

## **ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЕМ КАЧЕНИЯ КОЛЕС НА ЧЕТЫРЕХОСНОЙ КОЛЕСНОЙ МАШИНЕ С УПРАВЛЯЕМЫМИ КОЛЕСАМИ НА ПЕРЕДНЕЙ И ЗАДНЕЙ ОСЯХ**

**Введение и актуальность темы.** Увеличение длины шасси транспортных многоосных колесных машин (МКМ) специального назначения и количества осей на них приводит к ухудшению управляемости и маневренности данного вида машин при применении в их конструкции широко распространенных схем рулевого управления (РУ) с управлением направления качения колес на одной или нескольких передних осях [1]. Это связано с тем, что на этапе проектирования центр масс в МКМ с количеством осей четыре и более затруднительно расположить ближе к управляемым по направлению качения колесам передних осей. При этом у транспортных МКМ, предназначенных для перевозки неделимых грузов большой длины, центр масс загруженной машины смещается дальше от осей передних колес по отношению к его расположению на разгруженной машине. Также с увеличением длины шасси МКМ возрастает сопротивление повороту, создаваемое неуправляемыми колесами задних осей, и увеличивается величина минимального радиуса поворота машины.

Для улучшения управляемости и маневренности транспортных МКМ на них применяют схему РУ с управлением направления качения колес на передних и задних осях [2]. Она позволяет уменьшить сопротивление повороту, создаваемое задними колесами МКМ, и уменьшить величину минимального радиуса поворота почти в два раза по сравнению со схемой РУ с управлением направления качения колес только передних осей. Наименьшая величина радиуса поворота МКМ получается при изменении направления качения колес задней оси на угол, равный по величине максимальному углу поворота колес передней оси и противоположный его направлению. Однако на скоростях движения МКМ более 35 км/ч изменение направления качения колес задней оси в противоположном направлении по отношению к направлению качения колес передней оси приводит к снижению или потере устойчивости движения МКМ в зависимости от величины угла направления качения задних колес и скорости движения.

Повышают устойчивость движения МКМ с управляемыми по направлению качения колесами на передних и задних осях путем введения автоматического регулирования соотношения величин и направлений углов поворота колес передних и задних осей [3]. Также автоматическое регулирование коэффициента усиления в РУ с усилителем от скорости движения машины [4] улучшает устойчивость движения транспортных колесных машин на средних, высоких скоростях и их маневренность на малых скоростях. Это связано с тем, что с увеличением скорости движения колесной машины уменьшается сопротивление повороту колес, а с уменьшением скорости движения – сопротивление повороту колес увеличивается. Поэтому автоматическое управление усилителем в системе РУ позволяет обеспечить более легкое управление транспортной колесной машиной на малых скоростях движения и менее чувствительное на высоких скоростях.

Все выше сказанное свидетельствует об актуальности работ по автоматизации систем РУ на транспортных МКМ.

© Ю.М. Гужва, 2017

**Цель и постановка задачи.** Целью настоящей работы является проведение анализа сил, действующих на 4-хосную колесную машину при выполнении поворота. Определение параметров, влияющих на устойчивость движения 4-хосной колесной машины в повороте, и возможности управления ими с помощью изменения направления качения колес на передней и задней осях.

**Анализ сил, действующих на 4-хосную колесную машину в повороте.** Для определения условий устойчивого движения 4-хосной колесной машины, выполняющей поворот, проведем анализ сил, которые действуют на машину в повороте. С этой целью рассмотрим на рис. 1 расчетную схему сил, действующих на 4-х осную колесную машину при движении в повороте.

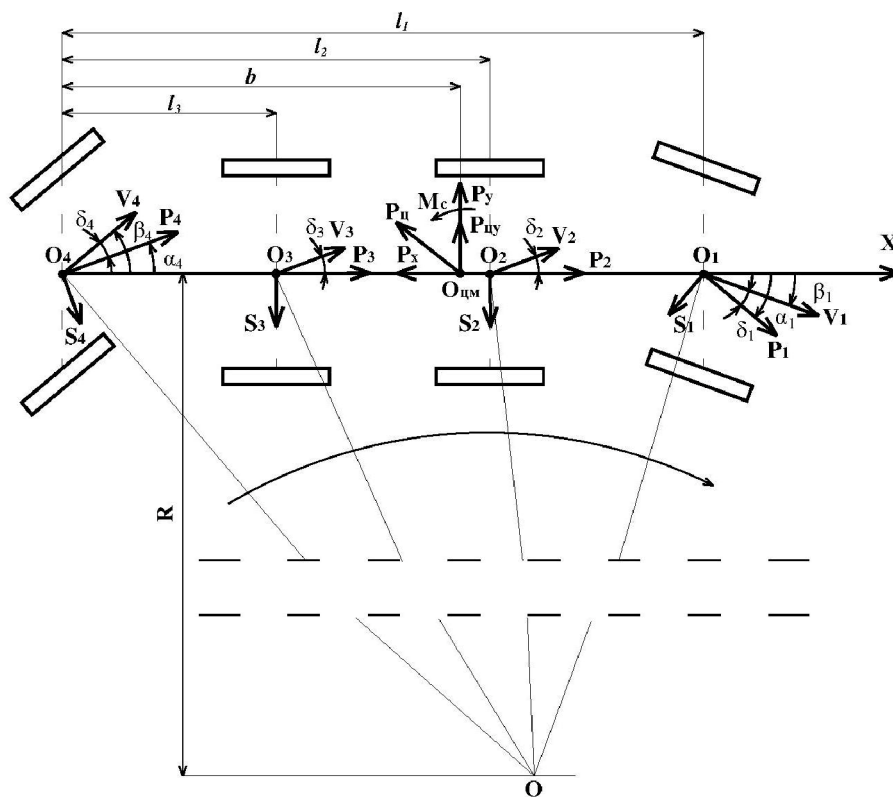


Рис.1. Расчетная схема сил, действующих на 4-хосную колесную машину при выполнении поворота

На рис.1. представлена схема 4-хосной колесной машины с управляемыми по направлению качения колесами на 1-ой и 4-ой осях. На схеме углы поворота управляемых колес и углы увода всех колес заменены углами поворота  $\alpha_i$  и углами увода  $\delta_i$  осей. Где  $i$  – номер оси от 1 до 4. Центры осей лежат на продольной оси X машины. Данное упрощение допустимо, поскольку движение всех точек МКМ определяется движением продольной оси X, а движение управляемых колес задается кинематической схемой рулевого привода и углом поворота рулевого колеса. Поэтому

мгновенный центр поворота т.О будет точкой пересечения перпендикуляров, проведенных к векторам скоростей  $V_i$  в центрах т.  $O_i$  каждой оси машины.

Углы  $\beta_i$  направления векторов скоростей  $V_i$  в центрах осей т.  $O_i$  включают в себя угол поворота  $\alpha_i$  и угол увода  $\delta_i$  соответствующей оси и равны  $\beta_i = \alpha_i \pm \delta_i$ . Знак угла увода оси  $\delta_i$  принимаем в зависимости от направления действия боковой силы на колеса оси, поскольку углы увода колес возникают в результате действия боковой силы. Направление угла увода оси  $\delta_i$  совпадает с направлением действия боковой силы на колеса. Поэтому при совпадении направления действия боковой силы с направлением угла поворота оси  $\alpha_i$  угол направления вектора скорости  $\beta_i$  будет представлять собой сумму угла  $\alpha_i$  и угла увода  $\delta_i$ , что справедливо для направления поворота 4-й оси на рис. 1. В случае действия боковой силы в противоположном направлении по отношению к направлению угла поворота оси  $\alpha_i$  угол направления вектора скорости  $\beta_i$  будет представлять собой разность угла  $\alpha_i$  и угла увода  $\delta_i$ , что справедливо для направления поворота 1-й оси на рис. 1.

В качестве боковой силы, действующей на колеса МКМ, могут выступать: сила ветра, действующая на корпус МКМ; центробежная сила на повороте  $P_y$ ; поперечные составляющие силы тяжести машины; силы сопротивления качению колес на неровном или мягком грунте. Поскольку боковая сила представляет собой результирующее действие поперечной составляющей внешних сил, то на расчетной схеме она обозначается  $P_y$  и приложена к центру масс в точке  $O_{цм}$ . Результирующее действие всех внешних сил на машину показано в виде продольной  $P_x$  и поперечной  $P_y$  составляющих этих сил.

Также при выполнении поворота на МКМ действует момент сопротивления повороту  $M_c$ , который включает в себя момент сопротивления повороту шин; момент, возникающий от разности сил тяги на правых и левых колесах; момент инерции вращающихся частей трансмиссии машины.

В соответствии с расчетной схемой на рис.1 система уравнений динамического равновесия движения МКМ, выполняющей поворот, будет иметь вид:

$$\begin{cases} \sum_1^5 P_i \cdot l_i \cdot \sin \alpha_i + \sum_1^5 S_i \cdot l_i \cdot \cos \alpha_i + P_y \cdot b + M_c = 0 \\ \sum_1^5 P_i \cdot \cos \alpha_i - \sum_1^5 S_i \cdot \sin \alpha_i - P_x = 0 \\ \sum_1^5 P_i \cdot \sin \alpha_i + \sum_1^5 S_i \cdot \cos \alpha_i + P_y = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $P_i$  – продольная реакция на i-той оси,  $S_i$  – поперечная реакция на i-той оси,  $l_i$  – расстояния от центра 4-й оси т.  $O_4$  до точек приложения реакций в центрах каждой оси т.  $O_i$ ,

$b$  – расстояние от центра 4-й оси т.  $O_4$  до центра масс т.  $O_{ц.м.}$ ,  $M_c$  – суммарный момент сопротивления повороту,  $P_x$  – продольная составляющая результирующего действия внешних сил,  $P_y$  – поперечная составляющая результирующего действия внешних сил.

Существенное влияние на управляемость и устойчивость движения МКМ оказывает центробежная сила  $P_{ц}$ . Она возникает во время движения машины на повороте и направлена по радиусу от мгновенного центра поворота. Ее поперечная составляющая стремится опрокинуть машину или вызвать ее занос, и равна [5]  $P_{цy} = m \cdot V^2 / R$ , где  $m$  – масса машины,  $V$  – скорость движения,  $R$  – радиус поворота. Из приведенной зависимости видно, что чем больше масса, скорость движения машины и меньше радиус поворота, тем больше будет поперечная составляющая центробежной силы  $P_{цy}$  и хуже устойчивость МКМ на повороте. Причем при небольшом увеличении скорости движения машины существенно возрастает  $P_{цy}$ , так как она прямо пропорциональна квадрату скорости. Т.е. при увеличении  $V$  в 2 раза  $P_{цy}$  увеличится в 4 раза. Если  $P_{цy}$  будет превышать силы сцепления колес с дорогой, то возникнет занос МКМ.

Уменьшать величину  $P_{цy}$  при движении МКМ возможно или снижением скорости движения, или увеличением радиуса поворота машины. В связи с этим рассмотрим возможные варианты изменения направления качения колес на передних и задней осях МКМ при выполнении маневрирования.

В случае изменения направления качения управляемых колес на передней и задней осях в одном направлении на одинаковый угол величина радиуса поворота будет стремиться к бесконечности. Например, в соответствии с рис.1 при  $\alpha_1 = \alpha_4$  перпендикуляры, проведенные к векторам скоростей  $V_1, V_4$  в точках  $O_1, O_4$ , будут расположены параллельно относительно друг друга и не пересекаться при одинаковых величинах и направлениях углов увода колес передних и задней оси  $\delta_1 = \delta_4$ . Получаем нейтральную поворачиваемость машины, наименьшую величину  $P_{цy}$  и наилучшую устойчивость движения. Величина радиуса поворота в данном случае зависит только от величин и направлений углов увода колес на передних и задней осях. Поскольку на дорогах с твердым покрытием углы увода колес имеют маленькую величину, то радиус поворота является бесконечно большой величиной. Однако при этом МКМ будет двигаться плоскопараллельно вбок. Получаем, так называемое, «крабовое» движение [6].

Если управляемые колеса на передних осях поворачивать на больший угол по отношению к повороту колес на задней оси в одном направлении  $\alpha_1 > \alpha_4$ , то 4-хосная колесная машина будет поворачивать в направлении поворота передних колес. При этом величина радиуса поворота будет существенно больше по отношению к повороту машины с прямо выставленными колесами на задней оси, т.е.  $\alpha_4 = 0$ . В результате получим уменьшение величины  $P_{цy}$  при выполнении поворота и увеличение устойчивости движения 4-хосной колесной машины.

Если управляемые колеса на задней оси будут повернуты на больший угол по отношению к повороту колес на передней оси в том же направлении  $\alpha_4 > \alpha_1$ , то 4-хосная колесная машина будет поворачивать в противоположную сторону по отношению к повороту колес на передней оси.

Поворот колес на задней оси в противоположную сторону, по отношению к повороту колес на передней оси, приводит к существенному уменьшению величины радиуса поворота и увеличению величины  $P_{цв}$ . Поэтому его применяют только при выполнении маневрирования МКМ на скоростях до 35 км/ч.

Также для анализа соотношения углов и направлений поворота колес на передних и задней осях МКМ рассмотрим критическую скорость прямолинейного движения по уводу. Она вычисляется по формуле [6]:

$$V_{кр} = \sqrt{\frac{P_y \cdot g \cdot L}{G_a \cdot [(\alpha_n \pm \alpha_3) + (\delta_3 - \delta_n)]}}, \quad (2)$$

где  $V_{кр}$  – критическая скорость прямолинейного движения по уводу, м/с;  $P_y$  – боковая сила, действующая на шасси, Н;  $L$  – длина шасси, м;  $g$  – ускорение свободного падения 9,81 м/с<sup>2</sup>;  $G_a$  – вес машины, Н;  $\alpha_n$  и  $\alpha_3$  углы поворота колес на передней и задней осях;  $\delta_n$  и  $\delta_3$  углы увода колес на передней и задней осях.

В формуле (2) определения критической скорости прямолинейного движения по уводу величины углов поворота колес  $\alpha_n$  и  $\alpha_3$  на передней и задней осях складываются  $(\alpha_n + \alpha_3)$ , если колеса на задней оси поворачиваются в противоположную сторону, по отношению к повороту колес на передней оси и вычитаются  $(\alpha_n - \alpha_3)$ , если колеса на задней и передней оси повернуты синфазно.

В результате видно, что при повороте колес на задней оси в противоположную сторону по отношению к направлению качения колес на передней оси и увеличении углов поворота  $\alpha_n$  и  $\alpha_3$  величина критической скорости  $V_{кр}$  прямолинейного движения будет уменьшаться. Что приводит к снижению устойчивости движения МКМ в повороте.

При повороте колес на задней и передней оси в одном направлении и выполнении условия  $\alpha_n > \alpha_3$  величина критической скорости  $V_{кр}$  прямолинейного движения будет возрастать. Что приводит к повышению устойчивости движения МКМ в повороте.

В результате проведенного анализа действия центробежной силы при выполнении поворота МКМ, а также изменения величины критической скорости  $V_{кр}$  прямолинейного движения по уводу в зависимости от величин и направлений углов поворота колес  $\alpha_n$ ,  $\alpha_3$  на передних и задней осях видно, что для обеспечения устойчивого движения в повороте МКМ необходимо управляемые колеса на задней оси поворачивать в том же направлении, что и колеса на передней оси. При этом должно

выполняться условие  $\alpha_n > \alpha_3$ . В источнике [6] говорится, что на высоких скоростях движения колеса на задней оси поворачиваются синфазно с колесами на передней оси на угол в пределах от  $0,5^\circ$  до  $8^\circ$ . При этом не указывается зависимость поворота колес на задней оси от величины угла поворота колес на передней оси, а также закон управления. Это свидетельствует о недостаточной изученности данного направления и необходимости проведения экспериментальных исследований.

Также следует отметить, что в правилах вождения автомобиля, при его заносе, т.е. возникновении бокового скольжения колес на задней оси и продолжающемся поступательном движении вперед, рекомендуется поворачивать колеса на передней оси в сторону начавшегося заноса. После прекращения заноса колеса на передней оси необходимо выровнять, чтобы занос автомобиля не начался в другом направлении. Для реализации данной функции в системе автоматического управления направлением качения колес на передних и задней осях потребуется дополнительно к датчикам углов положения управляемых осей ввести гироскопический датчик направления движения и разработать алгоритм управления корректирующим изменением угла поворота управляемых колес на передней и задней осях в зависимости от отклонения МКМ от заданного направления движения.

**Выводы.** 1. Для обеспечения устойчивого движения в повороте 4-хосной колесной машины с управляемыми колесами на передней и задней осях на скоростях движения более 35 км/ч система управления должна обеспечивать поворот колес на задней оси в направлении поворота колес на передней оси на угол, меньший по отношению к положению колес на передней оси.

2. Для обеспечения высоких маневренных свойств 4-хосной колесной машины с управляемыми колесами на передней и задней осях система управления должна обеспечивать поворот колес на задней оси в противоположном направлении поворота колес на передней оси при скорости движения до 35 км/ч.

3. Разработка алгоритма корректирующего изменения угла поворота управляемых колес на передней и задней осях требует проведения глубоких расчетных и экспериментальных исследований.

**Литература:** 1. Динамика транспортно-тяговых колесных и гусеничных машин / [Александров Е.Е., Волонцевич Д.О., Карпенко В.А. и др.]; под ред. А.Н. Туренко. – Харьков: ХГАДТУ(ХАДИ), 2001. – 642 с. 2. Редчиц В.В. Сравнение показателей автомобилей с различными схемами расположения управляемых осей при входе в поворот / В.В. Редчиц, Е.В. Головина // *Нові технології*. – 2010. – №3(29). – С 126–131. 3. Оценка управляемости и устойчивости многоосных автомобилей при установившемся прямолинейном движении / М.А. Подригало, Д.М. Клец, В.И. Гацько и др. // *Машиноприладобудування та транспорт*. – 2013. – №143. – С 41–44. 4. Данов Б.А. Электронные системы управления иностранных автомобилей / Б.А. Данов – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 224 с. 5. Подригало М.А. Нове в теорії експлуатаційних властивостей автомобілів та тракторів / М.А. Подригало, В.В. Шелудченко – Суми: Сумський національний аграрний університет, 2015. – 213с. 6. Белоусов Б.Н. Колесные транспортные средства особо большой грузоподъемности. Конструкция. Теория. Расчет / Б.Н. Белоусов, С.Д. Попов – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 728 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Dinamika transportno-tyagovyh kolesnyh i gusenichnyh mashin / [Aleksandrov E.E., Voloncevich D.O., Karpenko V.A. i dr.]; pod red. A.N. Turenko. – Har'kov: HGADTU(HADI), 2001. – 642 s.* 2. *Redchic V.V. Sravnenie pokazatelej avtomobilej s razlichnymi skhemami raspolozheniya upravlyaemyh osey pri vhode v povorot / V.V. Redchic, E.V. Golovina // Novi tekhnologii. – 2010. – №3(29). – S 126–131.* 3. *Ocenka upravlyaemosti i ustojchivosti mnogoosnyh avtomobilej pri ustanovivshemsya pryamolinejnom dvizhenii / M.A. Podrigalo, D.M. Klec, V.I. Gac'ko i dr. // Mashinopriladobuduvannya ta transport. – 2013. – №143. – S 41–44.* 4. *Danov B.A. EHlektronnye sistemy upravleniya inostrannyh avtomobilej / B.A. Danov – M.: Goryachaya liniya – Telekom, 2002. – 224 s.* 5. *Podrigalo M.A. Nove v teorii ekspluatacijnih vlastivostej avtomobiliv ta traktoriv / M.A. Podrigalo, V.V. SHeludchenko – Sumi: Sums'kij nacional'nij agrarnij universitet, 2015. – 213s.* 6. *Belousov B.N. Kolesnye transportnye sredstva osobo bol'shoj gruzopod'emnosti. Konstrukciya. Teoriya. Raschet / B.N. Belousov, S.D. Popov – M.:MGU im. N.EH. Baumana, 2006. – 728 s.*

Гужва Ю.М., Стрімівський С.В., Безлепкін О.А., Ключка Р.В., Собко О.П.

**ОСОБЛИВОСТІ БУДУВАННЯ АЛГОРИТМА УПРАВЛІННЯ  
НАПРЯМКОМ КОЧЕННЯ КОЛІС НА ЧОТИРИВІСНІЙ КОЛІСНІЙ  
МАШИНИ З КЕРОВАНИМИ КОЛЕСАМИ НА ПЕРЕДНІЙ ТА ЗАДНІЙ ВІСЯХ**

У статті здійснений аналіз сил, які діють на чотиривісну колісну машину під час виконання повороту. Визначені параметри, які впливають на стійкість руху багатовісних колісних машин під час виконання повороту, її маневреність та критичну швидкість прямолінійного руху по зміщенню. Видані рекомендації по управлінню кутами напрямку кочення коліс на передній та задній вісях у чотиривісній колісній машині.

Гужва Ю.М., Стривовский С.В., Безлепкин А.А., Ключка Р.В., Собко А.П.

**ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ  
НАПРАВЛЕНИЕМ КАЧЕНИЯ КОЛЕС НА ЧЕТЫРЕХОСНОЙ КОЛЕСНОЙ  
МАШИНЕ С УПРАВЛЯЕМЫМИ КОЛЕСАМИ НА ПЕРЕДНЕЙ И ЗАДНЕЙ ОСЯХ**

В статье выполнен анализ сил, действующих на 4-х осную колесную машину при выполнении поворота. Определены параметры, влияющие на устойчивость движения многоосной колесной машины в повороте, ее маневренность и критическую скорость прямолинейного движения по уводу. Выданы рекомендации по управлению углами направления качения колес на передней и задней осях в 4-хосной колесной машине.

U. Guzhva, S. Strimovskyi, A. Bezlepkina, R. Kluchka, A. Sobko

**CONSTRUCTION FEATURES OF CONTROL ALGORITHM  
COURSE ROLLING MOTION WHEELS ON TETRAAXIAL WHEELED  
VEHICLE WITH CONTROLLED WHEELS ON FRONTS AND BACK AXIS**

In article the execute analysis forces effect on tetraaxial wheeled vehicle in turn. The parameters, which influence on stability of motion many axis wheeled vehicle in turn, her flexibility and critical speed in-line motion in deflection. Recommendations on control angles course rolling motion wheels on front and back axis in tetraaxial wheeled vehicle.