

УДК 621.878

АНАЛИЗ СПОСОБОВ СТАБИЛИЗАЦИИ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ АВТОГРЕЙДЕРА ПРИ АССИМЕТРИЧНОМ ПРИЛОЖЕНИИ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ НА ОСНОВНОЙ ОТВАЛ

К.т.н. В. А. Шевченко, А. М. Чаплыгина, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

На основе разработанной математической модели движения автогрейdera выполнен анализ воздействия неявных факторов, которые оказывают наибольшее дестабилизирующее влияние на показатели курсовой устойчивости, а также факторы, оказывающие стабилизирующее воздействие. Аналитические исследования позволили разработать практические рекомендации по обеспечению таких параметров курсовой устойчивости, которые позволят удерживать машину на заданной траектории движения.

На основі розробленої математичної моделі руху автогрейдерa виконано аналіз впливу неявних факторів, які мають найбільший дестабілізуючий вплив на показники курсової стійкості, а також фактори, які мають стабілізуючий вплив. Аналітичні дослідження дозволили розробити практичні рекомендації щодо забезпечення таких параметрів курсової стійкості, які дозволять утримати машину на заданій траєкторії руху.

Based on the analysis of the mathematical model of the motor grader movement in the process of implementation of working operations, the factors that have the greatest influence on formation of the machine's motion path are identified. It is proved that some of the factors characterizing the parameters of the machine and technological process have a destabilizing impact on the formation of the grader motion path, while the rest of them have a stabilizing impact. The analytical research enables developing practical recommendations to ensure the movement of the machine along a predetermined path without deviations.

Ключевые слова: курсовая устойчивость, процесс движения, автогрейдер, математическая модель

Введение

Для автогрейдеров характерным является выполнение рабочих операций, в процессе которых основной отвал устанавливается с углом захвата, отличным от 90° , и с перекосом в вертикальной плоскости. Резание обрабатываемой среды при этом выполняется стружкой треугольной формы при одновременном смещении материала в сторону. Ключевой особенностью подобных рабочих операций является смещение координаты приложения главного вектора сопротивлений на отвале, что приводит к асимметричному нагружению машины [1]. Силовое воздействие подобного типа может привести к самопроизвольному уходу машины с предварительно назначенной траектории движения, что, в конечном итоге, ведет к ухудшению показателей качества выполняемых рабочих операций, падению производительности машины и т.д.

Анализ последних исследований и публикаций

Ассиметричное приложение внешних нагрузок на рабочий орган, действие боковых усилий на рабочее и ходовое оборудование могут привести к уходу машины с планируемой траектории движения, трактуемой как потеря курсовой устойчивости.

Чаще всего подобные процессы фиксируются для транспортных средств, сельскохозяйственных и землеройных машин. Анализ публикаций показывает, что для транспортных машин в качестве основных причин ухода с заданной траектории рассматриваются движение на повороте и движение по опорной поверхности, имеющей поперечный уклон. Для сельскохозяйственных и землеройных машин в качестве типовых причин потери курсовой устойчивости рассматриваются выполнение технологических операций на поверхностях с боковым уклоном и действие на рабочие органы боковых сопротивлений со стороны обрабатываемой среды.

Анализ патентной информации позволяет утверждать, что технические решения по обеспечению стабильности траектории движения машин сводятся к реализации следующих методов:

- изменение положения центра тяжести машины;
- регулирование угла поворота управляемых колес машины в зависимости от величины дестабилизирующих воздействий;
- установка на рабочем оборудовании механических направляющих систем, позволяющих компенсировать боковые усилия, действующие со стороны разрабатываемой среды.

Примерами систем, позволяющих изменить положение центра тяжести машины, являются технические решения, приведенные в [2,3]. На рис. 1 представлена конструкция автогрейdera, оборудованного дополнительным рабочим органом в виде рыхлителя, шарнирно соединенного с шасси 1; 4 – бульдозерный отвал

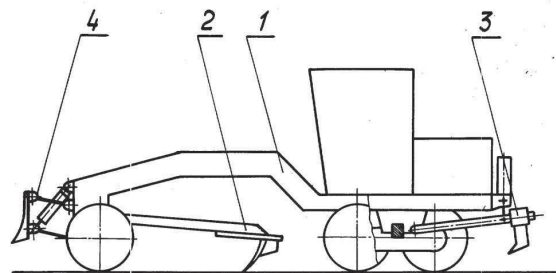


Рис. 1. Автогрейдер оборудованный подвижным противовесом
1 – самоходное шасси; 2 – грейдерный отвал; 3 – дополнительное рабочее оборудование в виде рыхлителя, шарнирно соединенного с шасси 1; 4 – бульдозерный отвал

Рыхлитель изготовлен таким образом, что может перемещаться по несущей раме в поперечном направлении относительно продольной оси машины. Рассогласование тяговых усилий позволяет получить в горизонтальной плоскости дополнительный крутящий момент, противодействующий дестабилизирующим моментам, вызванным усилиями на рабочем органе.

Аналогичным способом решаются проблема и для колесного трактора (рис. 2). Здесь идея изменения положения центра тяжести машины решается за счет использования двух подвижных грузов, установленных в передней и задней частях трактора. Такое техническое решение, на наш взгляд, является более эффективным поскольку грузы могут перемещаться независимо друг от друга, что позволяет существенно расширить область регулирования положения центра тяжести машины.

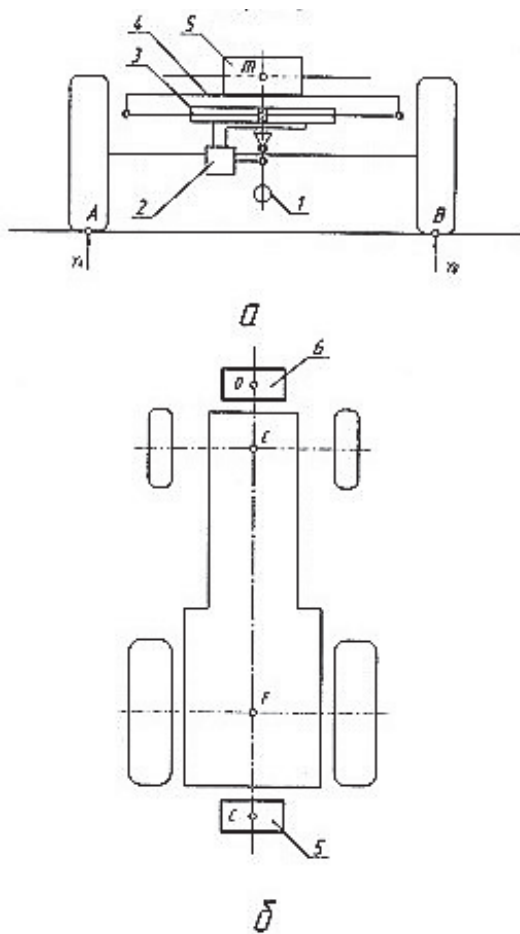


Рис. 2. Колесный трактор, оборудованный механизмом с подвижными грузами:
 а – задний мост транспортного средства (вид сзади), оборудованного дополнительными грузами;
 б – транспортное средство, оборудованное дополнительными грузами (вид сверху);
 1 – маятниковый датчик; 2 – гидрораспределитель; 3 – гидроцилиндр; 4 – рычаг; 5, 6 – груз;

Примером системы, регулирующей положение управляемых колес машины в зависимости от поперечного уклона опорной поверхности может служить передний управляемый мост автогрейдера рис. 3 [4]. Для стабилизации траектории движения машины

устанавливается следящая система, которая позволяет в зависимости от угла поперечного уклона поверхности изменять наклон управляемых колес в вертикальной плоскости.

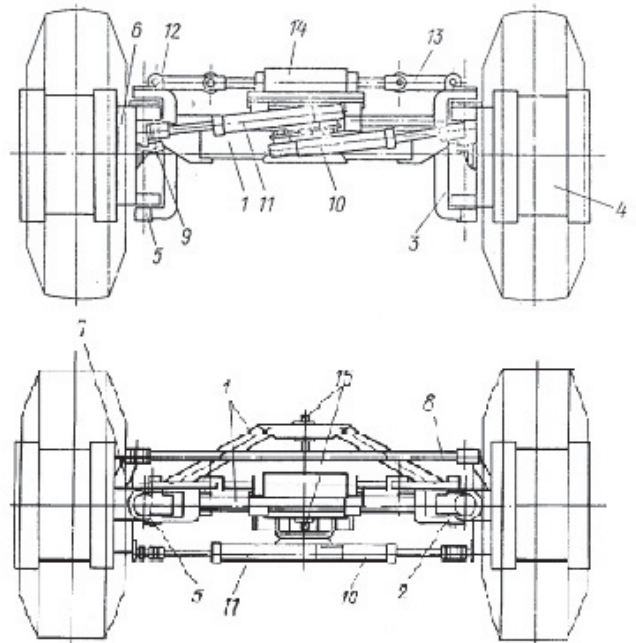


Рис. 3. Передний управляемый мост автогрейдера:
 1 – балка; 2 – шарниры; 3 – рычаги наклона колес; 4 – колеса; 5 – кронштейн; 6 – цапфа; 7 – поворотные рычаги; 8 – поперечная рулевая тяга трапеции; 9 – рычаги соединенные с гидроцилиндрами; 10, 11 – гидроцилиндры; 12 – шарнир; 13 – поперечная тяга; 14 – двухштоковый гидроцилиндр; 15 – шарнир

На машинах, оборудованных активным рабочим органом, многие авторы рекомендуют устанавливать системы, стабилизирующие направление движения, непосредственно на рабочем оборудовании (рис. 4) [5].

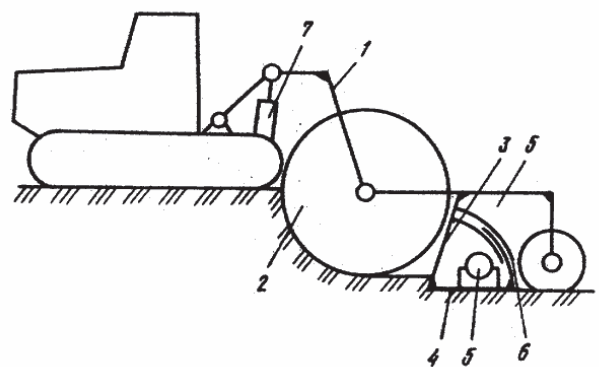


Рис. 4. Землеройно-транспортная машина с механизмом направления движения рабочего органа:
 1 – рама базовой машины; 2 – рабочий орган; 3 – зачистной нож; 4 – опорная лыжа; 5 – датчик направления движения; 6 – криволинейная телескопическая направляющая; 7 – гидроцилиндр

Чаще всего эти системы состоят из двух элементов: датчика направления движения и направляющего устройства. В данном конкретном устройстве в качестве последнего используется опорная лыжа. Нередко предлагается использовать направляющие устройства, формирующие дополнительные силы реакции разрабатываемой среды, прикладываемые к рабочему органу.

Актуальность

Повышение эффективности рабочих процессов автогрейдера за счет стабилизации траектории движения и снижения расхода топлива, что приводит к снижению стоимости производимой продукции.

Цель и задачи работы

Целью статьи является выявление в аналитическом виде взаимоотношений между факторами, которые стабилизируют и дестабилизируют параметры курсовой устойчивости автогрейдера.

В работе решаются следующие задачи:

- выполнить анализ научно-технических решений, посвященных способам стабилизации траектории движения;
- обосновать и разработать теоретическую модель процесса движения автогрейдера, учитывающую воздействие факторов, способствующих отклонению реальной траектории от планируемой;
- разработать рекомендации, позволяющие стабилизировать показатели курсовой устойчивости автогрейдера.

Решение поставленной задачи

Проведенные экспериментальные исследования позволили выявить особенности процесса потери курсовой устойчивости автогрейдера [6]. В частности, на начальном этапе работы, не смотря на асимметричное приложение внешних сопротивлений ΣW (рис.5), машина перемещается по прямолинейной траектории. Затем, по мере накопления материала перед отвалом, наступает момент, когда автогрейдер самопроизвольно разворачивается вокруг точки, соответствующей координате приложения главного вектора внешних сопротивлений (точка O), после чего машина опять продолжает прямолинейное движение. Реальная траектория движения машины состоит из линейных отрезков и зон самопроизвольного разворота в местах их стыковки.

При уходе к зоне самопроизвольного поворота действительная линейная скорость движения автогрейдера уменьшается практически до нуля, но за счет значительной мощности двигателя происходит явная пробуксовка ведущих колес. Эксперименты показывают, что теоретическая скорость движения машины, определяется угловой скоростью вращения коленчатого вала, снижается при этом не более чем на 4%. Такой эффект возможен в том случае, когда суммарные сопротивления перемещений машины $\Sigma W + W_f$ равны предельному тяговому усилию по условиям сцепления ведущих движителей с опорной поверхностью:

$$T_{\phi} = \Sigma W + W_f, \quad (1)$$

где W_f – сопротивление перекатыванию машины.

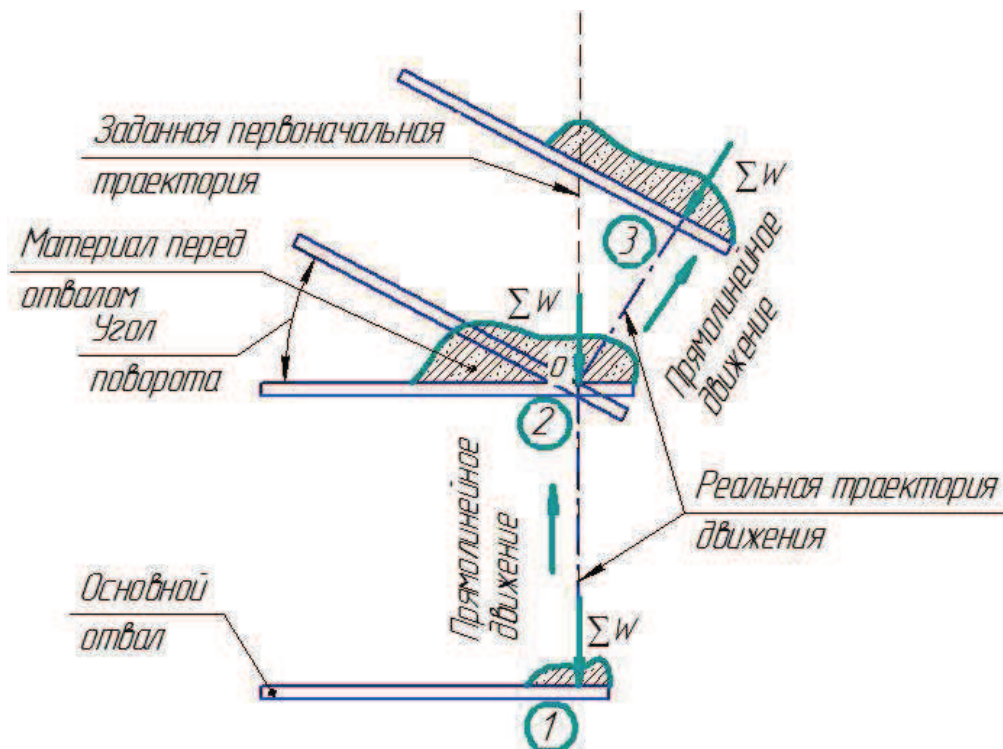


Рис. 5. Процесс формирования реальной траектории движения автогрейдера при асимметричном приложении сил внешнего сопротивления на отвале

Следует также отметить, что на этапе прямолинейного движения динамическая модель этого процесса описывается основным уравнением динамики типа

$$m\ddot{x} = \sum T - (\sum W + W_f);$$

где x – координата горизонтального смещения машины; $\sum T$ – суммарное тяговое усилие развиваемое машиной; m – масса автогрейдера.

Однако, в момент самопроизвольного разворота динамическая модель автогрейдера изменяется к виду (рис.6)

$$I\ddot{\alpha} = M(T) - M(\sum W, W_f, P_{\delta});$$

где $\ddot{\alpha}$ – координата углового перемещения машины; I – момент инерции машины относительно центра поворота; $M(T)$ – крутящий момент развиваемый тяговыми усилиями; $M(\sum W, W_f, P_{\delta})$ – крутящий момент развиваемый силами сопротивления.

Анализ особенностей приложения внешних усилий (рис. 6) позволил определить условия перехода от прямолинейного движения машины к его самопроизвольному развороту:

$$\begin{cases} T_2 + T_3 = \sum W + W_f \\ M(T) > M(\sum W, W_f, P_{\delta}). \end{cases} \quad (2)$$

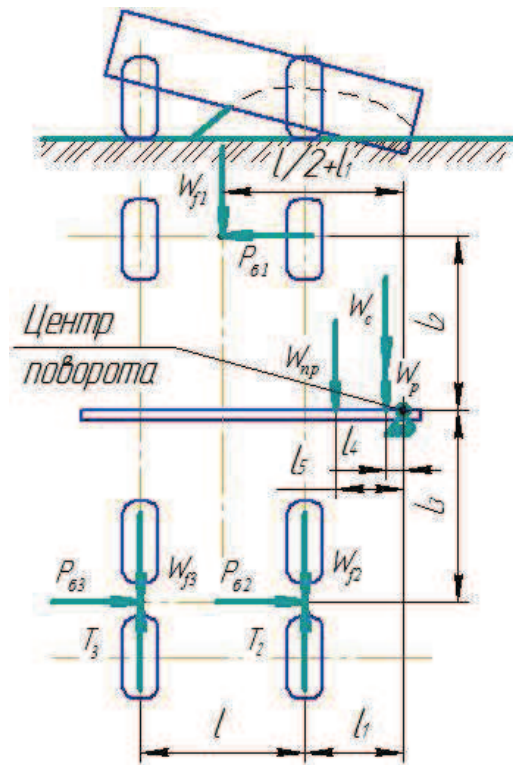


Рис. 6. Схема приложения сил к автогрейдеру в горизонтальной плоскости во время самопроизвольного поворота автогрейдера

На рисунке 6 $P_{\delta i}$ силы сопротивления боковому смещению колес; W_{np} – сопротивление перемещению призмы грунта перед отвалом; W_p – сопротивление грунта резанию; W_c – сопротивление перемещению стружки грунта вверх по отвалу. Главный вектор сопротивлений, действующих на отвал равен

$$\sum W = W_p + W_c + W_{np}$$

Центр поворота машины располагается в зоне заземления отвала в грунте. Крутящий момент, разворачивающий машину по часовой стрелке:

$$M(T) = T_2 \cdot l_1 + T_3 \cdot (l + l_1).$$

Момент сил сопротивления, препятствующий развороту,

$$M(\sum W, W_{fi}, P_{\delta i}) = W_{f1} \cdot (\frac{l}{2} + l_1) + W_{f2} \cdot l_1 + W_{f3} \cdot (l + l_1) + P_{\delta 1} \cdot l_2 + (P_{\delta 2} + P_{\delta 3}) \cdot l_3 + W_{np} \cdot l_5 + (W_p + W_c) \cdot l_4.$$

Тяговые усилия (T_i), силы сопротивления боковому смещению ($P_{\delta i}$) и силы сопротивления перекатыванию (W_{fi}) определяются известными зависимостями и зависят от величины опорных реакций на ходовом оборудовании [6].

Составляющие главного вектора сопротивлений также могут быть определены с помощью известных зависимостей [7,8].

$$W_p = k \cdot F;$$

$$W_{np} = V_{np} \cdot \frac{\delta_{cp}}{k_p} \cdot g \cdot \mu_1;$$

$$W_c = V_{np} \cdot \frac{\delta_{cp}}{k_p} \cdot g \cdot \mu_2 \cdot \cos^2 \delta.$$

В приведенных зависимостях k – удельное сопротивление разрабатываемого материала резанию; F – площадь срезаемой стружки; V_{np} – объем призмы перемещаемого материала; δ_{cp} – плотность материала в естественном состоянии; k_p – коэффициент разрыхления разрабатываемого материала; g – ускорение свободного падения; μ_1 – коэффициент внутреннего трения материала; μ_2 – коэффициент внешнего трения материала о сталь; δ – угол резания.

Разворот машины в соответствии с условием (2) будет продолжаться до момента, когда соотношение (1) приобретет вид

$$T_2 + T_3 > \sum W + W_f,$$

после чего опять продолжится движение автогрейдера по прямолинейной траектории.

Рассмотренная математическая модель позволяет объяснить характер движения автогрейдера в зависимости от силовой картины его нагружения. Вместе с этим, проведенные в ХНАДУ экспериментальные исследования на реальном автогрейдере ДЗк-251 в условиях испытательного полигона позволили выявить ряд дополнительных параметров, также оказывающих влияние на показатели курсовой устойчивости машины при выполнении технологических операций [9]. К числу таких параметров, в первую очередь, следует отнести угол поворота управляемых колес в горизонтальной плоскости (γ), угол наклона передних колес в вертикальной плоскости (ρ), угол поперечного уклона опорной поверхности (φ) и коэффициент сцепления ведущих движителей с опорной поверхностью ($\varphi_{сц}$).

На основе проведенного факторного эксперимента было получено уравнение регрессии, позволяющее определить боковое смещение автогрейдера H в зависимости от перечисленных факторов для одних и тех же условий внешнего нагружения:

$$H(\varphi, \varphi_{сц}, \gamma, \rho) = 2,6589 - 0,1538\varphi + 0,7015\varphi_{сц} - 0,80095\gamma + 0,1441\rho - 0,4219\varphi\varphi_{сц} + 0,0208\varphi\gamma - 0,0343\varphi\rho + 0,505\varphi_{сц}\gamma - 0,4967\varphi_{сц}\rho - 0,0343\gamma\rho + 0,035\varphi\varphi_{сц}\gamma + 0,0948\varphi\varphi_{сц}\rho + 0,0064\varphi\gamma\rho - 0,0033\varphi_{сц}\gamma\rho - 0,0124\varphi\varphi_{сц}\gamma\rho. \quad (3)$$

В процессе проведения экспериментов было выявлено, что часть параметров оказывают дестабилизирующее влияние на показатели курсовой устойчивости, а часть – наоборот, позволяют удерживать машину на запланированной траектории движения. В частности, поворот управляемых колес в сторону, противоположную самопроизвольному развороту автогрейдера и наклон этих же колес в ту же сторону способны устранить смещение автогрейдера в поперечном направлении даже при значительных крутящих моментах, действующих на машину в горизонтальной плоскости. К сожалению, на сегодняшний день отсутствуют рекомендации по выбору углов γ и ρ .

Однако зависимость (3) позволила определить соотношения между углами, позволяющими удерживать машину на прямолинейном курсе при известных условиях асимметричного нагружения автогрейдера.

На рисунке 7 и 8 приведены графики зависимости поперечного смещения автогрейдера от углов γ и ρ установки управляемых колес.

В таблицах приведены рациональные соотношения соответствующих углов, позволяющие удерживать машину на прямолинейной траектории движения для условий нагружения, реализованных в эксперименте.

Стабилизация траектории движения может быть достигнута благодаря тому, что уменьшая силу сопротивления (рис. 9) и вертикальную реакцию, действующих на отвал со стороны разрабатываемой среды, уменьшается величина дестабилизирующего момента в горизонтальной плоскости, выравнивается соотношение опорных реакций по бортам [10].

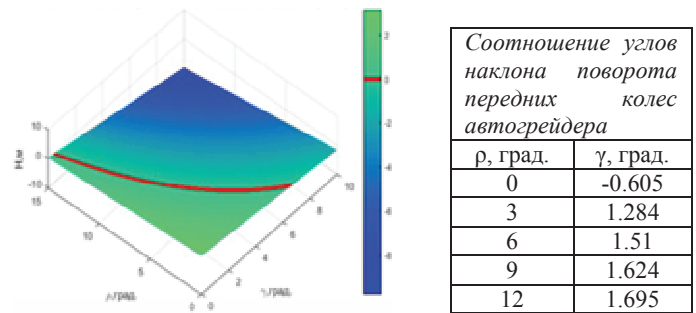


Рис. 7. Зависимость поперечного смещения автогрейдера от угла наклона в вертикальной плоскости (ρ) и угла поворота в горизонтальной плоскости (γ) передних колес

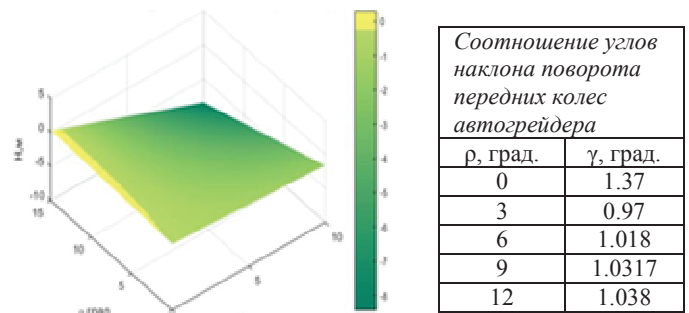


Рис. 8. Зависимость поперечного смещения автогрейдера от угла наклона в вертикальной плоскости (ρ) и угла поворота в горизонтальной плоскости (γ) передних колес. Технологические операции выполняются на площадке с поперечным уклоном $\varphi=8^\circ$

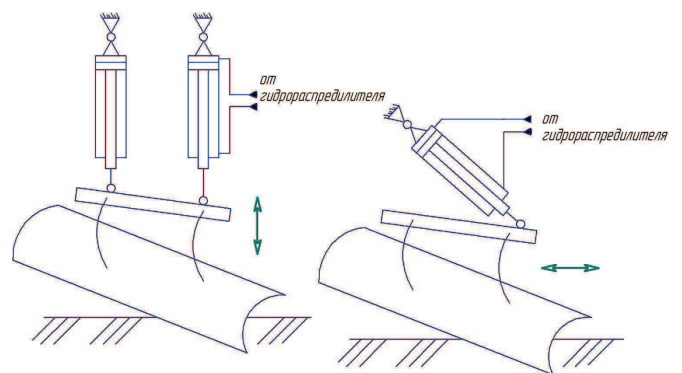


Рис. 9. Схема системы управления рабочим органом

Стабилизация траектории движения также может достигаться благодаря тому, что создавая дополнительное усилие при помощи наклона колес в вертикальной плоскости на угол α (рис.10), формируется противодействие дестабилизирующему моменту в горизонтальной плоскости, что позволяет удерживать машину на запланированной траектории [11].

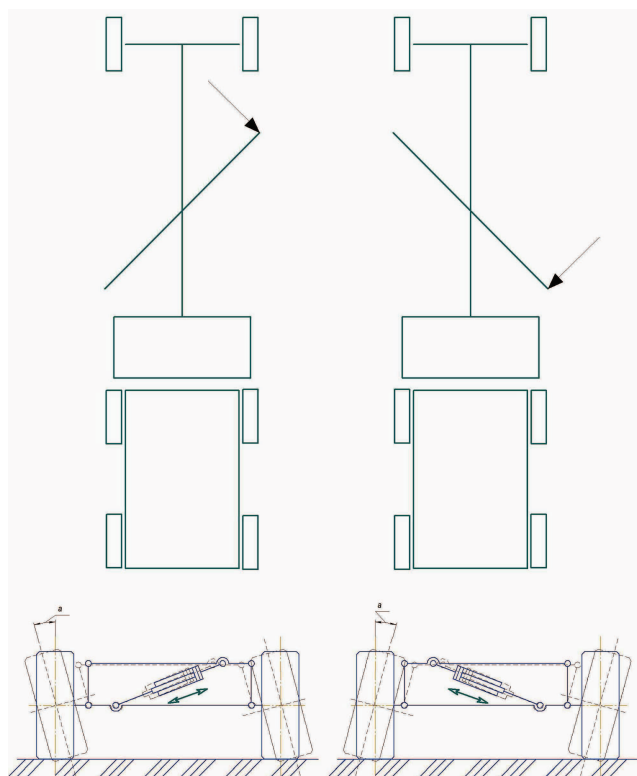


Рис. 10. Схема системы стабилизации ЗТМ при помощи наклона колес

Выводы

Проведенный анализ силового асимметричного нагружения автогрейдера в процессе выполнения технологических операций позволил определить граничные условия, изменяющие характер движения машины, и определяющие вид реальной траектории.

Экспериментальные исследования позволили выявить влияние дополнительных параметров на формирование показателей курсовой устойчивости. Предлагаемая методика делает возможным рассчитать значения таких параметров, как угол поворота передних колес в горизонтальной плоскости и угол их наклона в вертикальной плоскости, позволяющие даже при асимметричном приложении внешних нагрузок удерживать автогрейдер на прямолинейной траектории движения. Полученные данные могут стать основой для разработки автоматических систем, обеспечивающих стабильность траектории движения автогрейдера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Chaplygina O.M. Methods to determine measures providing a motor-grader road-holding ability / O.M.Chaplygina, V.O.Shevchenko, Zh.P. Beztsennaya // IX International conference for young researchers. Technical sciences. Industrial management. Proceedings. – Burgas, Bulgaria, 2015 – С. 52–57.

2. Пат. RU 2100528 Россия, МПК E 02 F3/76. Автогрейдер с переменной массой / Воронович В.П., Задеев Е.П., Коробка Б.А., Плютин И.И., Приходько В.И.; владелец Открытое акционерное общество "Крюковский вагоностроительный завод". – № 95116814/03; заявл. 29.09.1995; публ. 27.12.1995, Бюл. № 36.

3 Пат. RU 2399538 Россия, МПК В 62 D 37/04. Способ стабилизации положения колесного транспортного средства / Реймер В.В., Стеновский В.С., Черкасов А.А., Сорокин А.А., Асманкин Е.М.; владелец Федеральное государственное общеобразовательное учреждение высшего профессионального образования "Оренбургский государственный аграрный университет". – № 2008146172/11; заявл. 21.11.2008; публ. 27.05.2010, Бюл. № 26.

4. Пат. SU 1614941, МПК В 60 К 17/30. Управляемый мост автогрейдера / Воронин А.Н., Антипов Л.А., Епифанов В.С., Беликов В.Ф., Островский С.М.; владелец Московское научно-производственное объединение по строительному и дорожному машиностроению ВНИИСтройдормаш. – № 4630828/25-1; заявл. 03.01.1989; публ. 23.12.1990, Бюл. № 47.

5. Пат. SU 1059082, МПК E 02 F 5/08, E 02 F 3/26. Механизм направления движения рабочего органа землеройной машины / Егоров Ю.П., Кузин Э.Н., Корелин В.Ф., Козлов Ю.С., Пучков Н.В., Ройтерштейн С.С., Шустов Г.И.; владелец научно-производственное объединение «ВНИИземмаш». – № 3363510/29-03; заявл. 08.12.1981; публ. 07. 12.1983, Бюл. № 45.

6. Chaplygina A.M. An analytical model of the motor-grader movement at performing working operations / A.M.Chaplygina, V.O.Shevchenko, Zh.P. Beztsennaya // International scientific journal trans motauto world – Sofia, Bulgaria, 2016 – С. 28–32.

7. Проектирование машин для земляных работ: [под ред. А. М. Холодова]. – X.: Вища шк.: Изд-во при Харьков. ун-те, 1986. – 272 с.

8. Хмара Л.А. Машины для земляных работ: підручник / Л.А. Хмара, С.В. Кравець, М.П. Скоблюк та ін.; за загальною редакцією проф. Л.А. Хмари та проф. С.В. Кравця. – X.: ХНАДУ, 2014 – 548 с.

9. Чаплыгина А.М. Экспериментальная оценка показателей курсовой устойчивости автогрейдера / А.М. Чаплыгина // Вестник НУВГП. – Рівне: Изд-во НУВГП, 2015. – № 2(70) – С. 342 – 353.

10. Пат. 114013 Україна, МПК F 16 H 39/00, F 16 H 43/00. Система стабілізації траєкторії руху автогрейдера / Шевченко В.О., Чаплыгина О.М.; власник Харківський національний автомобільно-дорожній університет. – № 201608781; заявл. 15.08.2016; публ. 27.02.2017, Бюл.№ 4.

11. Пат. 114044 Україна, МПК F 16 H 39/00, F 16 H 43/00. Система стабілізації траєкторії руху автогрейдера за допомогою коригування нахилу коліс / Шевченко В.О., Чаплыгина О.М.; власник Харківський національний автомобільно-дорожній університет. – № 201609081; заявл. 29.08.2016; публ. 27.02.2017, Бюл.№ 4.