ю. Куликов // Вычислительные технологии. – 2016. – Т. 21, № 4. – С. 64–98. – URL: <http://www.ict.nsc.ru/jct/getfile.php?id=1744> (дата обращения: 08.02.2021). – Рез. англ.

15. Теоретические предпосылки создания математической модели тягового КПД трактора / К. А. Хафизов, Р. Н. Хафизов, А. А. Нурмиев, И. Г. Галиев. – DOI [10.12737/article\\_5db9748fc053c2.28431294](https://doi.org/10.12737/article_5db9748fc053c2.28431294) // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2019. – Т. 14, № 3 (54). – С. 116–121. – URL: <https://naukaru.ru/en/nauka/article/33457/view> (дата обращения: 08.02.2021). – Рез. англ.

16. Transducers for Measurement of Draft and Torque of Tractor-implement System / C. R. Chethan, V. K. Tewari, B. Nare, S. P. Kumar // Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. – 2018. – Vol. 49, No. 4. – Pp. 81–87. – URL: <https://clck.ru/TCgBe> (дата обращения: 08.02.2021).

17. **Rovira-Más, F.** Sensor Architecture and Task Classification for Agricultural Vehicles and Environments / F. Rovira-Más. – DOI [10.3390/s101211226](https://doi.org/10.3390/s101211226) // Sensors. – 2010. – Vol. 10, Issue 12. – Pp. 11226–11247. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/10/12/11226> (дата обращения: 08.02.2021).

18. **Marcovich, L. A.** Inferences from Optimal Filtering Equation / L. A. Marcovich. – DOI [10.1007/s10986-015-9289-5](https://doi.org/10.1007/s10986-015-9289-5) // Lithuanian Mathematical Journal. – 2015. – № 7. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10986-015-9289-5> (дата обращения: 08.02.2021).

19. **Kulikova, M. V.** Constructing Numerically Stable Kalman Filter-Based Algorithms for Gradient-Based Adaptive Filtering / M. V. Kulikova, J. V. Tsyganova. – DOI [10.1002/acs.2552](https://doi.org/10.1002/acs.2552) // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. – 2015. – Vol. 29, Issue 11. – Pp. 1411–1426. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/acs.2552> (дата обращения: 08.02.2021).

20. **Таркивский, В. Е.** Цифровая обработка данных при тензометрировании сельскохозяйственной техники / В. Е. Таркивский, Н. В. Трубицын // Техника и оборудование для села. – 2016. – № 1. – С. 28–30. – URL: <https://clck.ru/TPwuP> (дата обращения: 08.02.2021). – Рез. англ.

21. **Федоренко, В. Ф.** Метод цифровой фильтрации при определении тягового усилия сельскохозяйственных тракторов / В. Ф. Федоренко, В. Е. Таркивский // *Техника и оборудование для села*. – 2019. – № 1. – С. 8–10. – URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/content/mera-259-2> (дата обращения: 08.02.2021). – Рез. англ.

22. **Таркивский, В. Е.** Программное обеспечение измерительных информационных систем для испытаний сельскохозяйственной техники / В. Е. Таркивский, Н. В. Трубицын, Е. С. Воронин. – DOI 10.33267/2072-9642-2019-9-12-15 // *Техника и оборудование для села*. – 2019. – № 1. – С. 12–15. – URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/content/mera-267-2> (дата обращения: 08.02.2021). – Рез. англ.

*Поступила 17.08.2020; одобрена после рецензирования 20.10.2020; принята к публикации 27.10.2020*

*Об авторах:*

**Федоренко Вячеслав Филиппович**, научный руководитель ФГБНУ «Росинформагротех» (141261, Российская Федерация, р. п. Правдинский, ул. Лесная, д. 60), академик РАН, доктор технических наук, профессор, Researcher ID: A-9022-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6398-4463>, fedorenko@rosinformagrotech.ru

**Таркивский Виталий Евгеньевич**, заведующий лабораторией разработки средств измерений и программного обеспечения Новокубанского филиала ФГБНУ «Росинформагротех» (352243, Российская Федерация, г. Новокубанск, ул. Красная, д. 15), доктор технических наук, Researcher ID: W-4417-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8488-0011>, tarkivskiy@yandex.ru

**Мишуrow Николай Петрович**, заместитель директора по научной работе ФГБНУ «Росинформагротех» (141261, Российская Федерация, р. п. Правдинский, ул. Лесная, д. 60), кандидат технических наук, Researcher ID: A-8970-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1058-6952>, mishurov@rosinformagrotech.ru

**Трубицын Николай Владимирович**, ведущий научный сотрудник Новокубанского филиала ФГБНУ «Росинформагротех» (352243, Российская Федерация, г. Новокубанск, ул. Красная, д. 15), кандидат технических наук, Researcher ID: W-4426-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7451-9831>, trubicin@yandex.ru

*Заявленный вклад соавторов:*

В. Ф. Федоренко – научное руководство, формулирование основной концепции исследования.

В. Е. Таркивский – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, проведение экспериментальных исследований, критический анализ полученных результатов, подготовка начального варианта текста и формирование выводов.

Н. П. Мишуrow – формулирование основной концепции исследования, доработка текста.

Н. В. Трубицын – литературный и патентный анализ, проведение экспериментальных исследований, редактирование текста.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Trubitsin N.V., Tarkivsky V.E. Modern Microprocessor Systems for Testing Facilities Development. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2013; (12):31-32. Available at: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/download/60-arkhiv-zhurnala-za-2013/401-tekhnika-i-oborudovanie-dlya-sela-dekabr-12-198-2013-g> (accessed 08.02.2021). (In Russ.)

2. Arzhenovskiy A.G., Kozlov D.S., Petrishchev N.A. Determining the Traction Characteristic of a Tractor in Operating Conditions. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2018; (5):25-30. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-5-25-30>



3. Dzhabborov N.I., Maksimov D.A., Semenova G.A. Assessment of Traction and Dynamic Indicators of Soil Tilling Units. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktii rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies and Technical Means of Mechanized Production of Crop and Livestock Products. 2017; (93):53-64. Available at: <https://e.lanbook.com/reader/journalArticle/401479/#1> (accessed 08.02.2021). (In Russ.)
4. Fedorenko V.F., Trubitsyn N.V., Tarkivskiy V.Ye., et al. [Unique system]. *Informatsionnyy byulleten* = Newsletter. 2017; (8):45-47. Available at: <https://rosinformagrotech.ru/data/byulleten/arkhiv-vypuskov/download/35-arkhiv-vypuskov-za-2017-god/317-avgust> (accessed 08.02.2021). (In Russ.)
5. Kosulnikov R.A., Karsakov A.A., Fomin S.D., et al. Method of Increasing the Accuracy of Measurement of the Drive Resistance in the Outboard Accessories of the Tractor. *Izvestiya nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie* = Proceedings of Nizhnevolzhskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education. 2018; (1):326-333. Available at: [http://www.volgau.com/Portals/0/izv\\_auk/izv\\_auk\\_full/izvestiya\\_2018\\_49\\_1.pdf?ver=2018-03-26-143653-023](http://www.volgau.com/Portals/0/izv_auk/izv_auk_full/izvestiya_2018_49_1.pdf?ver=2018-03-26-143653-023) (accessed 08.02.2021). (In Russ.)
6. Shilin D.V., Shestov D.A., Ganin P.E. Improving the Accuracy of Weighing Bulk Materials in a Dispenser On-Stream Flow Meter with Two Strain Gauges. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta* = Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute. 2019; (3):116-123. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2019-3-116-123>
7. Pahomenkov Y.M. Converter Signals of the Bridge Strain Gauges. *Sistemy upravleniya i obrabotki informatsii* = Control and Information Processing Systems. 2017; (1):80-93. Available at: <https://www.avrorasystems.com/upload/iblock/ef2/ef288dc4bda27d1b9dd828ef1786c97e.pdf> (accessed 08.02.2021). (In Russ.)
8. Zelentsov Yu.A., Zelentsov V.Yu. [Investigation of the Effect of Thermal Compensation Schemes for Initial Unbalance Drift of Bridge Circuits on the Output Signal of a Strain Gauge]. *Metrologiya* = Metrology. 2007; (4):39-47. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15245956> (accessed 08.02.2021). (In Russ.)
9. Kostyuchenko V.I. [Specific Traction Force of the Wheeled Tractor, Optimal in Terms of Traction Efficiency]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta* = South Ural State University Bulletin. 2011; (31):49-53. Available at: [https://www.susu.ru/sites/default/files/v\\_31\\_248\\_2011.pdf](https://www.susu.ru/sites/default/files/v_31_248_2011.pdf) (accessed 08.02.2021). (In Russ.)
10. Lashova S.S., Kleveko V.I. Derivation of the Dependence of the Relative Elongation Arising in the Strain Gauge Sensor on Its Geometric Parameters. *Sovremennye tekhnologii v stroitelstve. Teoriya i praktika* = Modern Technologies in Construction. Theory and Practice. 2017; 2:115-120. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35090189> (accessed 08.02.2021). (In Russ.)
11. Melnik V.I., Chygryna S.A. Matching Tractor Traction Capabilities and Working Resistance Tillers. *Inzheneriya prirodokoristuvannya* = Engineering of Nature Management. 2016; (2):113-118. Available at: <http://enm.khntusg.com.ua/index.php/enm/article/view/178/144> (accessed 08.02.2021). (In Russ.)
12. Arzhenovskiy A.G. Development of Methods and Means for Determining Traction-Dynamic and Fuel-Economic Parameters of the Tractor under Operating Conditions. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2017; (11):29-35. Available at: [https://old.mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory\\_i\\_selkhoz mashiny\\_No11\\_2017\\_dlya\\_sajta.pdf](https://old.mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory_i_selkhoz mashiny_No11_2017_dlya_sajta.pdf) (accessed 08.02.2021). (In Russ.)
13. Avrorov V.A., Volkov V.V., Nikolaev V.S., et al. [Analysis of the Conversion Function of a Strain Gauge Type Fiber Tape Linear Density Sensor]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstilnoy promyshlennosti* = Proceedings of Higher Educational Institutions. Technology of Textile Industry. 2009; (2):83-86. Available at: [https://tftp.ivgpu.com/?page\\_id=2526](https://tftp.ivgpu.com/?page_id=2526) (accessed 08.02.2021). (In Russ.)
14. Kulikova M.V., Kulikov G.Yu. Numerical Methods for Nonlinear Filtering of Signals and Measurements. *Vychislitelnye tekhnologii* = Computational Technologies. 2016; 21(4):64-98. Available at: <http://www.ict.nsc.ru/jct/getfile.php?id=1744> (accessed 08.02.2021). (In Russ.)
15. Khafizov K.A., Khafizov R.N., Nurmiev A.A., et al. Theoretical Background of Creating a Mathematical Model of Tractor Traction Efficiency. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2019; 14(3):116-121. (In Russ.) DOI: [https://doi.org/10.12737/article\\_5db9748fc053c2.28431294](https://doi.org/10.12737/article_5db9748fc053c2.28431294)



16. Chethan C.R., Tewari V.K., Nare B., et al. Transducers for Measurement of Draft and Torque of Tractor-implement System. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2018; 49(4):81-87. Available at: <https://clck.ru/TCgBc> (accessed 08.02.2021). (In Russ.)
17. Rovira-Más F. Sensor Architecture and Task Classification for Agricultural Vehicles and Environments. *Sensors*. 2010; 10(12):11226-11247. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/s101211226>
18. Marcovich L.A. Inferences from Optimal Filtering Equation. *Lithuanian Mathematical Journal*. 2015; (7). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s10986-015-9289-5>
19. Kulikova M.V., Tsyganova J.V. Constructing Numerically Stable Kalman Filter-Based Algorithms for Gradient-Based Adaptive Filtering. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. 2015; 29(11):1411-1426. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1002/acs.2552>
20. Tarkivsky V.E., Trubitsyn N.V. Digital Data Processing of Agricultural Machinery during Strain Measurement. *Technika v selskom hozyaystve = Machinery in Agriculture*. 2016; (1):28-30. Available at: <https://clck.ru/TPwuP> (accessed 08.02.2021). (In Russ.)
21. Fedorenko V.F., Tarkivsky V.E. Digital Filtration Method for Determining Traction Power of Agricultural Tractors. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela = Machinery and Equipment for Rural Area*. 2019; (1):8-10. Available at: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/content/mera-259-2> (accessed 08.02.2021). (In Russ.)
22. Tarkivsky V.E., Trubitsyn N.V., Voronin E.S. Software for Measurement Information Systems for Agricultural Machinery Testing. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela = Machinery and Equipment for Rural Area*. 2019; (1):12-15. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-9-12-15>

*Submitted 17.08.2020; approved after reviewing 20.10.2020; accepted for publication 27.10.2020*

*About the authors:*

**Vyacheslav F. Fedorenko**, Scientific Director of Rosinformagrotech (60 Lesnaya St., Pravdinskiy 141261, Russian Federation), Academician of RAS, D.Sc. (Engineering), Professor, Researcher ID: A-9022-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6398-4463>, [fedorenko@rosinformagrotech.ru](mailto:fedorenko@rosinformagrotech.ru)

**Vitaly E. Tarkivskiy**, Head of the Laboratory for Development of Measuring Instruments and Software, Novokubansk Branch of Rosinformagrotech (15 Krasnaya St., Novokubansk 352243, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: W-4417-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8488-0011>, [tarkivskiy@yandex.ru](mailto:tarkivskiy@yandex.ru)

**Nikolay P. Mishurov**, Deputy Director for Scientific Work, Rosinformagrotech (60 Lesnaya St., Pravdinskiy 141261, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), Researcher ID: A-8970-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1058-6952>, [mishurov@rosinformagrotech.ru](mailto:mishurov@rosinformagrotech.ru)

**Nikolay V. Trubitsyn**, Leading Researcher, Novokubansk Branch of Rosinformagrotech (15 Krasnaya St., Novokubansk 352243, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), Researcher ID: W-4426-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7451-9831>, [trubicin@yandex.ru](mailto:trubicin@yandex.ru)

*Contribution of the authors:*

V. F. Fedorenko – scientific guidance, formulation of the basic research concept.

V. E. Tarkivskiy – scientific guidance, formulation of the basic concept of research, experimental research, critical analysis of the results, preparation of the initial version of the text and the formation of conclusions.

N. P. Mishurov – formulation of the main concept of research, finalization of the text.

N. V. Trubitsyn – literary and patent analysis, experimental research, text editing.

*All authors have read and approved the final manuscript.*