

# Транспортное и энергетическое машиностроение

УДК 629.33

DOI 10.18698/0536-1044-2017-6-43-50

## Алгоритм работы автоматизированной системы управления движением трактора на склоне путем коррекции углов поворота управляемых колес

М.М. Жилейкин<sup>1</sup>, Е.В. Ягубова<sup>2</sup><sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1<sup>2</sup> ЗАО «РЕНО Россия», 109316, Москва, Российская Федерация, Волгоградский пр., д. 42, корп. 36

## The Algorithm of the Automated Control System of Movement of a Tractor on a Slope due to the Correction of the Rotation Angles of the Steered Wheels

М.М. Zhileykin<sup>1</sup>, E.V. Yagubova<sup>2</sup><sup>1</sup> BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1<sup>2</sup> ZAO Renault Russia, 109316, Moscow, Russian Federation, Volgogradskiy Ave., Bldg. 42, Block 36

e-mail: jileykin\_m@mail.ru, yagubova.evg@yandex.ru



Автоматизированная система управления движением колесного трактора (автопилот) не заменяет механизатора, но благодаря движению по самому рациональному курсу позволяет снизить его утомляемость, повысить эффективность технологических процессов и производительность выполняемых работ, а также уменьшить расход топлива, семян и удобрений. Автоматизированная система управления движением трактора на склоне должна не только определять его отклонение от заданной траектории, но и корректировать направление его перемещения. Предложен алгоритм управления движением трактора на склоне путем коррекции углов поворота управляемых колес. Проведено обоснование состава информационного поля, обеспечивающего работу автоматизированной системы управления движением колесного трактора. Методами имитационного моделирования доказана работоспособность и эффективность предложенного алгоритма. Выполнен анализ результатов моделирования.

**Ключевые слова:** алгоритм управления, автопилот, коррекция углов поворота, подруливание, движение трактора на склоне.



The automated control system of a wheeled tractor (autopilot) does not replace the operator, but makes it possible to reduce the operator's fatigue, increase the efficiency of the performed technological processes and the productivity of work, and reduce the consumption of fuel, seeds and fertilizers due to the movement along the most rational course. The automated control system of movement of a tractor on a slope must not only detect a deviation from a predetermined path but also adjust the direction of the movement. The authors propose an algorithm for controlling the movement of a tractor on a slope by correcting the rotation angles of the steered wheels, and substantiate the content of the

information field that provides the automated movement control of the wheeled tractor. The efficiency and effectiveness of the proposed algorithm is demonstrated through simulation. An analysis of the obtained simulation results is performed.

**Keywords:** control algorithm, autopilot, correction of rotation angles, steering, tractor movement on a slope.

В настоящее время исследования по повышению устойчивости движения колесных транспортных средств проводят по двум основным направлениям. Первое из них — разработка автоматизированных систем управления движением колесной машины, в основе которого лежит принцип изменения крутящих моментов, подводимых к ее ведущим колесам. В случае распределения силы тяги по всем колесам можно использовать весь вес автомобиля в качестве сцепного, что улучшает его динамику и проходимость, а также позволяет реализовать алгоритмы управления, повышающие его управляемость и курсовую устойчивость. Подробно эти методы описаны в работах [1–3].

Второе направление исследований — обеспечение устойчивости движения транспортного средства путем автоматического корректирующего изменения угла поворота управляемых колес (УК) [4–9]. В публикациях [10, 11] рассмотрены комбинации перечисленных выше способов управления.

Цель работы — разработка алгоритма работы автоматизированной системы управления движением колесного трактора (КТ), основанного на корректирующем изменении углов поворота его УК (подруливания) и гарантирующей устойчивость перемещения КТ на склоне.

**Обоснование состава информационного поля, обеспечивающего работу автоматизированной системы управления движением КТ.** Чтобы определить координаты местоположения КТ на поле в текущий момент времени, необходимо отслеживать изменение его положения

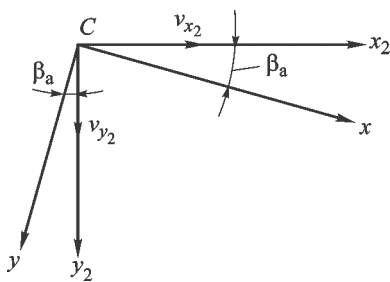


Рис. 1. Подвижная и неподвижная системы координат

относительно некоторой базовой системы отсчета, положение которой в пространстве известно в любой момент времени. Для этого по краям обрабатываемого поля размещают две так называемые базовые станции, координаты установки которых заранее определены и с течением времени не меняются. Тогда изменение положения КТ на поле можно оценивать относительно линии между этими базовыми станциями. Эта линия, называемая визирной, — идеальная прямая, параллельно которой КТ будет прокладывать борозды на поле.

Введем неподвижную  $Sx_2y_2$  и подвижную  $Sxy$  системы координат, связанные соответственно с опорной поверхностью и корпусом КТ (рис. 1), где точка  $C$  — центр масс (ЦМ).

С помощью датчиков, установленных на борту КТ в точках 1, 2 и  $C$  (рис. 2), а также специального оборудования базовых станций определяются параметры  $r_1, r_2$  и угол  $\beta_a$  между продольной осью КТ и визирной линией. Учитывается также уставка расстояния от ЦМ трактора до визирной линии.

Согласно схеме, приведенной на рис. 2

$$y_1^2 = r_{11}^2 - x_1^2;$$

$$y_1^2 = r_{21}^2 - (l - x_1)^2;$$

$$x_1 = \frac{r_{11}^2 - r_{21}^2 + l^2}{2l}.$$

Отсюда

$$y_1^2 = r_{11}^2 - \left( \frac{r_{11}^2 - r_{21}^2 + l^2}{2l} \right)^2.$$

Тогда

$$\beta_a = \arctg \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2}.$$

Запишем соотношения для координат точек установки датчиков на корпусе КТ в неподвижной системе координат:

$$x_1 = \frac{r_{11}^2 - r_{21}^2 + l^2}{2l};$$

$$x_2 = \frac{r_{12}^2 - r_{22}^2 + l^2}{2l};$$

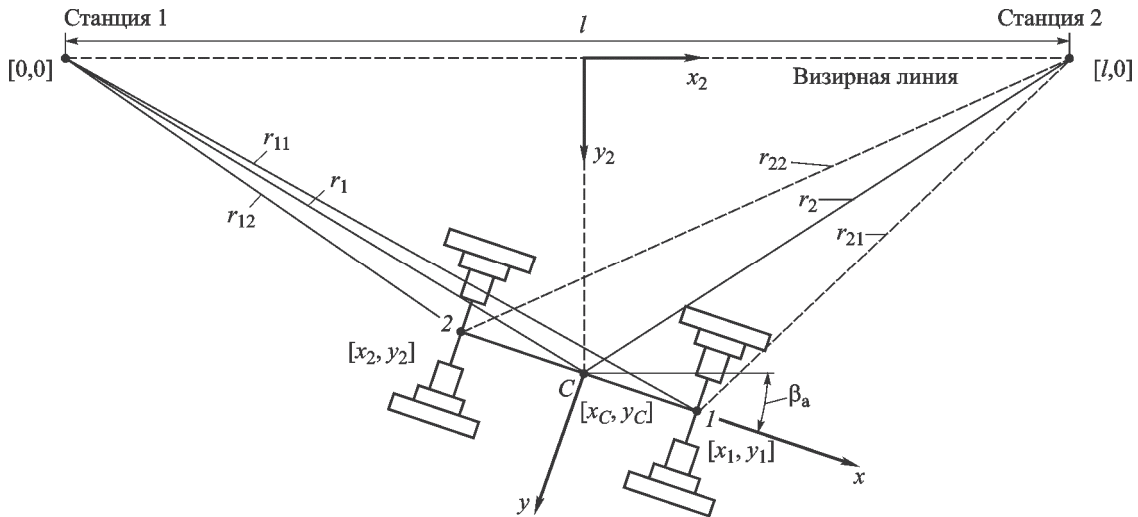


Рис. 2. Расчетная схема для определения угла  $\beta_a$  с помощью базовых станций

$$y_1^2 = r_{11}^2 - \left( \frac{r_{11}^2 - r_{21}^2 + l^2}{2l} \right)^2;$$

$$y_2^2 = r_{12}^2 - \left( \frac{r_{12}^2 - r_{22}^2 + l^2}{2l} \right)^2.$$

Тогда окончательное выражение для определения угла приобретает вид

$$\beta_a = \arctg \left( \frac{\sqrt{2l^2 r_{11}^2 - (r_{11}^2 - r_{12}^2 + l^2)^2} - \sqrt{2l^2 r_{12}^2 - (r_{12}^2 - r_{22}^2 + l^2)^2}}{r_{11}^2 - r_{21}^2 - r_{12}^2 + r_{22}^2} \right).$$

Датчик, установленный в ЦМ трактора, имеет следующие координаты в неподвижной системе координат:

$$x_C = \frac{r_1^2 - r_2^2 + l^2}{2l}, \quad y_C^2 = r_1^2 - x_C^2.$$

Тогда

$$y_C = \sqrt{r_1^2 - \left( \frac{r_1^2 - r_2^2 + l^2}{2l} \right)^2}.$$

Автоматизированная система управления осуществляет коррекцию движения КТ путем изменения углов поворота его УК.

**Алгоритм управления подруливанием УК трактора.** Параметром, определяющим качество вспашки, является нахождение борозды в коридоре  $\pm 0,15$  м от средней линии (гребня борозды) [12, 13]. Следовательно, система управ-

ления движением КТ должна обеспечить нахождение его ЦМ в указанном коридоре.

Задача управления движением КТ на склоне состоит из двух частей (рис. 3):

- минимизации бокового отклонения  $\Delta y$  ЦМ трактора от уставки  $y_2$ ;
- поддержания некоторого курсового угла  $\beta_a$ , обеспечивающего прямолинейное движение КТ.

При проходе борозды система управления пересчитывает уставку  $y_2$ .

В качестве управляющего воздействия, обеспечивающего поддержание заданной траектории, примем средние углы поворота УК:

- для передней оси

$$\Theta_{1cp} = \frac{\Theta_1 + \Theta_3}{2};$$

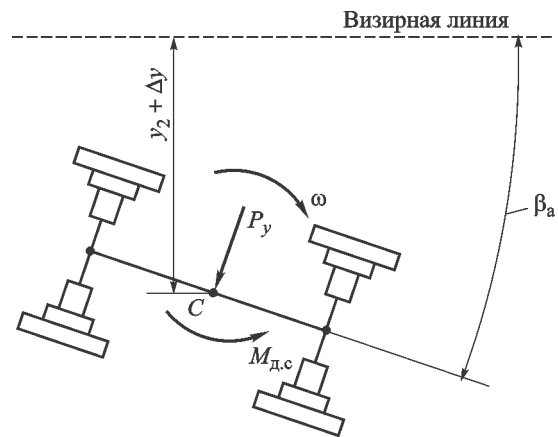


Рис. 3. Расчетная схема движения трактора на склоне:

$M_{д.с}$  — динамический стабилизирующий момент;  $P_y$  — внешняя боковая сила;  $\omega$  — угловая скорость поворота корпуса трактора

- для задней оси

$$\Theta_{2cp} = \frac{\Theta_2 + \Theta_4}{2}.$$

Будем искать управляющее воздействие в виде пропорционально-дифференциального регулятора, который является оптимальным в случае минимизации квадратичного критерия качества [14]:

$$\sum_i (\Delta y_i^2) \rightarrow 0$$

Тогда получим:

- для передней оси

$$\Theta_{1cp} = C_1 \Delta y + C_2 \frac{d(\Delta y)}{dt};$$

- для задней оси

$$\Theta_{2cp} = - \left[ K_1 \Delta y + K_2 \frac{d(\Delta y)}{dt} \right],$$

где  $C_1, C_2, K_1, K_2$  — коэффициенты усиления регулятора.

Чтобы избежать автоколебаний в процессе корректировки углов поворота УК, введем так называемые зоны нечувствительности:

$$\frac{d|\Delta y|}{dt} > 0,01 \text{ м/с}; \quad (1)$$

$$|\Delta y| > 0,04 \text{ м}. \quad (2)$$

Условие (1) означает, что ЦМ КТ отдалется от заданной траектории со скоростью, большей, чем 0,01 м/с, а условие (2) — что ЦМ КТ находится за пределами зоны нечувствительности.

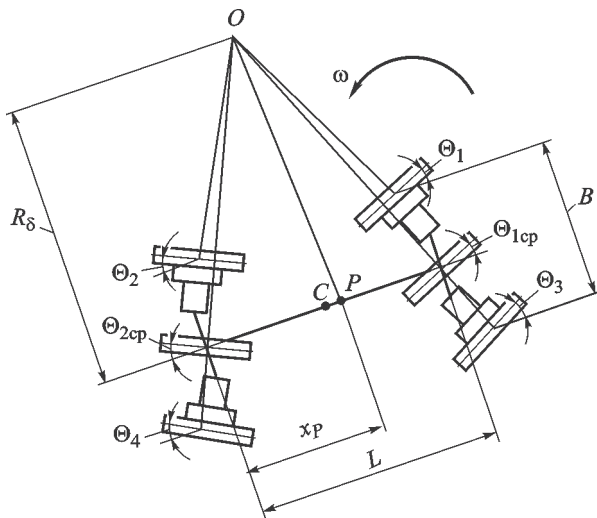


Рис. 4. Расчетная схема для определения углов поворота УК трактора

Для определения углов поворота УК левого и правого бортов для передней и задней осей КТ рассмотрим схему, приведенную на рис. 4.

Тогда углы поворота УК определяются по следующим зависимостям (рис. 4):

$$\operatorname{tg} \Theta_1 = \frac{L - x_P}{R_\delta - B/2}; \quad \operatorname{tg} \Theta_{1cp} = \frac{L - x_P}{R_\delta};$$

$$\operatorname{tg} \Theta_3 = \frac{L - x_P}{R_\delta + B/2}; \quad \operatorname{tg} \Theta_2 = \frac{x_P}{R_\delta - B/2};$$

$$\operatorname{tg} \Theta_{2cp} = \frac{x_P}{R_\delta}; \quad \operatorname{tg} \Theta_4 = \frac{x_P}{R_\delta + B/2},$$

где  $L$  — колесная база КТ;  $x_P$  — смещение полюса поворота (точка  $P$ );  $R_\delta$  — радиус поворота КТ;  $B$  — колея.

В общем случае возможны три способа подруливания: всеми УК, либо только УК передней или задней осей. Поэтому при определении углов поворота УК рассмотрим случай, когда управляемыми являются все колеса ( $x_P = L/2$ ), либо только колеса передней оси ( $x_P = 0$ ).

Окончательно получим:

- при подруливании всеми УК

$$\operatorname{tg} \Theta_1 = \frac{L \operatorname{tg} \Theta_{1cp}}{L - B \operatorname{tg} \Theta_{1cp}}; \quad \operatorname{tg} \Theta_3 = \frac{L \operatorname{tg} \Theta_{1cp}}{L + B \operatorname{tg} \Theta_{1cp}};$$

$$\operatorname{tg} \Theta_2 = \frac{L \operatorname{tg} \Theta_{2cp}}{L - B \operatorname{tg} \Theta_{2cp}}; \quad \operatorname{tg} \Theta_4 = \frac{L \operatorname{tg} \Theta_{2cp}}{L + B \operatorname{tg} \Theta_{2cp}};$$

- при подруливании передними УК

$$\operatorname{tg} \Theta_1 = \frac{2L \operatorname{tg} \Theta_{1cp}}{2L - B \operatorname{tg} \Theta_{1cp}}; \quad \operatorname{tg} \Theta_3 = \frac{2L \operatorname{tg} \Theta_{1cp}}{2L + B \operatorname{tg} \Theta_{1cp}}.$$

**Результаты и их обсуждение.** Проверка эффективности алгоритмов работы системы управления движением КТ выполнена методами имитационного математического моделирования. Ниже представлены основные параметры КТ, необходимые для расчета, где  $n$  — частота вращения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания.

#### Техническая характеристика двухосного КТ

Расстояние, м:

от первой до оси ЦМ ..... 0,75

от второй оси до ЦМ ..... 1,95

Колесная база, м ..... 2,7

Колея, м ..... 1,8

Момент инерции относительно оси,

проходящей через центр тяжести, кг·м<sup>2</sup> ..... 14 573

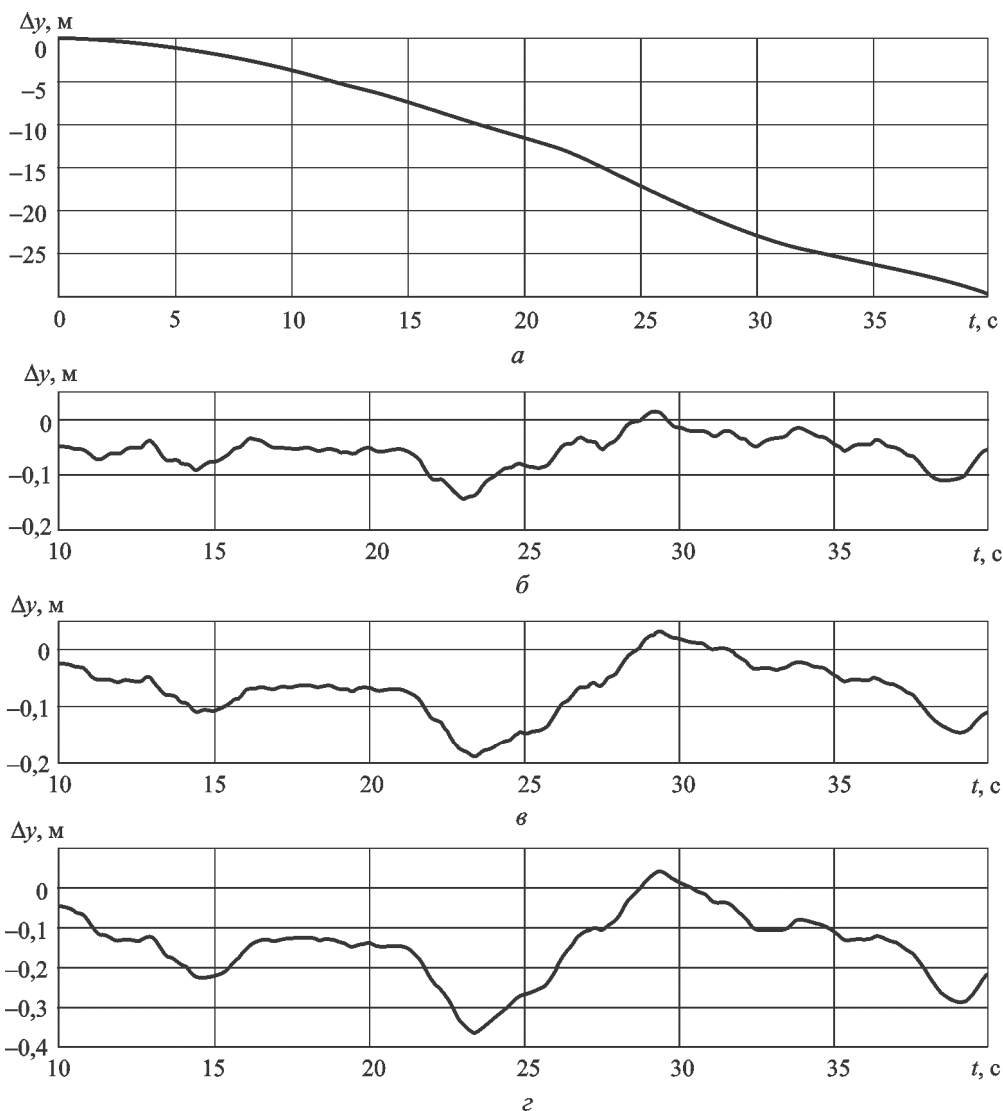


Рис. 5. Изменение во времени  $t$  отклонения  $\Delta y$  трактора от требуемой траектории движения без подруливания (а) и при подруливании всеми (б), передними (в) и задними (г) УК

Максимальная мощность двигателя	
при $n = 1850 \text{ мин}^{-1}$ , кВт:	
в транспортном режиме .....	110
в тяговом режиме .....	88
Максимальный крутящий момент двигателя	
при $n = 1300 \text{ мин}^{-1}$ , Н·м:	
в транспортном режиме .....	710
в тяговом режиме .....	726
Вес (при эксплуатационной массе), Н .....	63 500

Исследуем эффективность следующих алгоритмов системы управления движением КТ:

- 1) подруливание всеми УК;
- 2) подруливание передними УК;
- 3) подруливание задними УК.

Для сравнения их эффективности в качестве базового приемем режим без управления (без подруливания).

На рис. 5 приведены отклонения траектории движения КТ с учетом требуемого коридора движения  $\pm 0,15 \text{ м}$  при работе в режиме вспашки на склоне  $10^\circ$ . Видно, что выход КТ из коридора движения происходит в значительной степени при подруливании задними УК.

На рис. 6 представлены зависимости углов подруливания от времени для различных вариантов управления.

Графики зависимостей (см. рис. 6) показывают, что углы подруливания УК не превышают  $\pm 2^\circ$ , автоколебаний в системе не наблюдается.

Отклонения по координате КТ с учетом требуемого коридора движения, показанные на рис. 5, позволяют оценить разработанные алгоритмы с точки зрения выдерживания требований к качеству вспашки. По этому показателю

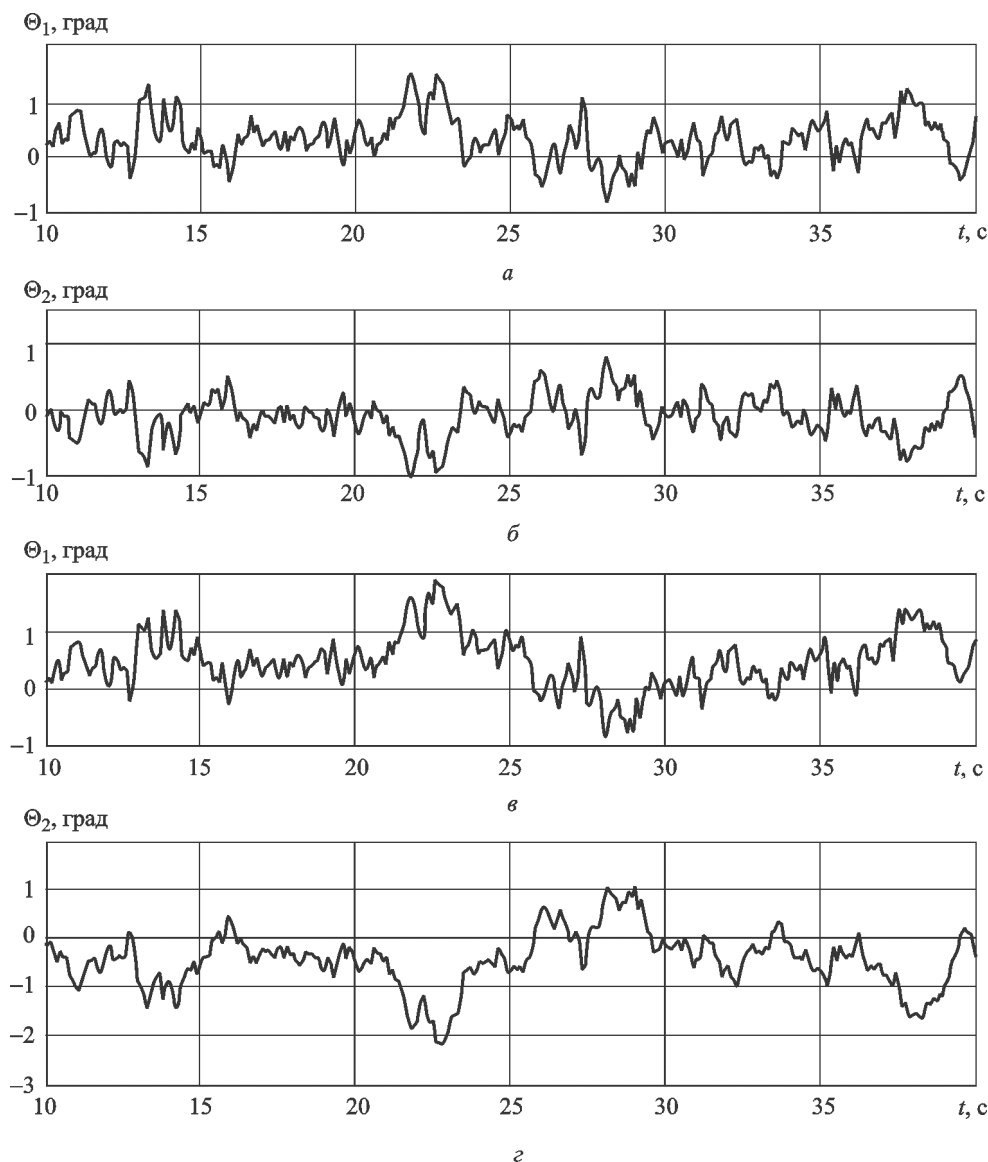


Рис. 6. Зависимости углов подруливания передними  $\Theta_1$  и задними  $\Theta_2$  УК от времени  $t$  для различных вариантов управления:  
*а* и *б* — подруливание передними и задними УК при работе первого алгоритма;  
*в* и *г* — подруливание передними и задними УК

также наилучшим является подруливание всеми УК. В случае подруливания передними или задними УК наблюдается отклонение КТ от требуемой траектории движения.

## Выводы

1. Разработан алгоритм работы автоматизированной системы управления движением КТ, основанный на корректирующем измене-

нии углов поворота его УК (подруливания). Алгоритм является составной частью метода обеспечения устойчивости КТ и гарантирует устойчивость его движения при работе на склоне.

2. Полученные результаты показывают, что подруливание является эффективным способом удержания КТ на требуемой траектории движения. При этом лучшей эффективностью обладает алгоритм подруливания всеми УК.

## Литература

- [1] Рязанцев В.И. *Активное управление сходимением колес автомобиля*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 212 с.
- [2] Karogal I., Ayalew B. Independent Torque Distribution Strategies for Vehicle Stability Control. *SAE Technical Papers*, 2009, doi: 10.4271/2009-01-0456.
- [3] Osborn R., Shim T., Independent Control of All-Wheel-Drive Torque Distribution. *SAE Technical Paper*, 2004-01-2052, 2004, doi: 10.4271/2004-01-2052.
- [4] Mammar S., Baghdassarian V.B. Two-degree-of-freedom formulation of vehicle handling improvement by active steering. *Proceedings of the American Control Conference*, 2000, vol. 1, pp. 105–109.
- [5] Yoshimoto K., Tanaka H., Kawakami S. Proposal of driver assistance system for recovering vehicle stability from unstable states by automatic steering. *Proceedings of the IEEE International Vehicle Electronics Conference*, Changchun, China, September 6–9, 1999, pp. 514–519.
- [6] Шеломков С.А., Купреянов А.А. *Способ управления многоприводной электрической трансмиссией многоосной колесной машины*. Пат. 2426660 РФ, МПК В 60 L 15/20, Н 02 Р 5/46, 2011, бюл. № 23. 5 с.
- [7] Плиев И.А., Сайкин А.М., Коршунов Г.В., Архипов А.В. Алгоритмы управления мощностями, подводимыми к колесам полноприводных автомобилей. *Журнал автомобильных инженеров*, 2012, № 3(74), с. 16–18.
- [8] Маляревич В.Э., Эйдман А.А., Прочко В.И. Повышение эксплуатационных свойств полноприводных автомобилей за счет индивидуального силового привода колес. *Журнал автомобильных инженеров*, 2005, № 5(34), с. 30–33.
- [9] Ягубова Е.В. Разработка комплексного закона распределения мощности по ведущим колесам универсально-пропашного трактора. *Будущее машиностроения России. Сб. тр. 7-й Всерос. конф. молодых ученых и специалистов*, Москва, 2014, с. 1–7.
- [10] Langson W., Alleyne A. Multivariable bilinear vehicle control using steering and individual wheel torques. *Proceedings of the American Control Conference*, 1997, vol. 2, pp. 1136–1140.
- [11] Mokhiamar O., Abe M. Active wheel steering and yaw moment control combination to maximize stability as well as vehicle responsiveness during quick lane change for active vehicle handling safety. *Journal of Automobile Engineering*, 2002, vol. 216(2), pp. 115–124.
- [12] Казаков А.В., Логинов В.Ю., Гутовский Д.В., Кузьмичев А.Н. *Технология проведения вспашки* [Электронный ресурс]. Н. Новгород, Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия, 2013. URL: <http://ebs.rgazu.ru/db/Pravoobladataeli/NGSHA/13/book.pdf> (дата обращения 15 марта 2017).
- [13] Гельфенбейн С.П., Волчанов В.Л. *Электроника и автоматика в мобильных сельхозмашинах*. Москва, Агропромиздат, 1986. 264 с.
- [14] Иванов В.А., Медведев В.С. *Математические основы теории оптимального и логического управления*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 599 с.

## References

- [1] Riazantsev V.I. *Aktivnoe upravlenie skhozhdeniem koles avtomobilia* [Active control of the wheel alignment of the vehicle]. Moscow, Bauman Press, 2007. 212 p.
- [2] Karogal I., Ayalew B. Independent Torque Distribution Strategies for Vehicle Stability Control. *SAE Technical Papers*, 2009, doi: 10.4271/2009-01-0456.
- [3] Osborn R., Shim T., Independent Control of All-Wheel-Drive Torque Distribution. *SAE Technical Paper*, 2004-01-2052, 2004, doi: 10.4271/2004-01-2052.
- [4] Mammar S., Baghdassarian V.B. Two-degree-of-freedom formulation of vehicle handling improvement by active steering. *Proceedings of the American Control Conference*, 2000, vol. 1, pp. 105–109.
- [5] Yoshimoto K., Tanaka H., Kawakami S. Proposal of driver assistance system for recovering vehicle stability from unstable states by automatic steering. *Proceedings of the IEEE International Vehicle Electronics Conference*, Changchun, China, September 6–9, 1999, pp. 514–519.
- [6] Shelomkov S.A., Kupreianov A.A. *Sposob upravlenii mnogoprivodnoi elektricheskoi transmissiei mnogoosnoi kolesnoimashiny* [Multi-drive control method of the electrical transmissi-

- sionmulti-wheeled vehicles]. Patent RF no. 2426660, МПК В 60 L 15/20, H 02 P 5/46. 2011. 5 p.
- [7] Pliev I.A., Saikin A.M., Korshunov G.V., Arkhipov A.V. Algoritmy upravleniia moshchnostiami, podvodimymi k kolesam polnoprivodnykh avtomobilei [The control algorithms for capacity supplied to the wheels of AWD vehicles]. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov* [Zurnal AAI]. 2012, no. 3(74), pp. 16–18.
- [8] Maliarevich V.E., Eidman A.A., Prochko V.I. Povyshenie ekspluatatsionnykh svoystv polnoprivodnykh avtomobilei za schet individual'nogo silovogo privoda koles [Increase of operational properties of AWD cars due to the individual power drive wheels]. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov* [Zurnal AAI]. 2005, no. 5(34), pp. 30–33.
- [9] Iagubova E.V. Razrabotka kompleksnogo zakona raspredeleniia moshchnosti po vedushchim kolesam universal'no-propashnogo traktora [Development of a comprehensive law of the distribution of power at the drive wheels, universal tractors]. *Sbornik trudov 7-i Vserossiiskoi konferentsii molodykh uchennykh i spetsialistov «Budushchee mashinostroeniia Rossii»* [Proceedings of the 7<sup>th</sup> All-Russian conference of young scientists and specialists «The Future engineering of Russia»]. Moscow, 2014, pp. 1–7.
- [10] Langson W., Alleyne A. Multivariable bilinear vehicle control using steering and individual wheel torques. *Proceedings of the American Control Conference*, 1997, vol. 2, pp. 1136–1140.
- [11] Mokhiamar O., Abe M. Active wheel steering and yaw moment control combination to maximize stability as well as vehicle responsiveness during quick lane change for active vehicle handling safety. *Journal of Automobile Engineering*, 2002, vol. 216(2), pp. 115–124.
- [12] Kazakov A.V., Loginov V.Iu., Gutovskii D.V., Kuz'michev A.N. *Tekhnologiya provedeniia vspashki* [The technology for plowing]. N. Novgorod, Nizhegorodskaiia gosudarstvennaia sel'skokhoziaistvennaia akademiia publ., 2013. Available at: <http://ebs.rgazu.ru/db/Pravoobladateli/NGSHA/13/book.pdf> (accessed 15 March 2017).
- [13] Gel'fenbein S.P., Volchanov V.L. *Elektronika i avtomatika v mobil'nykh sel'khoz mashinakh* [Electronics and automation of mobile machinery]. Moscow, Agropromizdat publ., 1986. 264 p.
- [14] Ivanov V.A., Medvedev V.S. *Matematicheskie osnovy teorii optimal'nogo i logicheskogo upravleniia* [Mathematical foundations of the theory of optimal and logical control]. Moscow, Bauman Press, 2011. 599 p.

Статья поступила в редакцию 20.03.2017

## Информация об авторах

**ЖИЛЕЙКИН Михаил Михайлович** (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Колесные машины». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: [jileykin\\_m@mail.ru](mailto:jileykin_m@mail.ru)).

**ЯГУБОВА Евгения Вячеславовна** (Москва) — кандидат технических наук, инженер по локальной интеграции. ЗАО «РЕНО Россия» (109316, Москва, Российская Федерация, Волгоградский пр., д. 42 корп. 36, e-mail: [yagubova.evg@yandex.ru](mailto:yagubova.evg@yandex.ru)).

## Information about the authors

**ZHILEYKIN Mikhail Mikhailovich** (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Wheeled Vehicles Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [jileykin\\_m@mail.ru](mailto:jileykin_m@mail.ru)).

**YAGUBOVA Evgeniya Vyacheslavovna** (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Local Integration Engineer. ZAO Renault Russia (109316, Moscow, Russian Federation, Volgogradskiy Ave., Bldg. 42, Block 36, e-mail: [yagubova.evg@yandex.ru](mailto:yagubova.evg@yandex.ru)).