

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6363

УДК 629.015/62-94

Статья

Анализ боковых реакций почвы на колёсах трактора при повороте

Беляев Александр Николаевич

*доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (Российская Федерация),
aifkm_belyaev@mail.ru*

Тришина Татьяна Владимировна

*кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (Российская Федерация),
t.v.trishina@gmail.com*

Афоничев Дмитрий Николаевич

*доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (Российская Федерация),
dmafonichev@yandex.ru*

Получена: 24 апреля 2023 / Принята: 12 сентября 2022 / Опубликовано: 16 сентября 2022

Аннотация: Задачей проведённых исследований явилось аналитическое определение боковых реакций на колёсах трактора со стороны опорной поверхности на участках «вход в поворот» и «установившийся поворот» кругового беспетлевого поворота. Объекты исследований: навесной комбинированный широкозахватный агрегат КРШ-8,1 + НП-5,4 + ЛТЗ-155 + ССТ-18 и кинематические способы поворота трактора (передние управляемые колёса; передние и задние управляемые колёса — поворот их относительно остова в разные стороны). Расчёт выполнен численной реализацией математической модели криволинейного движения машинно-тракторного агрегата в интерактивной среде программирования Matlab/Simulink. При расчётах принято, что переход от прямолинейного движения на траекторию большой кривизны совершается при одном и том же законе равномерного вращения рулевого колеса и, следовательно, при том же законе поворота управляемых колёс. Установлено

отрицательное влияние поворота задних колёс на управляемость и устойчивость движения машинно-тракторного агрегата: с одной стороны, при способе поворота четырьмя управляемыми колёсами мгновенный радиус поворота уменьшается, но интенсивность и величина отклонения его от заданной траектории движения увеличиваются. Боковая сила увеличивается также при повышении скорости движения за счёт роста центробежной силы инерции и момента сопротивления повороту вследствие более интенсивного динамического воздействия микропрофиля опорной поверхности. В простейшем случае, когда направляющими являются колёса только переднего моста, величина боковой реакции, приходящейся на его колёса, при входе в поворот со скоростью движения 0,68 м/с выше в 6,6—8,8 раза, чем на колёса задней оси, а со скоростью 1,37 м/с — в 2,0—2,3 раза. При всех управляемых колёсах получены следующие результаты: при скорости 0,68 м/с — 1,16—1,20 раза, при 1,37 м/с — 1,50—1,52 раза. Полученный характер изменения боковых реакций и перераспределения их по осям трактора обусловлен величинами и соотношениями касательных сил тяги, сил сопротивления качению и вертикальных сил на колёсах, условиями их качения, изменением положения центра тяжести машинно-тракторного агрегата, ускорений вертикальных колебаний и геометрических характеристик поворота. Более равномерное распределение боковых сил по мостам трактора при входе в поворот всеми управляемыми колёсами способствует лучшей управляемости и устойчивости агрегата, несмотря на то, что вертикальная нагрузка, приходящаяся на передний мост, в 1,56—1,63 раза выше, чем на задний, во всех вариантах расчёта. При этом создаются наиболее благоприятные условия качения колёс и реализации силы тяги. Таким образом, рациональным с точки зрения создания наиболее благоприятных условий для улучшения управляемости и повышения устойчивости движения при повороте является применение способа поворота передними и задними колёсами на всех этапах кругового беспетлевого поворота.

Ключевые слова: трактор, вход в поворот, установившийся поворот, сила инерции, боковая реакция

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6363

Article

Analysis of lateral reactions of soil on tractor wheels when turning

Alexander Belyaev

D. Sc. in engineering, associate professor, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great» (Russian Federation), aifkm_belyaev@mail.ru

Tatiana Trishina

Ph. D. in engineering, associate professor, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great» (Russian Federation), t.v.trishina@gmail.com

Dmitry Afonichev

D. Sc. in engineering, professor, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great» (Russian Federation), dmafonichev@yandex.ru

Received: 24 April 2023 / Accepted: / Published:

Abstract: The objective of the research was to determine lateral reactions on tractor wheels from the side of the support surface in the "entrance to the turn" and "steady turn" sections of the circular loop-free turn. The objects of research included a mounted combined broad-cut unit KRSН-8,1+NP-5,4+LTZ-155+SST-18 and kinematic ways of turning the tractor (front steerable wheels; front and rear steerable wheels when turning relative to the frame in different directions). The calculation was performed by using a mathematical model of the curvilinear motion of a machine-tractor unit in an interactive programming environment Matlab/Simulink. It was assumed that the transition from rectilinear motion to a trajectory of great curvature followed the same law of uniform rotation of the steering wheel and, consequently, the same law of rotation of the steering wheels. The authors have established the negative effect of turning the rear wheels on the controllability and stability of the movement of the machine-tractor unit. When turning four controlled wheels, the instantaneous turning radius decreases, but the intensity and magnitude of its deviation from the specified trajectory of movement increase. The lateral force also increases with an increase in the speed of movement due to an increase in the centrifugal force of inertia and the moment of resistance to rotation due to a more intense dynamic effect of the micro profile of the support surface. In the

simplest case, when the wheels of the front axle are the guides, the magnitude of the lateral reaction occurring on its wheels when entering a turn at a speed of 0.68 m / s is 6.6...8.8 times higher than on the wheels of the rear axle, and at a speed of 1.37 m / s it is 2.0... 2.3 times higher . With all steerable wheels the following results were obtained: at a speed of 0.68 m/s it was 1.16...1.20 times and at 1.37 m/s it was 1.50 ...1.52 times higher. The resulting character of the change in lateral reactions and their redistribution along the tractor axes is due to the values and ratios of tangential traction forces, rolling resistance forces and vertical forces on the wheels, their rolling conditions, changes in the position of the center of gravity of the machine-tractor unit, accelerations of vertical vibrations and geometric characteristics of turning. In all calculation options a more uniform distribution of lateral forces across the tractor axles when entering a turn with all controlled wheels obviously contributes to better controllability and stability of the unit, despite the fact that the vertical load on the front axle is 1.56...1.63 times higher than on the rear. At the same time the most favorable conditions of rolling wheels and realization of traction force occur. Thus, it is not advisable to control the tractor only with the front wheels when turning with frontal aggregation. Therefore, it is reasonable to use the method of turning the front and rear wheels at all stages of a circular loop-free turn to create the most favorable conditions for improving controllability and increasing the stability of movement on turns.

Keywords: tractor, turn entry, steady turn, inertia force, lateral reaction

1. Введение

При повороте на колёсную машину всегда действуют боковые силы, и в тех случаях, когда боковая реакция на её колёсах со стороны опорной поверхности не может им противодействовать, происходит боковой увод шин колёс, их скольжение и занос [1], [2].

С целью выявления основных закономерностей изменения боковых сил на колёсах трактора при криволинейном движении в настоящей работе рассмотрим, каков общий характер их изменения и перераспределения по мостам при входе в поворот — в процессе увеличения кривизны траектории и при установившемся повороте — при движении по траектории с постоянной кривизной и скоростью. Принимая, что траектория движения трактора на участке «выход из поворота» абсолютно «зеркальная», полученная для входа в поворот, и т. к. при этом происходит переход от более динамически нагруженного состояния к менее нагруженному, то исследования в данном направлении на указанном этапе поворота, как правило, не проводятся [3].

При определении боковых сил и реакций, действующих на трактор, сложно выделить те или иные определяющие факторы, формирующие их, надо учитывать практически все действующие силы и моменты. Известно, что на величины, направления, интенсивность изменения, характер перераспределения боковых реакций осей трактора в общем случае его криволинейного движения наиболее существенное влияние оказывают следующие основные факторы [4], [5]:

1. Скорость движения V трактора и радиус поворота R , определяющие величину нормальной составляющей силы инерции F_{in} , приложенной в центре тяжести и распределяемой пропорционально массам, приходящимся на соответствующую ось.

2. Ускорение трактора.

3. Максимальный угол поворота α_{max} и угловая скорость поворота управляемых колёс.

4. Момент сопротивления повороту, вызванный, в основном, разностью касательных сил тяги колёс бортов трактора и обусловленный, главным образом, характеристиками межколёсной и межосевой связей.

5. Продольная реакция колёс осей.

Известно [4], [5], что при малых рабочих скоростях движения на повороте основное влияние на формирование величины боковой реакции P_b почвы на колёсах оказывает момент сопротивления повороту, являющийся функцией разностей касательных сил тяги бортов трактора, а при высоких скоростях — результирующая боковой составляющей силы инерции, в основном центробежной.

При входе в поворот сцепление колёс с почвой, как в поперечном, так и продольном направлениях с уменьшением радиуса поворота и увеличением скорости движения, резко уменьшается, что оказывает негативное влияние не только на его кинематику, но и на динамику, в т. ч. при этом возрастают силы инерции и снижаются величины суммарной боковой реакции почвы P_b и осложняется характер перераспределения их по осям и бортам [6]. Под действием силы инерции происходит перераспределение боковых реакций

между внутренними и наружными колёсами, т. е. между бортами, и в вертикально-продольной плоскости — между колёсами осей ($P_b = P_{b1} + P_{b2}$, где P_{b1} — боковая реакция со стороны опорной поверхности на колёсах передней оси трактора, Н; P_{b2} — боковая реакция со стороны опорной поверхности на колёсах задней оси трактора, Н). Неравномерное распределение боковых сил по осям может привести не только к уводу и скольжению, но и заносу задней оси [7], [8].

Исходя из вышеизложенного, задачей проведённых исследований явилось аналитическое определение боковых реакций на колёсах трактора со стороны опорной поверхности на участках «вход в поворот» и «установившийся поворот» кругового беспетлевого поворота.

2. Материалы и методы

Объекты исследований: навесной комбинированный широкозахватный агрегат КРШ-8,1+НП-5,4+ЛТЗ-155+ССТ-18 и кинематические способы поворота трактора (передние управляемые колёса; передние и задние управляемые колёса — поворот их относительно остова в разные стороны) [3]. Расчёт выполнен численной реализацией математической модели криволинейного движения машинно-тракторного агрегата (МТА) в интерактивной среде программирования Matlab/Simulink [9—11].

При расчётах принято, что переход от прямолинейного движения на траекторию большой кривизны совершается при одном и том же законе равномерного вращения рулевого колеса: $\varphi = \omega t$, где ω — угловая скорость вращения рулевого колеса, t — время поворота рулевого колеса от нейтрального положения (угол поворота $\varphi = 0$) до $\varphi = \varphi_{max}$ (время входа в поворот) и, следовательно, при том же законе поворота управляемых колёс.

3. Результаты

В работе [12] получены расчётные значения величин боковых реакций со стороны деформируемой почвы на колёса трактора при входе в круговой беспетлевой поворот и установлена их взаимосвязь с инерционными силами. Выявлено, что на участке «вход в поворот» происходит наиболее заметное отклонение от теоретической траектории движения, именно на этом этапе поворота наблюдается значительная потеря устойчивости и управляемости из-за бокового увода и скольжения колёс под решающим влиянием на этот негативный процесс боковых сил. Величины и характер изменения расчётных значений силы инерции позволили сделать вывод, что при этом она оказывает значительное влияние на формирование боковых реакций и, следовательно, на изменение траектории криволинейного движения.

Как выявлено в результате расчётов, при совершении манёвра передними и задними управляемыми колёсами центробежная сила инерции выше в 1,8—2,0 раза, чем при повороте передними управляемыми колёсами, что обуславливает увеличение боковой реакции на колёсах (рисунки 1—4). Как следствие, отклонение от заданной траектории движения

при этом происходит значительнее ввиду более интенсивного роста мгновенного радиуса поворота.

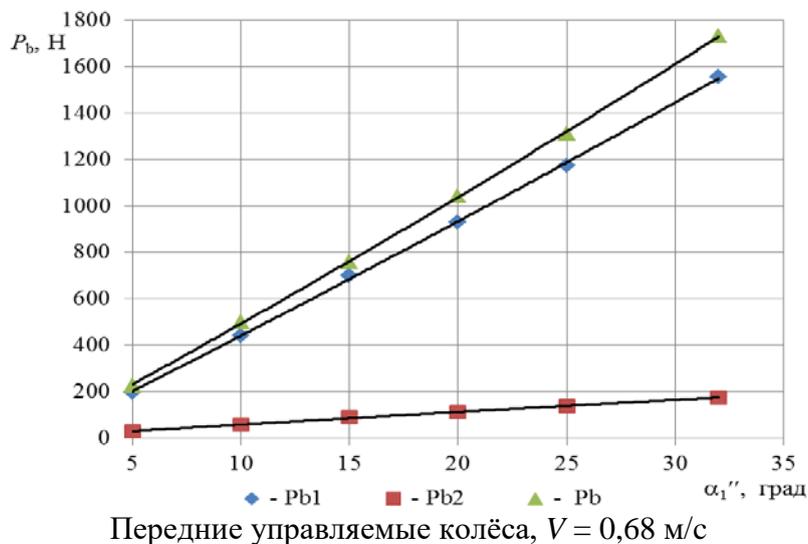


Рисунок 1. Зависимости боковой реакции от угла поворота внутреннего управляемого колеса

Figure 1. The dependence of the lateral reaction on the angle of rotation of the internal controlled wheel

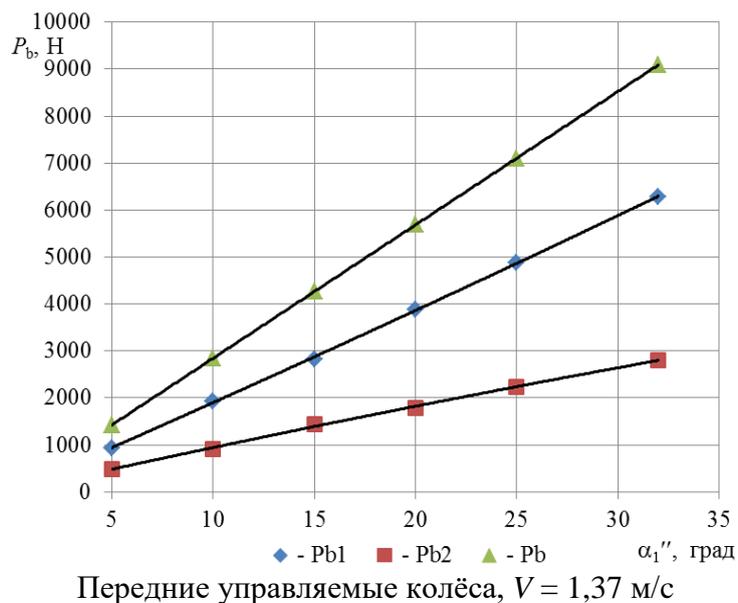
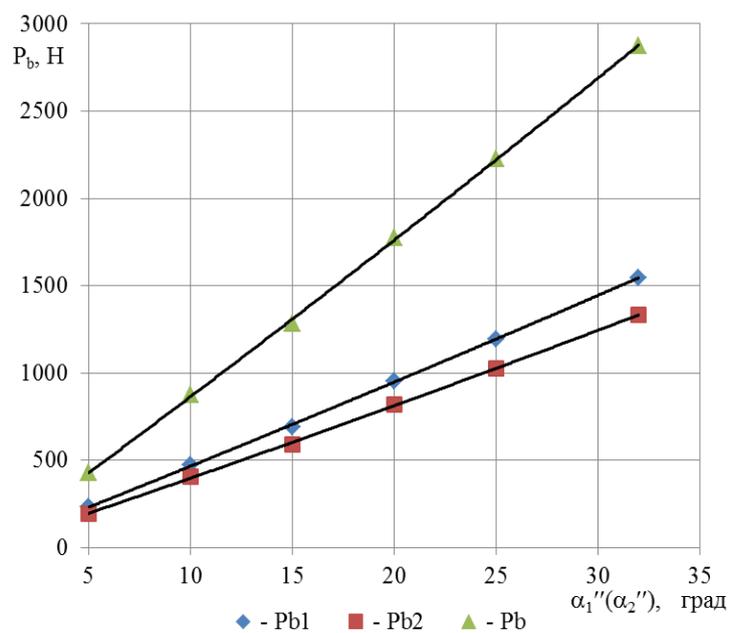


Рисунок 2. Зависимости боковой реакции от угла поворота внутреннего управляемого колеса

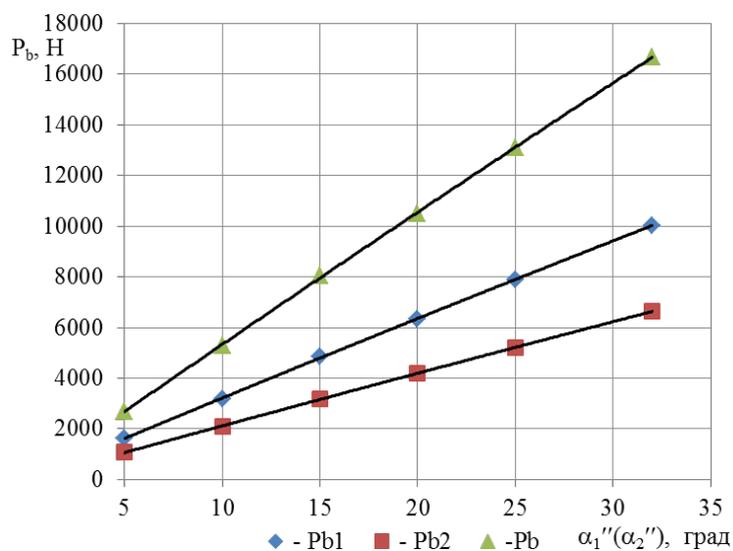
Figure 2. The dependence of the lateral reaction on the angle of rotation of the internal controlled wheel



Передние и задние управляемые колёса, $V = 0,68$ м/с

Рисунок 3. Зависимости боковой реакции от углов поворота внутренних управляемых колёс

Figure 3. The dependence of the lateral reaction on the angles of rotation of the internal controlled wheels



Передние и задние управляемые колёса, $V = 1,37$ м/с

Рисунок 4. Зависимости боковой реакции от углов поворота внутренних управляемых колёс

Figure 4. The dependence of the lateral reaction on the angles of rotation of the internal controlled wheels

При установившемся режиме поворота значения боковых реакций с увеличением скорости движения МТА по всем вариантам способов поворота возрастают (рисунок 5) вследствие изменения характера и возрастания частоты динамического воздействия микропрофиля опорной поверхности на колёса трактора, центробежной силы инерции (рисунок 6) и крутящих моментов (рисунок 7).

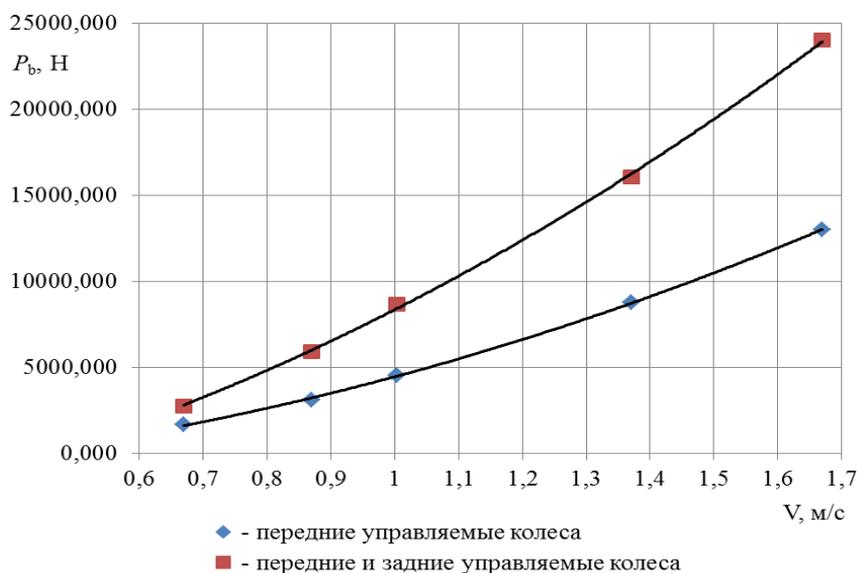


Рисунок 5. Зависимости боковой реакции от скорости движения

Figure 5. The dependence of the lateral reaction on the speed of movement

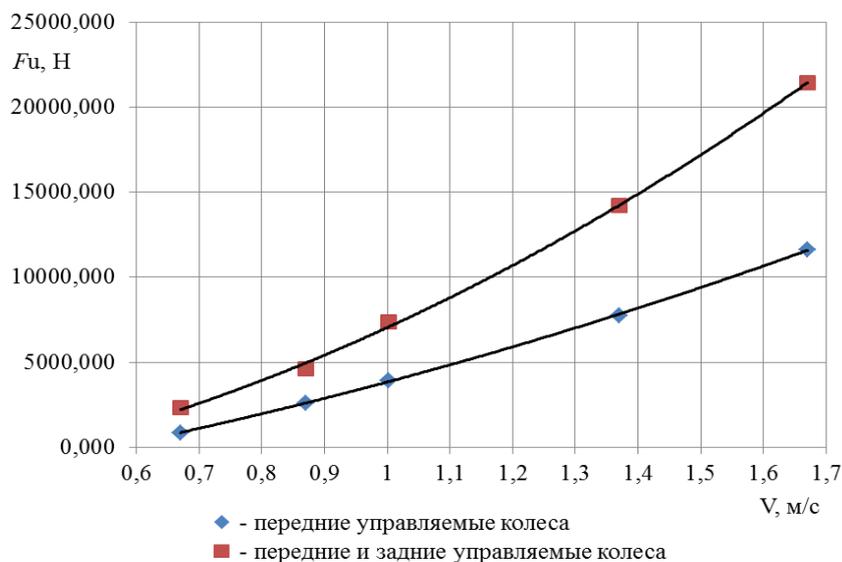


Рисунок 6. Зависимости силы инерции от скорости движения

Figure 6. The dependence of the inertia force on the speed of movement

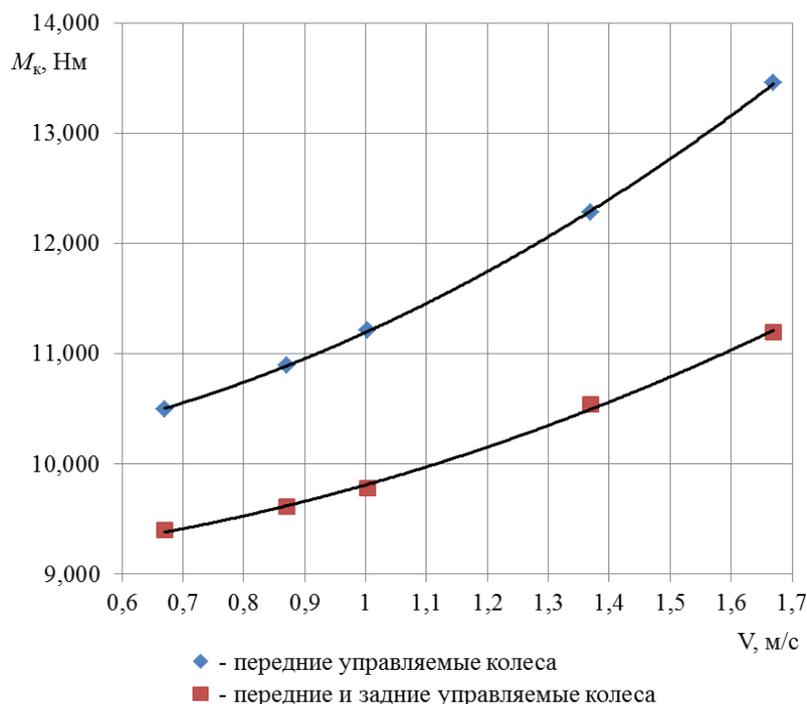


Рисунок 7. Зависимости крутящих моментов от скорости движения

Figure 7. Dependence of torques on the speed of movement

4. Обсуждение и заключение

Установлено отрицательное влияние поворота задних колёс на управляемость и устойчивость движения МТА: с одной стороны, при способе поворота четырьмя управляемыми колёсами мгновенный радиус поворота уменьшается, но интенсивность и величина отклонения его от заданной траектории движения увеличиваются.

Боковая сила увеличивается также при повышении скорости движения за счёт роста центробежной силы инерции и момента сопротивления повороту вследствие более интенсивного динамического воздействия микропрофиля опорной поверхности.

В простейшем случае, когда направляющими являются колёса только переднего моста, величина боковой реакции, приходящейся на его колёса, при входе в поворот со скоростью движения $V = 0,68$ м/с выше в 6,6—8,8 раза, чем на колёса задней оси (см. рисунок 1), а со скоростью $v = 1,37$ м/с — в 2,0—2,3 раза (см. рисунок 2). При всех управляемых колёсах получены следующие результаты: при $V = 0,68$ м/с — 1,16—1,20 раза (см. рисунок 3), при $V = 1,37$ м/с — 1,50—1,52 раза (рисунок 4).

Полученный характер изменения боковых реакций и перераспределения их по осям трактора обусловлен величинами и соотношениями касательных сил тяги, сил сопротивления качению и вертикальных сил на колёсах, условиями их качения, изменением положения центра тяжести МТА, ускорений вертикальных колебаний и геометрических характеристик поворота.

Более равномерное распределение боковых сил по мостам трактора при входе в поворот всеми управляемыми колёсами, очевидно, способствует лучшей управляемости и устойчивости МТА, несмотря на то, что вертикальная нагрузка, приходящаяся на передний мост, в 1,56—1,63 раза выше, чем на задний, во всех вариантах расчёта. При этом создаются наиболее благоприятные условия качения колёс и реализации силы тяги. Таким образом, управление трактором только передними колёсами на повороте при фронтальном агрегатировании не целесообразно.

Сравнение зависимостей боковой реакции P_b и силы инерции F_u на установившемся участке поворота (см. рисунки 5 и 6) показывает, что значения F_u всего на 12—18 % ниже P_b по всем вариантам расчётов, что позволяет сделать вывод о её самодостаточности для определения боковой реакции. При этом величины боковой реакции при повороте всеми колёсами на рассматриваемом участке примерно в 1,8 раза больше, а крутящие моменты на колёсах трактора — на 10—16 % выше в сравнении со способом поворота передними колёсами (рисунок 7).

Таким образом, рациональным с точки зрения создания наиболее благоприятных условий для улучшения управляемости и повышения устойчивости движения при повороте является применение способа поворота передними и задними колёсами на всех этапах кругового беспетлевого поворота.

Список литературы

1. *Troyanovskaya I. P., Voinash S. A.* Model for stationary turn of an arbitrary vehicle // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Electronic Edition. 2018. P. 032035. Available at: <http://iopscience.iop.org/volume/1757-899X/450>. Text. Image: electronic.
2. *Troyanovskaya I. P., Pozin B. M., Noskov N. K.* Ploughing tractor lateral withdrawal model // Procedia Engineering. Сер. «International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017». 2017. P. 1540—1546. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817353596>. Text. Image: electronic.
3. Determination of theoretical path of vehicle motion upon cornering / A. N. Belyaev, T. V. Trishina, V. P. Shatsky, V. G. Kozlov, I. A. Vysotskaya // Journal of Applied Science and Engineering (Taiwan). 2022. Vol. 25, no. 5. P. 741—747. Available at: <http://jase.tku.edu.tw/articles/jase-202210-25-5-0004>. Text. Image: electronic.
4. *Носков Н. К., Позин Б. М., Трояновская И. П.* Математическая модель бокового увода трактора // Известия МГТУ МАМИ. 2017. № 1 (31). С. 35—39.
5. *Носков Н. К., Трояновская И. П., Титов С. А.* Математическая модель силового взаимодействия колеса с грунтом при повороте машины // Вестник ЮУрГУ. 2017. Т. 17, № 3. С. 5—15. DOI: 10.14529/engin170301.
6. *Жилейкин М. М.* Исследование автоколебательных процессов в зоне взаимодействия эластичной шины с твёрдым опорным основанием // Известия вузов. Сер. Машиностроение. 2021. № 10. С. 3—15. URL: http://izvuzmash.ru/catalog/mechanical/mach_scienc/1883.html. Текст : электронный.
7. *Antonyan A., Zhileykin M., Eranosyan A.* The algorithm of diagnosing the development of a skid when driving a two-axle vehicle // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Design Technologies for Wheeled and Tracked Vehicles, MMBC. 2020.

- P. 012003. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757899X/820/1/012003/pdf>. Text. Image: electronic.
8. Zhileykin M., Eranosyan A. Method of torque distribution between the axles and the wheels of the rear axle to improve the manageability of two-axle all-wheel drive vehicles // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Design Technologies for Wheeled and Tracked Vehicles, MMBC*. 2019. 2020. P. 012008. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/820/1/012008/pdf>. Text. Image: electronic.
 9. Сиротин П. В., Жилейкин М. М. Исследование динамики движения зерно- и кормоуборочных комбайнов методами математического и имитационного моделирования // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2019. № 1. С. 53—59.
 10. 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.
 11. Klee H., Allen R. Simulation of Dynamic Systems with MATLAB and Simulink. Taylor & Francis Group, LLC, 2018. 853 p. Available at: <https://doi.org/10.1201/9781315154176>. Text. Image: electronic.
 12. Исследование движения колёсной машины по криволинейной траектории / А. Н. Беляев, Т. В. Тришина, А. Е. Новиков, Ю. В. Дяченко, И. А. Высоцкая // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2021. Т. 14, № 4 (71). С. 21—29.

References

1. Troyanovskaya I. P., Voinash S. A. Model for stationary turn of an arbitrary vehicle. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Electronic Edition*, 2018, pp. 032035. Available at: <http://iopscience.iop.org/volume/1757-899X/450>. Text. Image: electronic.
2. Troyanovskaya I. P., Pozin B. M., Noskov N. K. Ploughing tractor lateral withdrawal model. *Procedia Engineering. CEP. «International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017»*, 2017, pp. 1540—1546. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817353596>. Text. Image: electronic.
3. Belyaev A. N., Trishina T. V., Shatsky V. P., Kozlov V. G., Vysotskaya I. A. Determination of theoretical path of vehicle motion upon cornering. *Journal of Applied Science and Engineering (Taiwan)*, 2022, vol. 25, no. 5, pp. 741—747. Available at: <http://jase.tku.edu.tw/articles/jase-202210-25-5-0004>. Text. Image: electronic.
4. Noskov N. K., Pozin B. M., Troyanovskaya I. P. Matematicheskaya model' bokovogo uvoda traktora. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2017, no. 1 (31), pp. 35—39. (In Russ.)
5. Noskov N. K., Troyanovskaya I. P., Titov S. A. Matematicheskaya model' silovogo vzaimodejstviya koleasa s gruntom pri povorote mashiny. *Vestnik YUUrGU*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 5—15. doi: 10.14529/engin170301. (In Russ.)
6. Zhilejkin M. M. Issledovanie avtokolebatel'nyh processov v zone vzaimodejstviya elastichnoj shiny s tverdyim opornym osnovaniem. *Izvestiya VUZov. Ser. Mashinostroenie*, 2021, no. 10, pp. 3—15. Available at: http://izvuzmash.ru/catalog/mechanical/mach_scienc/1883.html. Text. Image: electronic (In Russ.)
7. Antonyan A., Zhileykin M., Eranosyan A. The algorithm of diagnosing the development of a skid when driving a two-axle vehicle. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Design Technologies for Wheeled and Tracked Vehicles, MMBC*, 2020, pp. 012003. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757899X/820/1/012003/pdf>. Text. Image: electronic.

8. Zhileykin M., Eranosyan A. Method of torque distribution between the axles and the wheels of the rear axle to improve the manageability of two-axle all-wheel drive vehicles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Design Technologies for Wheeled and Tracked Vehicles, MMBC. 2019, 2020*, pp. 012008. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/820/1/012008/pdf>. Text. Image: electronic.
9. Sirotin P. V., Zhilejkin M. M. Issledovanie dinamiki dvizheniya zerno- i kormouborochnyh kombajnov metodami matematicheskogo i imitacionnogo modelirovaniya. *Traktory i sel'skohozyajstvennyye mashiny*, 2019, no. 1, pp. 53—59. (In Russ.)
10. 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.
11. Klee H., Allen R. *Simulation of Dynamic Systems with MATLAB and Simulink*. Taylor & Francis Group, LLC, 2018. 853 p. Available at: <https://doi.org/10.1201/9781315154176>. Text. Image: electronic.
12. Belyaev A. N., Trishina T. V., Novikov A. E., Dyachenko YU. V., Vysockaya I. A. Issledovanie dvizheniya kolesnoj mashiny po krivolinejnoj traektorii. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2021, vol. 14, no. 4 (71), pp. 21—29. (In Russ.)