

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-321270>

Оригинальное исследование



# Повышение устойчивости и управляемости тракторов при буксировке прицепов и сцепных агрегатов

М.М. Жилейкин<sup>1</sup>, П.В. Сиротин<sup>2</sup>, С.С. Носиков<sup>2</sup><sup>1</sup> Инновационный центр КАМАЗ, Инновационный центр Сколково, Москва, Российская Федерация;<sup>2</sup> Южно-Российский государственный политехнический университет им. М.И. Платова, Новочеркасск, Российская Федерация

## АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** В настоящее время почти все сельскохозяйственные работы выполняются на тракторной тяге. С увеличением транспортной скорости тракторного поезда возникает и растет амплитуда поперечных и горизонтальных колебаний его прицепных звеньев. При определенных скоростях эти колебания становятся настолько велики, что могут приводить к опрокидыванию тракторного поезда. Кроме того, возникают ударные нагрузки в сцепных устройствах, что затрудняет управление тракторным поездом. Традиционным способом предотвращения подобного является ограничение скоростного режима, что не гарантирует положительного результата.

**Цель работы** — разработка методов повышения устойчивости, управляемости и безопасности движения тракторных поездов на колесном ходу за счет снижения галопирования и рыскания трактора-тягача при буксировке тяжелых грузов.

**Материалы и методы.** Предложены следующие варианты исполнения системы противодействия возникновению автоколебаний в конструкции тракторного поезда на колесном ходу, обеспечивающие снижение уровня автоколебаний, повышение устойчивости, управляемости и безопасности движения тракторного поезда: буксирное устройство, оснащенное гидравлическими демпфирующими устройствами по углам продольного и поперечного складывания; система управления индивидуальным тяговым электроприводом трактора-тягача, предотвращающая потерю сцепления колеса с опорным основанием: совместное применение системы управления индивидуальным тяговым электроприводом трактора-тягача и буксирного устройства, оснащенного гидравлическими демпфирующими устройствами; совместное применение буксирного устройства, оснащенного гидравлическими демпфирующими устройствами, и системы корректировки поворота управляемых колес (подруливание).

**Результаты.** Методами имитационного моделирования установлено, что на современном этапе развития наиболее приемлемой и эффективной системой снижения автоколебаний тракторного поезда на колесном ходу следует признать буксирное устройство, оснащенное гидравлическими демпфирующими устройствами, регулируемые по углу складывания тракторного поезда и по углу продольно-угловых колебаний корпуса трактора-тягача.

**Заключение.** Практическая ценность исследования заключается в возможности использования предложенных методов борьбы с опасностью возникновения автоколебательных процессов при проектировании перспективных видов сельскохозяйственной техники.

**Ключевые слова:** тракторный поезд; автоколебания; рыскание; галопирование; повышение устойчивости и управляемости; безопасность движения.

## Как цитировать:

Жилейкин М.М., Сиротин П.В., Носиков С.С. Повышение устойчивости и управляемости тракторов при буксировке прицепов и сцепных агрегатов // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 2. С. 161–169. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-321270>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-321270>

Original Study Article

# Improving the stability and handling of tractors when towing trailers and coupled units

Mikhail M. Zhileykin<sup>1</sup>, Pavel V. Sirotin<sup>2</sup>, Sergey S. Nosikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> KAMAZ Innovation Center, Skolkovo Innovation Center, Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup> South Russian State Polytechnic University named after M.I. Platov, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Currently, almost all agricultural work is performed using tractors. As the transport speed of a tractor train increases, the amplitude of lateral and horizontal oscillations of its coupled units emerges and increases. At certain velocities, these oscillations become so large that they can lead to a rollover, in addition, shock loads occur in coupling devices, which make it difficult to handle a tractor train. The traditional method to prevent this is the velocity limit, which does not guarantee a positive result.

**AIMS:** Development of methods to improve stability, handling and safety of wheeled tractor trains by reducing the galloping and yawing of a truck tractor when towing heavy loads.

**METHODS:** The following options of the design of the system for countering the occurrence of self-oscillations in the design of a wheeled tractor train ensuring a reduction in the level of self-oscillations, increasing the stability, handling and safety of the tractor train have been proposed: the coupling device equipped with hydraulic damping devices operating at longitudinal and lateral folding; the control system for the individual traction electric drive of a truck tractor preventing the loss of wheel grip with the ground surface; the combined use of the control system for the individual traction electric drive of a truck tractor and the coupling device equipped with hydraulic damping devices; the combined use of the coupling device equipped with hydraulic damping devices and a steering correction system.

**RESULTS:** With use of simulation modeling methods, it has been established that the coupling device equipped with hydraulic damping devices adjustable by the folding angle of the tractor train and by the yaw angle oscillations of a truck tractor body should be recognized as the most acceptable and effective system for reducing self-oscillations of a wheeled tractor train at the current state of the art.

**CONCLUSIONS:** The practical value of the study lies in the possibility of using the proposed methods to eliminate the risk of self-oscillating processes in the design of promising types of agricultural machinery.

**Keywords:** tractor train; self-oscillation; yawing; galloping; improvement of stability and handling; traffic safety.

## To cite this article:

Zhileykin MM, Sirotin PV, Nosikov SS. Improving the stability and handling of tractors when towing trailers and coupled units. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2023;90(2):161–169. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-321270>

Received: 11.03.2023

Accepted: 01.05.2023

Published: 15.05.2023

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время почти все сельскохозяйственные работы выполняются на тракторной тяге. Для их выполнения требуются значительные энергетические и трудовые затраты. Статистические данные показывают, что доля затрат на транспортировку грузов в сельском хозяйстве составляет 25–40% от общих затрат на производимую продукцию. При этом доля тракторных внутрихозяйственных перевозок составляет 60% [1].

Производство и совершенствование тракторов оказывает существенное влияние на развитие экономики государства, так как непосредственно связано с наиболее важной сферой человеческой деятельности – изготовлением продуктов питания. Одним из способов повышения эффективности тракторных перевозок является использование многосвязных тракторных поездов с одним и более прицепами [2]. При этом значительно улучшаются сразу несколько показателей:

- повышается коэффициент использования машино-тракторного парка и производительность трактора;
- улучшается режим работы и нагрузка двигателя;
- улучшается общее воздействие на почву за счет распределения нагрузки по осям.

Грузоподъёмность и скорость движения тракторных поездов зачастую ограничивается не мощностью двигателя, а недостаточными тягово-сцепными свойствами, тормозными качествами, низкой плавностью входа и устойчивостью, вследствие возникновения автоколебаний и галопирования [3].

С увеличением транспортной скорости тракторного поезда возникает и растёт амплитуда поперечных и горизонтальных колебаний его прицепных звеньев. При определенных скоростях эти колебания становятся настолько велики, что могут приводить к опрокидыванию тракторного поезда. Кроме того, возникают ударные нагрузки в прицепных устройствах, что затрудняет управление тракторным поездом.

Следует отметить, что при таком режиме работы имеет место усталостное разрушение рамы прицепа,

повышенный износ шин, увеличенный расход топлива, увеличение усталости водителя [4].

Автотракторный поезд является сложной машиной, обычно менее маневренной, чем отдельное транспортное средство. Превышение скоростного режима движения, особенно у автотранспортных поездов, приводит к нарушению их устойчивости при движении как на прямых, так и на криволинейных участках дороги, а также в условиях повышенной сложности движения. Традиционным способом предотвращения таких нарушений является ограничение скорости, но это не гарантирует положительного результата.

Таким образом, для повышения производительности труда при транспортных операциях, необходимо улучшать устойчивость автотракторного поезда.

В связи с этим работа, которая направлена на улучшение устойчивости движения автотракторного поезда путём совершенствования тягово-сцепных устройств, является актуальной и имеет важное народнохозяйственное значение.

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является разработка методов повышения устойчивости, управляемости и безопасности движения тракторных поездов на колесном ходу за счет снижения галопирования и рыскания трактора-тягача при буксировке тяжелых грузов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования процесса зарождения и развития автоколебаний в зоне взаимодействия колеса с опорным основанием теоретические исследования движения тракторного поезда проведены в соответствии с выводами и рекомендациями работы [5].

Предполагается, что тракторный поезд состоит из двухосного колесного тягача и двухосной прицепной тележки, технические характеристики которых приведены в таблицах 1 и 2.

**Таблица 1.** Технические характеристики трактора-тягача

**Table 1.** The truck tractor technical specification

Наименование показателя	Значение показателя
Формула рулевого управления	1–0
Полная масса тягача, кг	10720
Колесная база, м	3,5
Колея колес, м	2,04
Радиус колеса, м	0,8
Тип тягового привода	Электромеханический индивидуальный на каждое колесо
Мощность тягового электродвигателя, кВт	210
Передаточное число колесного редуктора	6,04

**Таблица 2.** Технические характеристики тележки-прицепа**Table 2.** The trailer technical specification

Название параметра	Значение
Колея колес, м	2,04
Масса полная, кг	110000
Радиус колеса, м	0,4
Число осей	Две, передняя поворотная
Тип тягового привода	Тяговый привод отсутствует

Основы математической модели движения тракторного поезда изложены в работе [6]. Под термином «опорное основание» понимается твердая неровная недеформируемая опорная поверхность, которую можно охарактеризовать как «асфальто-бетонное шоссе», коэффициенты сцепления при полном скольжении 0,8. Моделировался разгон по прямой с места до скорости 20 км/ч.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ режимов возникновения автоколебаний конструкции тракторного поезда на колесном ходу проводили с помощью имитационного математического моделирования в соответствии с работой [6]. На рис. 1 представлен процесс изменения во времени угла скольжения  $\alpha$  для колеса, катящегося в ведущем режиме. Определение угла скольжения  $\alpha$  приведено в соответствии с работой [5].

Анализ рис. 1 показывает, что в процессе качения угол скольжения  $\alpha$  меняется от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ . При этом автоколебательный процесс наблюдается при значениях угла скольжения  $\alpha$ , близких к  $90^\circ$ . При таких значениях угла скольжения  $\alpha$  наступает боковое скольжение колеса. Таким образом, этот параметр является качественным диагностическим признаком распознавания бокового скольжения колеса в ведущем режиме качения.

Анализ режимов возникновения автоколебаний в различных местах конструкции тракторного поезда на колесном ходу позволяет утверждать, что наиболее

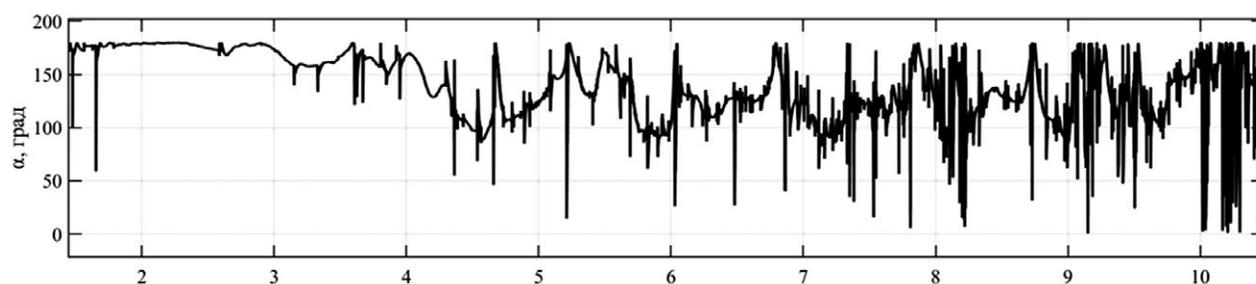
опасными с точки зрения потери устойчивости движения являются следующие элементы конструкции:

- в зоне взаимодействия эластичной шины с опорным основанием в ведущем режиме качения колеса направление действия результирующей реакции в горизонтальной плоскости начинает хаотично меняться, что может привести к потере сцепления;
- возникновение вертикальных («подпрыгивание») и продольно-угловых («галопирование») колебаний корпуса трактора-тягача может привести к отрыву колес от опорного основания, что может привести к потере управляемости;
- возникновение хаотичных колебаний курсового угла трактора-тягача может привести к потере траекторной устойчивости тракторного поезда, что негативным образом сказывается на безопасности движения и может привести к дорожно-транспортным происшествиям с тяжелыми последствиями.

Выявление причин и источников возникновения автоколебательных процессов в различных зонах тракторных автопоездов на колесном ходу позволяет предложить набор методов борьбы с этим опасным явлением.

### Случай возникновения опасности потери сцепления шины с опорным основанием в ведущем режиме качения колеса

Рассмотрим случай возникновения опасности потери сцепления шины с опорным основанием в ведущем режиме качения колеса. В качестве диагностического

**Рис. 1.** Процесс изменения во времени угла скольжения  $\alpha$  для колеса, катящегося в ведущем режиме.**Fig. 1.** The time-domain process of change of wheel slip angle  $\alpha$  for the wheel rolling in the driving mode.

признака, как было показано выше, можно использовать угол скольжения  $\alpha$ . Диагностическим правилом отнесения ситуации к одному из двух классов: «потеря сцепления произошла» и «потери сцепления не произошло» могут служить следующие выражения:

- «потеря сцепления произошла»:

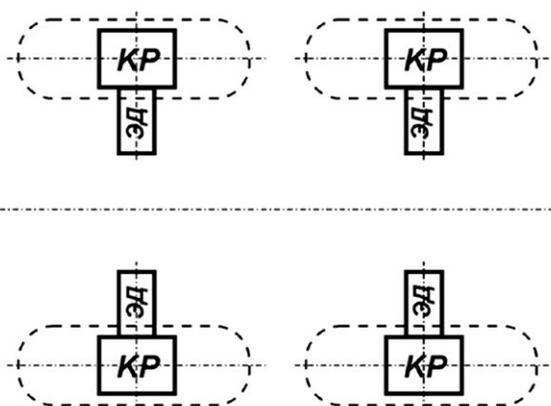
$$75^\circ \leq \alpha \leq 105^\circ; \tag{1}$$

- «потери сцепления не произошло»:

$$\alpha < 75^\circ \text{ или } \alpha > 105^\circ. \tag{2}$$

Одним из наиболее простых и эффективных способов борьбы с потерей сцепления ведущих колес с опорным основанием является изменение крутящих моментов, подводимым к этим колесам [6]. Как указано в табл. 1 и 2, будем рассматривать индивидуальный электромеханический привод в качестве тягового для трактора-тягача и отсутствие тягового привода на буксируемой тележке.

Рассмотрим схему индивидуального тягового электропривода (ИТЭП) двухосного колесного трактора (рис. 2).



**Рис. 2.** Схема ИТЭП двухосного трактора: КР – колесный редуктор; ЭД – электродвигатель.

**Fig. 2.** The scheme of the individual traction electric drive of a two-axle wheeled tractor: КР – a wheel hub gear; ЭД – an electric motor.

Уставка крутящего момента, который должен быть реализован на  $i$ -м тяговом электродвигателе (ТЭД) для обеспечения вращения  $i$ -го колеса с угловой скоростью  $\omega_{kit}$ , определяется выражением [6]:

$$N_{ДВ\max} \cdot h_{dr} \cdot h_{PBSi} = M_{ДВи} \cdot \omega_{kit}, \quad i = 1, \dots, 4.$$

где  $N_{ДВ\max}$  – максимальная мощность ТЭД;  $h_{dr}$  – степень использования мощности двигателя (нажатие педали «газ» [0...1]);  $M_{ДВи}$  – выходной момент  $i$ -го ТЭД;  $h_{PBSi}$  – дополнительное управляющее воздействие для  $i$ -го ТЭД («электронная педаль газа»), меняющая степень использования мощности двигателя независимо от воли водителя в зависимости от оценки диагностического признака  $\alpha_i$  для  $i$ -го колеса и в соответствии с правилами (1) и (2).

Управляющее воздействие  $h_{PBSi}$  для  $i$ -го ТЭД в соответствии с правилами (1) и (2) можно представить в виде зависимости от оценки диагностического признака  $\alpha$  см. рис. 3.

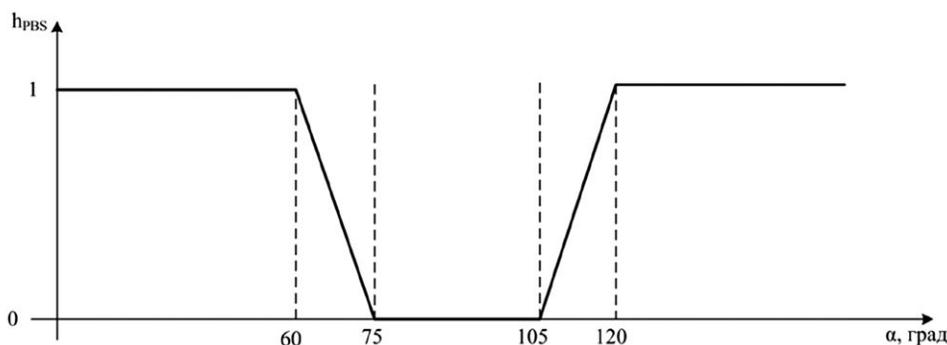
### Случай возникновения хаотичных колебаний курсового угла трактора-тягача

Задача управления движением трактора-тягача в составе тракторного поезда состоит в поддержании угла складывания  $\gamma$  в области нулевого значения, если поезд должен двигаться прямолинейно, и водитель не поворачивает руль. В качестве управляющего воздействия, обеспечивающего поддержание заданной траектории, примем средний угол поворота управляемых колес (подруливания):  $\beta_{1cp} = (\beta_1 + \beta_3)/2$ , где  $\beta_1, \beta_3$  – углы поворота левого и правого управляемых колес трактора-тягача.

Будем искать управляющее воздействие в виде пропорционально-дифференциального регулятора (ПД-регулятора):

$$\beta_{1cp} = C_1 \gamma + C_2 \frac{d\gamma}{dt}, \tag{3}$$

где  $C_1, C_2$  – коэффициенты усиления регулятора.



**Рис. 3.** Зависимость управляющего воздействия  $h_{PBSi}$  от оценки диагностического признака  $\alpha$ .

**Fig. 3.** Dependence of the control input  $h_{PBSi}$  on assessment of the diagnostic indicator  $\alpha$ .

Для того, чтобы избежать автоколебаний в процессе корректировки углов поворота управляемых колес [7], введем, так называемые, зоны нечувствительности:

$$|\gamma| \geq 0,5 \text{ град}, \quad \left| \frac{d\gamma}{dt} \right| \geq 1 \text{ град/с.}$$

Тогда углы поворота управляемых колес определяются по следующим зависимостям

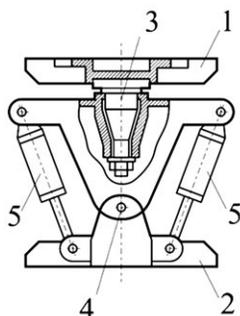
$$\text{tg} \beta_1 = \frac{2L \text{tg} \beta_{1\text{ср}}}{2L - B \text{tg} \beta_{1\text{ср}}}; \quad \text{tg} \beta_3 = \frac{2L \text{tg} \beta_{1\text{ср}}}{2L + B \text{tg} \beta_{1\text{ср}}},$$

где  $L$ ,  $B$  – колесные база и колея соответственно трактора-тягача.

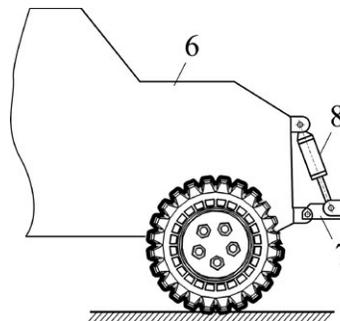
### Случай возникновения вертикальных («подпрыгивание») и продольно-угловых («галопирование») колебаний корпуса трактора-тягача

С возникновением автоколебаний по фазовым координатам  $\varphi$  (продольный угол складывания) и  $\gamma$  (поперечный угол складывания) можно бороться путем введения в динамическую систему вязкого трения. Конструктивно это может быть оформлено в виде доработанной конструкции буксировочного устройства, которое оснащается гидравлическими демпфирующими устройствами как по фазовой координате  $\gamma$  (рис. 4а), так и по фазовой координате  $\varphi$  (рис. 4б).

Применение гидроцилиндров приводит к необходимости введения ограничений на максимальный угол  $\gamma$  складывания трактора-тягача и тележки-прицепа. Для предотвращения складывания на максимальные углы необходимо использовать переменное значение коэффициента демпфирования  $K_{dy}$ , увеличивающееся с увеличением угла  $\gamma$ . Изменение значения  $K_{dy}$  обеспечивается путем изменения диаметра  $d_{dr}$  проходного сечения дросселя гидросистемы.



а



б

**Рис. 4.** Введение в конструкцию буксировочного устройства гидравлических демпфирующих устройств по фазовой координате  $\gamma$  (а) и по фазовой координате  $\varphi$  (б): 1, 2 – элементы несущих систем трактора-тягача и тележки соответственно; 3 – сцепное устройство; 4 – вертикальный шарнир; 5, 8 – гидравлические демпфирующие устройства; 6 – трактор-тягач; 7 – буксирное устройство.

**Fig. 4.** Implementation of damping devices operating at the phase coordinate  $\gamma$  (a) and the phase coordinate  $\varphi$  (b) in the design of a coupling device: 1, 2 – components of frameworks of a truck tractor and a trailer respectively; 3 – the coupling device; 4 – a vertical joint; 5, 8 – hydraulic damping devices; 6 – the truck tractor; 7 – a towing device.

Значение коэффициента демпфирования  $K_{dy}$ , определим по известной формуле [8]

$$K_{dy} = \frac{2\pi\Psi_{\gamma} f_{\gamma} J_{\gamma}}{l^2},$$

где  $\Psi_{\gamma}=0,4$  – относительный коэффициент затухания для продольно-угловых колебаний;  $f_{\gamma}$  – собственная частота продольно-угловых колебаний;  $J_{\gamma}$  – момент инерции трактора тягача относительно поперечной оси, проходящей через ось качания;  $l$  – расстояние от оси качания до центра масс трактора-тягача.

Аналогичные рассуждения справедливы и для коэффициента демпфирования  $K_{d\varphi}$  гашения продольно-угловых колебаний.

Исследование работоспособности и эффективности разработанных методов борьбы с автоколебательными процессами тракторного автопоезда на колесном ходу проводилось путем моделирования разгона тракторного поезда по прямой с места до скорости 20 км/ч на «асфальто-бетонное шоссе» (коэффициенты сцепления при полном скольжении 0,8). Рассматривались следующие варианты исполнения системы предотвращения автоколебаний тракторного поезда:

1. буксирное устройство, оснащенное гидравлическими демпфирующими устройствами по фазовым координатам  $\gamma$  и  $\varphi$ ;
2. система управления индивидуальным тяговым электроприводом трактора-тягача, предотвращающая потерю сцепления колеса с опорным основанием;
3. совместное применение систем по п.п. 1 и 2;
4. совместное применение буксирного устройства по п. 1 и системы корректировки поворота управляемых колес (подруливание).

Исследование работоспособности и эффективности работы указанных комплектаций системы предотвращения автоколебаний тракторного поезда проводилось в сравнении с базовым вариантом тракторного поезда,

не оснащенного такими системами. Результаты анализа результатов сведены в табл. 3 и 4.

Анализ результатов моделирования (табл. 3 и 4) показывает, что наибольшую эффективность в плане снижения уровня автоколебаний по углу складывания автопоезда демонстрирует комплексная система, состоящая из буксирного устройства с демпфированием, и подруливания.

Однако такая система требует существенной и дорогой перестройки рулевого управления трактора-тягача. Второй результат по эффективности показывает комплексная система, состоящая из буксирного устройства с демпфированием и управления индивидуальным тяговым электроприводом. Но в настоящее время далеко не все трактора-тягачи оснащены ИТЭП. Аналогичный вывод следует и для анализа работы систем по углу продольно-угловых колебаний корпуса трактора-тягача. Поэтому на современном этапе развития наиболее приемлемой и эффективной системой снижения автоколебаний тракторного поезда на колесном ходу следует признать буксирное устройство, оснащенное гидравлическими демпфирующими устройствами по углу складывания тракторного поезда и по углу продольно-угловых колебаний корпуса трактора-тягача.

## ВЫВОДЫ

- Предложены следующие варианты исполнения системы противодействия возникновению автоколебаний в конструкции тракторного поезда на колесном ходу, обеспечивающие снижение уровня автоколебаний, повышение устойчивости, управляемости и безопасности движения тракторного поезда:
  - буксирное устройство, оснащенное гидравлическими демпфирующими устройствами по фазовым координатам  $\gamma$  и  $\varphi$ ;
  - система управления индивидуальным тяговым электроприводом трактора-тягача, предотвращающая потерю сцепления колеса с опорным основанием;
  - совместное применение системы управления индивидуальным тяговым электроприводом трактора-тягача и буксирного устройства, оснащенного гидравлическими демпфирующими устройствами;
  - совместное применение буксирного устройства, оснащенного гидравлическими демпфирующими устройствами, и системы корректировки поворота управляемых колес (подруливание).
- Методами имитационного моделирования установлено, что на современном этапе развития наиболее

**Таблица 3.** Результаты анализа снижения уровня автоколебаний по фазовой координате  $\gamma$

**Table 3.** Results of analysis of reduction of the level of self-oscillations at the phase coordinate  $\gamma$

Исполнение системы предотвращения автоколебаний	Среднеквадратическое отклонение угла $\gamma$ , град	Снижение на, %	Максимальное значение угла $\gamma$ , град	Снижение на, %
Без управления	5,8	–	9,8	–
Буксирное устройство с демпфированием	2,11	63,6	3,4	65,3
Управление ИТЭП	2,73	52,9	5,5	43,9
Буксирное устройство с демпфированием и управление ИТЭП	1,67	71,2	2,8	71,4
Буксирное устройство с демпфированием и подруливание	0,67	88,5	2,1	78,6

**Таблица 4.** Результаты анализа снижения уровня автоколебаний по фазовой координате  $\varphi$

**Table 4.** Results of analysis of reduction of the level of self-oscillations at the phase coordinate  $\varphi$

Исполнение системы предотвращения автоколебаний	Среднеквадратическое отклонение угла $\varphi$ , град	Снижение на, %	Максимальное значение угла $\varphi$ , град	Снижение на, %
Без управления	0,89	–	3,1	–
Буксирное устройство с демпфированием	0,60	32,6	2,1	32,3
Управление ИТЭП	0,86	3,4	4,1	-32,3
Буксирное устройство с демпфированием и управление ИТЭП	0,64	28,1	2,5	19,4
Буксирное устройство с демпфированием и подруливание	0,61	31,5	2,1	32,3

приемлемой и эффективной системой снижения автоколебаний тракторного поезда на колесном ходу следует признать буксирное устройство, оснащенное гидравлическими демфирующими устройствами, регулируемые по углу складывания тракторного поезда и по углу продольно-угловых колебаний корпуса трактора-тягача.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНО

**Вклад авторов.** М.М. Жилейкин — разработка алгоритма управления тяговым электроприводом; П.В. Сиротин — разработка методов борьбы с колебаниями курсового угла с галопированием; С.С. Носиков — проведение моделирования и анализ результатов. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных

конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Authors' contribution.** M.M. Zhileykin — development of an algorithm for controlling a traction electric drive; P.V. Sirotin — development of methods to combat fluctuations in the heading angle with galloping; S.S. Nosikov — modeling and analysis of the results. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

**Competing interests.** The authors declare that they have no competing interests.

**Funding source.** This study was not supported by any external sources of funding.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Успенский И.А., Юхин И.А., Жуков К.А., и др. Перспективы развития транспортной техники для внутрихозяйственных перевозок плодоовощной продукции в агропромышленном комплексе. Рязань: ФГБОУ ВПО РГАТУ, 2015.
2. Анилович В.Я., Водолазниченко Ю.Т. Конструирование и расчет сельскохозяйственных тракторов: справочное пособие. Изд. 2-е, переработ. и доп. М.: Машиностроение, 1976.
3. Гамаюнов, А. М. Анализ управляющих и возмущающих воздействий системе тракторно-транспортного агрегата // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2007. № 5 С. 56.
4. Высоккина, Л.И., Данилов М.В. Малиев В.Х., и др. Эксплуатация машинотракторного парка. Уч. пособие. Ставрополь: Бюро новостей, 2013.
5. Жилейкин М.М. Исследование автоколебательных процессов в зоне взаимодействия эластичной шины с твер-

дым опорным основанием // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2021. № 10. С. 3–15. doi: 10.18698/0536-1044-2021-10-3-15.

6. Жилейкин М.М. Теоретические основы повышения показателей устойчивости и управляемости колесных машин на базе методов нечеткой логики. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016.

7. Pereira D.S., Pinto J.O.P. Genetic algorithm based system identification and PID tuning for optimum adaptive control // Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. 2005. P. 801–806. doi: 10.1109/AIM.2005.1511081

8. Савочкин В.А., Дмитриев А.А. Статистическая динамика транспортных и тяговых гусеничных машин. М.: Машиностроение, 1993.

## REFERENCES

1. Uspensky IA, Yukhin IA, Zhukov KA, et al. *Prospects for the development of transport equipment for on-farm transportation of fruits and vegetables in the agro-industrial complex*. Ryazan: FGBOU VPO RGATU; 2015. (in Russ.)
2. Anilovich VYa, Vodolazhnicenko YuT. *Design and calculation of agricultural tractors: a reference guide*. 2nd ed., revised and additional. Moscow: Mashinostroenie; 1976. (in Russ.)
3. Gamayunov AM. Analysis of control and perturbing actions in the system of a tractor-transport unit. *Tractors and agricultural machinery*. 2007;5:56. (in Russ.)
4. Vysochkina LI, Danilov MV, Maliev VKh, et al. Operation of the machine and tractor fleet. textbook. Stavropol: Byuro novostey; 2013. (in Russ.)

5. Zhileikin M.M. Study of self-oscillatory processes in the zone of interaction of an elastic tire with a solid support base. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie*. 2021;10:3–15. doi: 10.18698/0536-1044-2021-10-3-15. (in Russ.)

6. Zhileikin MM. Theoretical Foundations for Increasing Stability and Controllability of Wheeled Vehicles Based on Fuzzy Logic Methods. Moscow: MGTU im NE Bauman; 2016. (in Russ.)

7. Pereira DS, Pinto JOP. Genetic algorithm based system identification and PID tuning for optimum adaptive control. In: *Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. 2005:801-806. doi: 10.1109/AIM.2005.1511081

8. Savochkin VA, Dmitriev AA. *Statistical dynamics of transport and traction tracked vehicles*. Moscow: Mashinostroenie; 1993. (in Russ.)

## ОБ АВТОРАХ

**\* Жилейкин Михаил Михайлович,**

д-р техн. наук,  
руководитель группы инженерных расчетов;  
адрес: Российская Федерация, 121205, Москва,  
Инновационный центр Сколково, Большой б-р, д. 62;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8851-959X>;  
eLibrary SPIN: 6561-3300;  
e-mail: [jileykin\\_m@mail.ru](mailto:jileykin_m@mail.ru)

**Сиротин Павел Владимирович,**

доцент, канд. техн. наук,  
заведующий кафедрой «Автомобили  
и транспортно-технологические комплексы»;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7066-5062>;  
eLibrary SPIN: 2801-3166;  
e-mail: [spv\\_61@mail.ru](mailto:spv_61@mail.ru)

**Носиков Сергей Сергеевич,**

ассистент кафедры «Автомобили  
и транспортно-технологические комплексы»;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9011-5017>;  
eLibrary SPIN: 5155-8609;  
e-mail: [nosikov1997@mail.ru](mailto:nosikov1997@mail.ru)

\* Автор, ответственный за переписку

## AUTHORS' INFO

**\* Mikhail M. Zhileykin,**

Dr. Sci. (Tech.),  
Head of the Engineering Calculations Group;  
address: 62 Bolshoy Blvd, Skolkovo Innovation Center,  
121205 Moscow, Russian Federation;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8851-959X>;  
eLibrary SPIN: 6561-3300;  
e-mail: [jileykin\\_m@mail.ru](mailto:jileykin_m@mail.ru)

**Pavel V. Sirotnin,**

Associate Professor, Cand. Sci. (Tech.),  
Head of the Automobiles and Transport and Technological  
Facilities Department;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7066-5062>;  
eLibrary SPIN: 2801-3166;  
e-mail: [spv\\_61@mail.ru](mailto:spv_61@mail.ru)

**Sergey S. Nosikov,**

Assistant of the Automobiles and Transport and Technological  
Facilities Department;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9011-5017>;  
eLibrary SPIN: 5155-8609;  
e-mail: [nosikov1997@mail.ru](mailto:nosikov1997@mail.ru)

\* Corresponding author