

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ
СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья

УДК 629.11.013.42:62-9

DOI: 10.53914/issn2071-2243_2022_1_63

**Анализ действительной криволинейной
траектории движения колесной машины**

**Александр Николаевич Беляев^{1✉}, Владимир Павлович Шацкий²,
Татьяна Владимировна Тришина³, Ирина Алевтиновна Высоцкая⁴**

^{1, 2, 3}Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, Воронеж, Россия

⁴Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации, Воронеж, Россия

¹aifkm_belyaev@mail.ru✉

Аннотация. Для исследования криволинейного движения колесной машины по деформируемому основанию, в том числе для описания траекторий, очерчиваемых ее характерными точками, применяют, несмотря на множественные допущения и упрощения, очень сложный математический аппарат, дающий приближенные, а иногда и не совсем объективные результаты. Поэтому с целью повышения точности и упрощения расчетов, более полного учета характеристик случайного процесса предлагается параметры траектории определять экспериментально с использованием соответствующей поверенной регистрирующей аппаратуры, отработанной методики расчета выходных характеристик в условиях, обеспечивающих стационарность входных и выходных случайных процессов, а также применить объективный способ обработки информации в виде непрерывной кривой или дискретных значений. Получены выходные параметры случайного процесса поворота колесного трактора на деформируемой почве, представленные углом поворота внутреннего по отношению к центру поворота колеса, курсовым углом остова трактора, и путем, пройденным серединой заднего моста, фиксированными в дискретные моменты времени в виде случайных последовательностей чисел, составляющих непрерывные множества. Аппроксимация экспериментальных данных результатов измерений траектории кривой поворота с использованием программных пакетов системы компьютерной алгебры Maple позволила получить таблично заданную функцию зависимостей координат траекторий движения в декартовой системе. Нелинейная аппроксимация данных таблично заданной функции кривой дала явный вид функции, описываемой аналитической формулой, позволяющей оценить кинематические и динамические характеристики поворота колесной машины в зависимости от конструктивных и эксплуатационных параметров, а также исследовать ее движение по заданной траектории.

Ключевые слова: колесная машина, криволинейная траектория, поворот, экспериментальные исследования, аппроксимация

Для цитирования: Беляев А.Н., Шацкий В.П., Тришина Т.В., Высоцкая И.А. Анализ действительной криволинейной траектории движения колесной машины // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2022. Т. 15, № 1(72). С. 63–70. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_1_63–70.

TECHNOLOGIES AND MECHANICAL MEANS
IN AGRICULTURE (ENGINEERING SCIENCES)

Original article

**Analysis of the actual curvilinear motion
trajectory of a wheeled vehicle**

Aleksandr N. Belyaev^{1✉}, Vladimir P. Shatsky², Tatiana V. Trishina³, Irina A. Vysotskaya⁴

^{1, 2, 3}Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

⁴Military Educational and Scientific Center of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defence of the Russian Federation, Voronezh, Russia

¹aifkm_belyaev@mail.ru✉

Abstract. To study the curvilinear motion of a wheeled vehicle on a deformable base, as well as to describe the trajectories outlined by its characteristic points, a very complex mathematical apparatus is used, despite multiple assumptions and simplifications, which gives approximate, and sometimes not entirely objective, results. Therefore, in order to improve the accuracy and simplify the calculations, to take more fully into account the

characteristics of the random process, it is proposed to obtain the trajectory parameters experimentally using the appropriate verified recording equipment, implementing the developed methodology for determining the output characteristics under conditions ensuring the stationarity of the input and output random processes, and using an objective method of processing information in the form of a continuous curve or discrete values. The output parameters of the random process of a wheeled tractor turning on deformable soil are obtained experimentally, represented by the angle of rotation of the inner wheel with respect to the center of rotation, the heading angle of the tractor frame, the path traversed by the middle of the rear axle, fixed at discrete moments in the form of random sequences of numbers that make up continuous sets. The approximation of experimental data of the results of measurements of the trajectory of the curve of turning using software packages of the Maple computer algebra system allowed us to obtain a tabular function of the dependencies of the coordinates of the motion trajectories in the Cartesian reference system. The nonlinear approximation of the data of a tabular curve function gave an explicit form of the function described by an analytical formula providing evaluation of the kinematic and dynamic characteristics of a wheeled vehicle turning depending on the design and operational parameters, as well as to study its motion along the given trajectory.

Keywords: wheeled vehicle, curvilinear trajectory, turning, experimental studies, approximation

For citation: Belyaev A.N., Shatsky V.P., Trishina T.V., Vysotskaya I.A. Analysis of the actual curvilinear motion trajectory of a wheeled vehicle. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2022;15(1):63-70. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_1_63-70.

Для анализа и проектирования сложных технических систем, наряду с теоретическими математическими моделями, достаточно широко применяются экспериментальные факторные математические модели [6, 14].

Экспериментальная факторная модель строится на основе результатов, полученных при проведении на реальном техническом объекте или на его копии-модели физических экспериментов, реализация которых, однако, является дорогостоящим и трудоемким процессом, требующим огромных временных и материальных затрат, и их выполнение обосновано лишь тогда, когда, ввиду сложности изучаемых систем и не типичных условий функционирования, получить необходимую точность их математического описания только теоретическими методами не представляется возможным [3, 7, 12, 13].

Так, например, не обеспечивается требуемая точность математического описания теоретическими методами криволинейного движения колесного трактора на деформируемом опорном основании [3]. Поэтому при функциональном проектировании сложных технических систем, каковыми и являются колесные машины, экспериментальные факторные математические модели нашли достаточно широкое применение наряду с теоретическими математическими моделями [6, 14, 17, 18].

Изучение криволинейного движения колесной машины по деформированному основанию не может быть полностью основано на теоретических аспектах, так как в основу аналитических исследований положено условие, что она совершает кинематически правильный поворот, при котором все колеса катятся без скольжения, а их мгновенные центры поворотов совпадают [7, 12, 13]. Однако даже при движении на малых скоростях все это не соответствует действительности, и уже имеются большие расхождения между расчетными и фактическими траекториями [3], а с увеличением скорости движения все большее влияние на кинематику поворота оказывают динамические факторы, и действительная траектория движения машины все больше отличается от теоретической, радиусы кривизны ее растут. Так, например, на поле, подготовленном под посев, были проведены эксперименты с колесным трактором класса 2 со всеми ведущими, одинакового размера, колесами при совершении кругового беспетлевого поворота передними управляемыми колесами [8, 11, 15].

Теоретический минимальный радиус поворота при движении на участке установившегося движения (с постоянной скоростью и постоянным углом поворота направляющих колес), согласно техническим характеристикам [8], должен быть $R_{min} = 5,061$ м. Действительные же радиусы кривизны установившегося поворота одиночного трактора были следующими:

- при скорости движения $V = 1,0$ м/с – $R_D = 5,26$ м (на 3,8% выше теоретического);

- при скорости движения $V = 1,67$ м/с – $R_D = 5,48$ м (на 7,6% выше теоретического) [3].

С повышением скорости движения действительный радиус увеличился на 0,22 м (на 4,0%). Для того же трактора в составе навесного комбинированного агрегата получено, что при скорости движения $V = 0,68$ м/с – $R_D = 5,29$ м (на 4,33% выше теоретического); при скорости движения $V = 1,37$ м/с – $R_D = 5,83$ м (на 13,2% выше теоретического). С повышением скорости движения действительный радиус увеличился на 0,54 м, или на 9,26%.

Как видно из приведенных примеров, расчетные траектории поворота отклоняются от действительных, особенно на более высоких скоростях движения и при наличии на навесных системах орудий, весьма существенно.

Основным фактором, влияющим на изменение радиуса кривизны траектории, является центробежная сила инерции, действующая на остов машины в боковом направлении и вызывающая в условиях мягких грунтов сминание и сдвиг почвы направляющими колесами (экскавационно-бульдозерный эффект). Таким образом, изучение кинематики поворота колесных машин на деформированном основании не может быть полностью основано на теоретических положениях, так как процессы, происходящие в контакте колеса машины с почвой, описать математически практически невозможно без существенных допущений и без определения расчетным и опытным путем множества эмпирических коэффициентов.

Обоснование методики и подход к проведению так называемого пассивного эксперимента при криволинейном движении колесного трактора в реальных условиях эксплуатации с варьированием различных факторов, изменением фазовых координат и выходных параметров под влиянием внешних возмущающих воздействий, носящих случайный характер, лежащего в основе метода статистических испытаний, результаты которого используются в настоящих исследованиях, достаточно подробно изложены в работе [3].

Для получения математических моделей многих реальных технических объектов обычно пассивный физический эксперимент проводится в нормальных условиях функционирования, которые характерны тем, что в большинстве случаев варьировать независимыми случайными фазовыми координатами и выходными факторами оказывается невозможно, их изменение обусловлено влиянием внешних возмущающих воздействий, носящих случайный характер, значениями параметров и ходом протекания процесса управлять нельзя [11].

На рисунке 1 представлены фрагменты осциллограмм [3] по итогам реализации пассивного эксперимента при круговом беспетлевом повороте колесного трактора на деформируемой почве, в ходе которого и фазовые координаты, и выходные параметры представляли собой случайные процессы, обусловленные воздействием микропрофиля опорной поверхности на колеса.

Экспериментально определяли значения следующих выходных параметров траектории поворота передними управляемыми колесами трактора класса 2 со всеми ведущими одинакового размера колесами [8, 13, 15]:

- α – угол поворота внутреннего по отношению к центру поворота колеса;
- β – курсовой угол остова трактора;
- l_c – путь, пройденный серединой заднего моста.

Эти значения фиксированы в дискретные моменты времени t в виде случайных последовательностей чисел, составляющих непрерывные множества при:

- поступательной скорости движения $V = 1,67$ м/с;
- угловой скорости поворота управляемых колес $\omega_1 = 0,28$ 1/с;
- колее $B = 1,8$ м;
- продольной базе $L = 2,6$ м [8] (табл. 1).

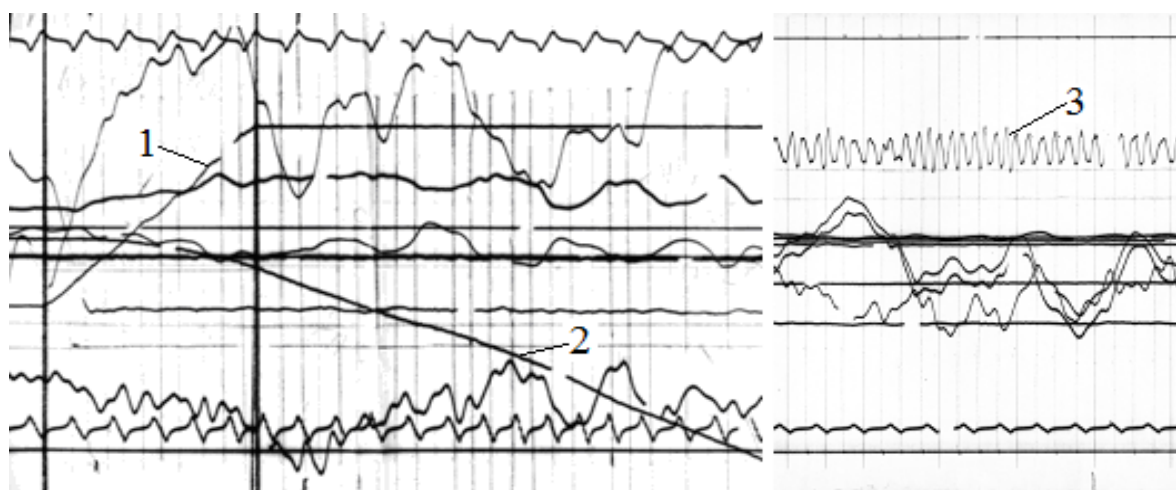


Рис. 1. Фрагмент осциллограмм записей параметров траектории поворота передними управляемыми колесами трактора класса 2: 1 – угол поворота переднего колеса; 2 – курсовой угол движения остова трактора; 3 – отметки чисел оборотов путеизмерительного колеса

Таблица 1. Экспериментальные параметры траектории поворота передними управляемыми колесами трактора класса 2

α , град.	0	5	10	15	20	25	32	32	32
β , град.	0	0	0	2	4	6,5	9	11,5	18,5
l_c , м	0	0,602	1,2	1,731	2,113	2,552	2,791	3,230	3,939
α , град.	32	32	32	32	32	32	32	32	32
β , град.	25,5	33	42	49	60	69	78	85	90
l_c , м	4,658	5,579	6,346	7,041	7,879	8,77	9,569	10,246	10,975

Хотя методика экспериментальных исследований по получению криволинейной траектории предусматривала выполнение полного цикла кругового беспетлевого поворота, принимались во внимание результаты до поворота остова на 90° от первоначальной прямолинейной траектории движения перед началом маневра; для оставшейся «правой» части участка установившегося поворота и участка выхода из поворота считали траекторию абсолютно «зеркальной» траектории, полученной для «левой» части установившегося поворота и входа в поворот, что вполне приемлемо, так как на установившемся этапе поворота траектория представляет кривую с постоянным радиусом R_d , а при выходе из поворота более динамически нагруженное состояние сменяется менее нагруженным.

В качестве объекта исследования при проведении вычислительных экспериментов выступает теоретическая математическая модель, являющаяся основой для построения экспериментальной факторной модели, для получения которой, в первую очередь, необходимо определить ее структуру и численные значения параметров.

Исходя из этого аппроксимация экспериментальных данных результатов измерений с использованием программных пакетов комплекса системы компьютерной алгебры Maple [6], дала таблично заданную функцию координат кривой траектории движения при повороте в декартовой системе (x_i, y_i) , где $i = 1, \dots, N$, N – количество точек измерения.

Для получения достоверной информации о физических свойствах объекта, необходимой при построении математической модели, выбран некоторый интервал дискретизации независимой переменной $i = 1, \dots, 18$.

Представленные в таблице 2 зависимости координат траекторий движения (x_i, y_i) были получены для экспериментальных данных таблицы 1.

Таблица 2. Координаты «левой» ветви экспериментальной траектории поворота

$x_i, \text{ м}$	0	0	0	0,0185	0,045	0,0948	0,132	0,22	0,445
$y_i, \text{ м}$	0	0,6	1,2	1,729	2,1088	2,546	2,783	3,214	3,889
$x_i, \text{ м}$	0,755	1,256	1,785	2,2907	3,0181	3,849	4,632	5,3089	6,0289
$y_i, \text{ м}$	4,537	5,3089	5,896	6,336	6,756	7,0745	7,2408	7,3	7,3

Абсциссы «правой» ветви кривой траектории кругового беспетлевого поворота определялись по формуле

$$x_i' = x_{max} - x_i, \quad (1)$$

где x_{max} – максимальная абсцисса поворота, м;

x_i – текущие абсциссы «левой» ветви кривой траектории поворота, м.

Соответствующие абсциссам x_i' ординаты $y_i' = y_i$ (табл. 3).

Таблица 3. Координаты «правой» ветви экспериментальной траектории поворота

$x_i', \text{ м}$	6,0289	6,749	7,336	8,2088	9,0397	9,767	10,273	10,8018	11,3028
$y_i', \text{ м}$	7,3	7,3	7,2408	7,0745	6,756	6,336	5,896	5,3089	4,537
$x_i', \text{ м}$	11,613	11,838	11,926	11,963	12,0128	12,0393	12,0578	12,0578	12,0578
$y_i', \text{ м}$	3,889	3,214	2,783	2,546	2,1088	1,73	1,2	0,6	0

График по результатам экспериментальных точек таблиц 2 и 3 представлен на рисунке 2, кривая 1.

Вероятностная математическая модель объекта получается в результате оценки вероятностных характеристик всех исследуемых случайных процессов посредством полученных выборок значений факторов и выходных параметров [16].

Так как на начальном участке поворота касательная к графику траектории кривой поворота вертикальна при $x = 0$, то при малых значениях x она описывается аппроксимирующей аналитической функцией [5, 10]

$$y(x) = px^q, \quad (2)$$

где p и q – вполне определенные постоянные, $0 < q < 1$.

Полная аппроксимирующая функция поворота, ввиду того что при увеличении x она достигает максимума и начинает убывать, была предложена в следующем виде:

$$y(x) = px^q - m_1x^n + m_2x, \quad (3)$$

где n, m_1, m_2 – вполне определенные постоянные, при этом $n > 1, m_1 < 0, m_2 > 0$.

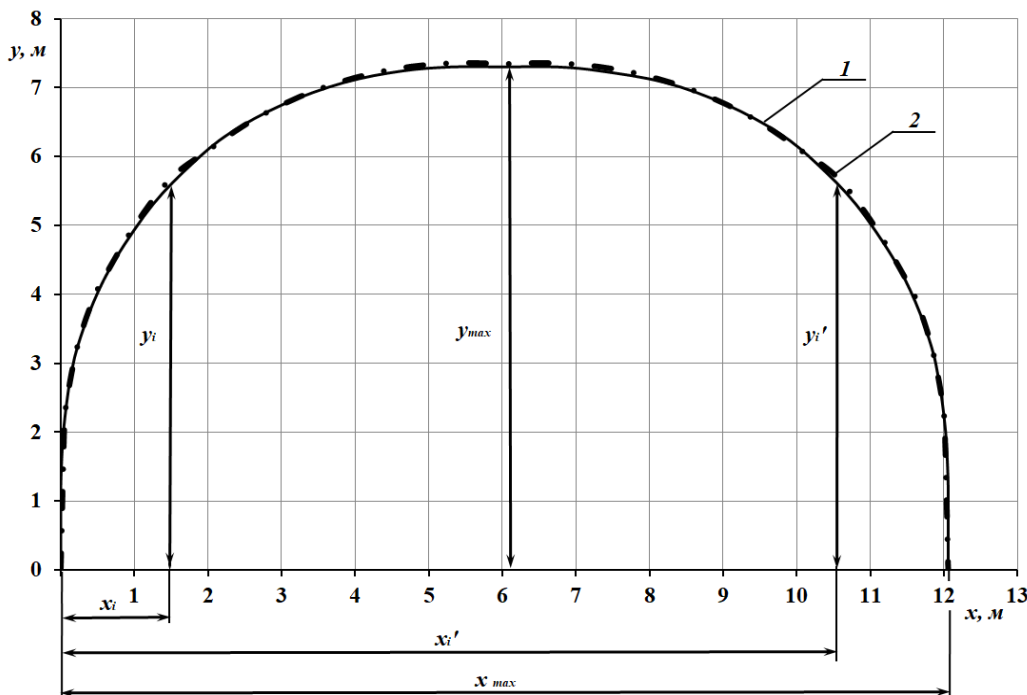


Рис. 2. Экспериментальные кривые траектории поворота:
1 – таблично заданная функция; 2 – аппроксимирующая функция

Для указанного выше массива экспериментальных точек была получена следующая функция [5, 9, 10]:

$$y(x) = 4,75 x^{0,27} - 0,06 x^2 + 0,3x,$$

график которой представлен на рисунке 2, кривая 2. Максимальная погрешность аппроксимации составляет $2 \cdot 10^{-3}$ м.

В результате проведенных исследований получена экспериментальная факторная математическая модель в виде аналитической зависимости, определяющей действительную траекторию движения колесной машины по деформированному основанию.

Основные ее преимущества:

- модель является статической;
- представляет собой сравнительно простую функциональную зависимость;
- дает адекватное описание установленных зависимостей в области факторного пространства, в котором организован эксперимент.

Полученная аналитическая действительная траектория позволяет оценивать кинематические и динамические характеристики колесной машины при исследовании ее движения по известной траектории [1, 2, 4, 19, 20] при криволинейном движении в зависимости от таких конструктивных и эксплуатационных параметров, как:

- скорость движения;
- продольная база;
- ширина колеи;
- углы поворотов колес.

Список источников

1. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. Москва: Наука, 1988. 640 с.
2. Беляев А.Н. Определение сил при повороте трактора // Техника в сельском хозяйстве. 2012. № 4. С. 22–23.
3. Беляев А.Н. Повышение эффективности работы машинно-тракторных агрегатов на базе интегральных универсально-пропашных колесных тракторов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01. Мичуринско-наукоград, 2019. 440 с.
4. Болотин С.В., Карапетян А.В., Кугушев Е.И., Трещев Д.В. Теоретическая механика: учебник для студентов учреждений высшего профессионального образования. Москва: Издательский центр «Академия», 2010. 432 с.
5. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. Москва: Наука, 1961. 871 с.
6. Гамаюнов П.П., Вихоев Н.К. Факторный анализ одноцелевого функционирования динамических систем // Концепт. 2015. № 35. С. 26–30.
7. Гуськов В.В., Велев Н.Н., Атаманов Ю.Е. и др. Тракторы: теория: учебник для вузов по специальности «Автомобили и тракторы». Москва: Машиностроение, 1988. 374 с.
8. Дурманов А.С., Коцарь Ю.А., Головащенко Г.А., Плужников С.В. Тракторы РТМ-160 и РТМ-160У. Конструкция, эксплуатация и техническое обслуживание. Саратов: Научная книга, 2006. 155 с.
9. Дьяконов В.П. Maple 10/11/12/13/14 в математических расчетах. Москва: ДМК-Пресс, 2011. 800 с.
10. Дьяконов В.П. Энциклопедия компьютерной алгебры. Москва: ДМК-Пресс, 2009. 1264 с.
11. Виноградов К.Н., Дурманов А.С., Киселев Н.И. и др. Обоснование параметров и конструкции универсально-пропашного трактора повышенной эффективности. Воронеж: Изд-во Воронежского гос. ун-та, 1978. 164 с.
12. Скотников В.А., Мащенский А.А., Солонский А.С. Основы теории и расчет трактора и автомобиля; под. ред. В.А. Скотникова. Москва: Агропромиздат, 1986. 383 с.
13. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин. 2-е изд., доп. и перераб. Москва: Машиностроение, 1990. 352 с.
14. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем. Минск: Дизайн ПРО, 1997. 640 с.
15. Федоренко В.Ф., Гольяпин В.Я., Мишулов Н.П. Тенденции машинно-технологической модернизации сельского хозяйства за рубежом (по материалам международной выставки «Agritechnica-2015»). Москва: Росинформагротех, 2016. 217 с.
16. Эвиев В.А., Очиров Н.Г., Муджиков Б.В. Влияние стохастического характера внешней нагрузки на производительность МТА // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 1. С. 11–12.
17. Belyaev A.N., Kozlov V.G., Vysotskaya I.A., Trishina T.V. Computation of Vehicle Motion Path upon Entering Turn // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). 2019. Vol. 9, no. 1. Pp. 4527–4531.
18. Belyaev A.N., Shatsky V.P., Trishina T.V., Vysotskaya I.A. Determining the theoretical trajectory of the centre of tractor's mass when turning in a combined way // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production. Bristol. 2021. No. 012073.
19. Field R.V., Hurtago E.J. Modeling of dynamic forces of a tractor in the MATLAB-Simulink program environment. New York: Society of Automotive Engineers, 2003. 112 p.
20. Klee H., Allen R. Simulation of Dynamic Systems with MATLAB and Simulink. Taylor & Francis Group, LLC, 2018. 853 p.

References

1. Artobolevsky I.I. Teoriya mekhanizmov i mashin [Theory of mechanisms and machines]. Moscow: Nauka Press; 1988. 640 p. (In Russ.).
2. Belyaev A.N. Opredelenie sil pri povorote traktora [Determination of forces when turning a tractor]. *Tekhnika v sel'skom khozyajstve = Technique in Agriculture*. 2012;(4):22-23. (In Russ.).
3. Belyaev A.N. Povyshenie effektivnosti raboty mashinno-traktornykh agregatov na baze integral'nykh universal'no-propashnykh kolesnykh traktorov [Improving the efficiency of machine-tractor units based on integral universal row-crop wheeled tractors]: dissertatsiya ... doctora tekhnicheskikh nauk = Doctoral Dissertation in Engineering Sciences: 05.20.01. Michurinsk-naukograd; 2019. 440 p. (In Russ.).
4. Bolotin S.V., Karapetyan A.V., Kugushev E.I., Treshchev D.V. Teoreticheskaya mekhanika: uchebnyk dlya studentov uchrezhdenij vysshego professional'nogo obrazovaniya [Theoretical mechanics: textbook for students of institutions of higher professional education]. Moscow: Akademiya Press; 2010. 432 p. (In Russ.).
5. Vygodskiy M.Ya. Spravochnik po vysshej matematike [Handbook of Higher Mathematics]. Moscow: Nauka Press; 1961. 871 p. (In Russ.).
6. Gamayunov P.P., Vikhorev N.K. Faktornyj analiz odnotselevogo funktsionirovaniya dinamicheskikh system [Factorial analysis of single-purpose functioning of dynamic systems]. *Koncept = The Koncept Journal*. 2015;35:26-30. (In Russ.).

7. Gus'kov V.V., Velev N.N., Atamanov Yu.E., et al. Traktory. Teoriya: uchebnik dlya vuzov po special'nosti "Avtomobili i traktory" [Tractors. Theory: textbook for universities in the specialty "Cars and tractors"]. Moscow: Mashinostroenie Press; 1988. 374 p. (In Russ.).
8. Durmanov A.S., Kotsar' Yu.A., Golovashchenko G.A., Pluzhnikov S.V. Traktory RTM-160 i RTM-160U. Konstruktsiya, ekspluatatsiya i tekhnicheskoe obsluzhivanie [RTM-160 and RTM-160U tractors. Design, operation and maintenance]. Saratov: Nauchnaya Kniga Press; 2006. 155 p. (In Russ.).
9. Diakonov V.P. Maple 10/11/12/13/14 v matematicheskikh raschetakh [Maple 10/11/12/13/14 in mathematical calculations]. Moscow: DMK-Press; 2011. 800 p. (In Russ.).
10. Diakonov V.P. Entsiklopediya komp'yuternoj algebrы [Encyclopedia of computer algebra]. Moscow: DMK-Press; 2009. 1264 p. (In Russ.).
11. Vinogradov K.N., Durmanov A.S., Kiselev N.I., et al. Obosnovanie parametrov i konstruktsii universal'no-propashnogo traktora povyshennoj effektivnosti [Substantiation of the parameters and design of a universal-row tractor of increased efficiency]. Voronezh: Voronezh State University Press; 1978. 164 p. (In Russ.).
12. Skotnikov V.A., Mashchensky A.A., Solonsky A.S. Osnovy teorii i rascheta traktora i avtomobilya [Foundations of the theory and calculation of a tractor and a car]. Moscow: Agropromizdat Press; 1986. 383 p. (In Russ.).
13. Smirnov G.A. Teoriya dvizheniya kolesnykh mashin. 2-e izdanie, dop. i pererab. [Theory of motion of wheeled vehicles. 2nd edition, revised and enlarged]. Moscow: Mashinostroenie Press; 1990. 352 p. (In Russ.).
14. Tarasik V.P. Matematicheskoe modelirovanie tekhnicheskikh sistem [Mathematical modeling of engineering systems]. Minsk: Dizajn PRO Press; 1997. 640 p. (In Russ.).
15. Fedorenko V.F., Gol'tyapin V.Ya., Mishurov N.P. Tendentsii mashinno-tekhnologicheskoy modernizatsii sel'skogo khozyajstva za rubezhom (po materialam mezhdunarodnoj vystavki "Agritechnica-2015") [Trends in machine-technological modernization of agriculture abroad on the basis of results of the International exhibition "Agritechnica-2015"]. Moscow: Rosinformagrotekh Press; 2016. 217 p. (In Russ.).
16. Eviyev V.A., Ochirov N.G., Mudzhikov B.V. Vliyaniye stokhasticheskogo kharaktera vneshnej nagruzki na proizvoditel'nost' MTA [Influence of stochastic external loading conditions on the performance of machine and tractor unit]. *Traktory i sel'khoz mashiny = Tractors and Agricultural Machinery*. 2014;1:11-12. (In Russ.).
17. Belyaev A.N., Kozlov V.G., Vysotskaya I.A., Trishina T.V. Computation of Vehicle Motion Path upon Entering Turn. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*. 2019;9(1):4527-4531.
18. Belyaev A.N., Shatsky V.P., Trishina T.V., Vysotskaya I.A. Determining the theoretical trajectory of the centre of tractor's mass when turning in a combined way. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production*. Bristol; 2021:012073.
19. Field R.V., Hurtago E.J. Modeling of dynamic forces of a tractor in the MATLAB-Simulink program environment. New York: Society of Automotive Engineers; 2003. 112 p.
20. Klee H., Allen R. Simulation of Dynamic Systems with MATLAB and Simulink. Taylor & Francis Group, LLC; 2018. 853 p.

Информация об авторах

А.Н. Беляев – доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой прикладной механики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», aifkm_belyaev@mail.ru.
В.П. Шацкий – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой математики и физики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», agroeng.vsau.ru.
Т.В. Тришина – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной механики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», tata344@rambler.ru.
И.А. Высоцкая – кандидат физико-математических наук, преподаватель кафедры математики ФГКВОО ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации, i.a.trishina@gmail.com.

Information about the authors

A.N. Belyaev, Doctor of Engineering Sciences, Docent, Head of the Dept. of Applied Mechanics, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, aifkm_belyaev@mail.ru.
V.P. Shatsky, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Dept. of Mathematics and Physics, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, agroeng.vsau.ru.
T.V. Trishina, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Applied Mechanics, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, tata344@rambler.ru.
I.A. Vysotskaya, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Lecturer, the Dept. of Mathematics, Military Educational and Scientific Center of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defence of the Russian Federation, i.a.trishina@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 12.12.2021; одобрена после рецензирования 28.01.2022; принята к публикации 08.02.2022.

The article was submitted 12.12.2021; approved after revision 28.01.2022; accepted for publication 08.02.2022.

© Беляев А.Н., Шацкий В.П., Тришина Т.В., Высоцкая И.А., 2022