

629.1.036:681.5.62-52

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АКТИВНО УПРАВЛЯЕМОГО СХОЖДЕНИЯ КОЛЕС АВТОМОБИЛЕЙ

Канд. техн. наук В.И. РЯЗАНЦЕВ

Рассмотрены вопросы применения активного автоматического управления сходимением колес автомобиля. Представленные результаты компьютерного эксперимента позволяют оценить эффективность применения такого управления для случаев движения автомобиля с различными параметрами и при применении управления сходимением на различных осях.

In article a problems of application of active automatic control of a toe-in are considered. The presented results of computer experiment allow to estimate the efficiency of application of such control for cases of movement of the automobile with various parameters at application of control of a toe-in on various axles.

Активная безопасность автомобиля — одно из важнейших направлений совершенствования конструкций современного автомобиля. Для улучшения курсовой устойчивости продолжается совершенствование управления АБС, внедряется система электронной стабилизации. Уровень совершенства разработок современных конструкций весьма высок, поэтому каждый следующий шаг в направлении повышения активной безопасности автомобиля требует все больших усилий. Ниже представляются результаты исследований по оценке эффективности новой системы, имеющей целью повышение устойчивости и улучшение управляемости автомобилем. Эту задачу позволяет решать система активного управления сходимением колес автомобиля (САРС) в процессе движения. В экспериментальных исследованиях, выполненных специалистами, занимавшимися проблемой устойчивости и управляемости автомобилем, было обнаружено не один раз, что применяемая геометрия рулевой трапеции не обеспечивала наилучшей устойчивости автомобилем при всем многообразии режимов его движения. Разные исследователи различных автомобилей и режимов движения отмечали целесообразность применения других углов трапеции. Одни исследователи говорили о необходимости увеличения этих углов, другие делали прямо противоположные выводы. На основании работ, выполненных в МГТУ им. Н.Э. Баумана, становится объяснимо, почему выводы разных исследователей были противоречивы.

Управление сходимением колес автомобиля является эффективным средством регулирования боковых реакций, действующих на них, и, как следствие, регулирование устойчивости автомобиля, практически, на всех режимах движения. В последние два десятилетия в автомобилях стали широко применять пассивное регулирование углов схождения как передних, так и задних колес. Наконец, в самое последнее время появился автомобиль, в котором, наряду с подруливанием задних колес, применено активное регулирование угла схождения между ними. Рассмотрим эффект применения управления сходимением в различных условиях движения автомобиля.

В рамках исследования эффективности применения САРС было выполнено математическое моделирование ряда основных характерных режимов движения автомобиля. Это движение по прямой без внешних боковых сил, движение по прямой под действием внешних боковых сил (например, бокового ветра), движение по кругу и движение на переставке. Математическая система, использованная для решения задачи, приведена в ранее опубликованных работах, в частности, в [1, 2].

Результаты моделирования процессов управления схождением и изменения углов и сил, действующих на колеса в случае прямолинейного движения автомобиля без внешних боковых сил, также были представлены в ранее опубликованных материалах. Рассмотрим случай движения автомобиля по прямой с внешней боковой силой.

Среди большого разнообразия режимов движения автомобиля на прямой под действием боковой внешней силы можно выделить движение автомобиля накатом. На этом режиме на устойчивость автомобиля не влияют современные системы активной безопасности, такие, как АБС, ПБС, ПЭС, работа которых связана с регулированием за счет изменения значений продольных сил на колесах. Фактически, одним из немногих средств, позволяющих повлиять на устойчивость движения и управляемость автомобилем в накате, является активное автоматическое регулирование схождения колес автомобиля в движении. Эту задачу выполняет система автоматического регулирования схождения (САРС).

Движение автомобиля накатом по прямой под действием внешней боковой силы может выполняться в различных вариантах. Обозначим некоторые из них.

1. Движение по горизонтальной плоскости под действием бокового ветра. Точка приложения результирующей силы давления ветра может быть расположена в различных местах боковой проекции автомобиля, смещаясь как вдоль продольной оси, так и по высоте автомобиля.

2. Движение по косоугру, когда внешняя боковая сила всегда приложена к центру тяжести автомобиля и является функцией бокового наклона дороги.

Условия управления автомобилем также могут быть различными. В связи с этим можно выделить следующие режимы.

1. Движение автомобиля без управления рулем. Передние управляемые колеса в этом случае постоянно ориентированы в направлении продольной оси автомобиля, т.е. курсовой угол переднего моста $\alpha_{1,2cp} = 0,5(\alpha_1 + \alpha_2) = 0$. Задние колеса также предполагаются с нулевым курсовым углом $\alpha_{3,4cp} = 0,5(\alpha_3 + \alpha_4) = 0$ по отношению к связанным координатам автомобиля.

2. Движение автомобиля с управлением рулем для поддержания прямолинейной траектории. В этом случае может быть применена различная настройка направляющей точки. Направляющая точка — какая-либо точка на продольной оси автомобиля, по значению отклонения которой от траектории система управления рулем вырабатывает команду на изменение положения руля. Рассматривается режим движения автомобиля с постоянной скоростью 25 м/с и монотонно увеличивающейся боковой силой F_y .

Рассмотрим влияние управления схождением на движение автомобиля по горизонтальной, плоской поверхности с постоянной скоростью под действием боковой возрастающей силы.

В режиме движения без управления рулем проанализировано движение автомобиля в условиях нейтральной, недостаточной и избыточной поворачиваемости (рис. 1). Рассмотрены варианты применения САРС по осям двухосного автомобиля: 1) с регулированием схождения колес всех осей; 2) с регулированием схождения колес передней оси; 3) с регулированием схождения колес задней оси; 4) с неуправляемым схождением.

В соответствии с теорией, хорошо разработанной к настоящему времени, под действием боковой силы отклонение траектории автомобиля происходит при избыточной управляемости в сторону, противоположную направлению действия внешней боковой силы. В случаях нейтральной и недостаточной управляемости автомобиль отклоняется в направлении действия внешней боковой силы. При недостаточной поворачиваемости значения отклонения траектории автомобиля увеличиваются.

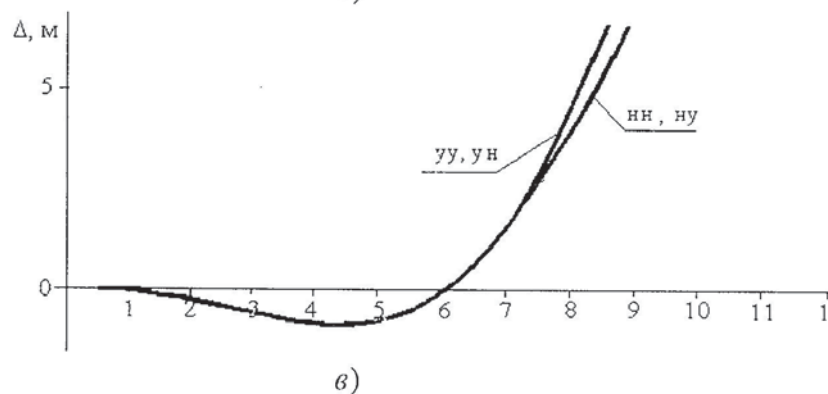
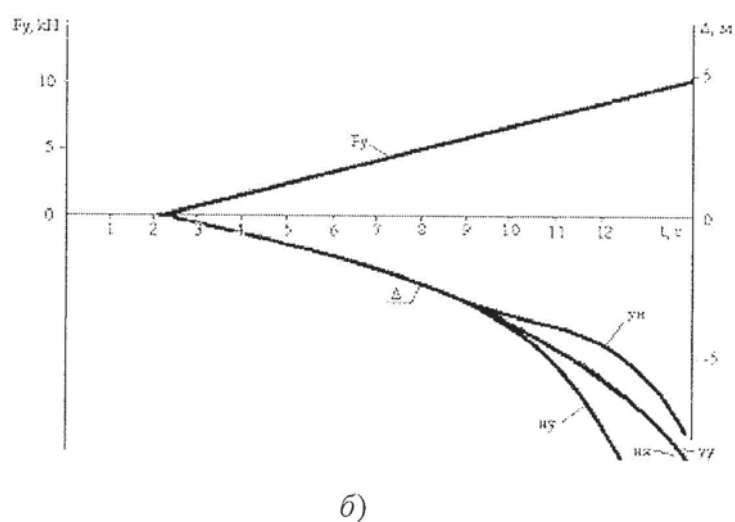
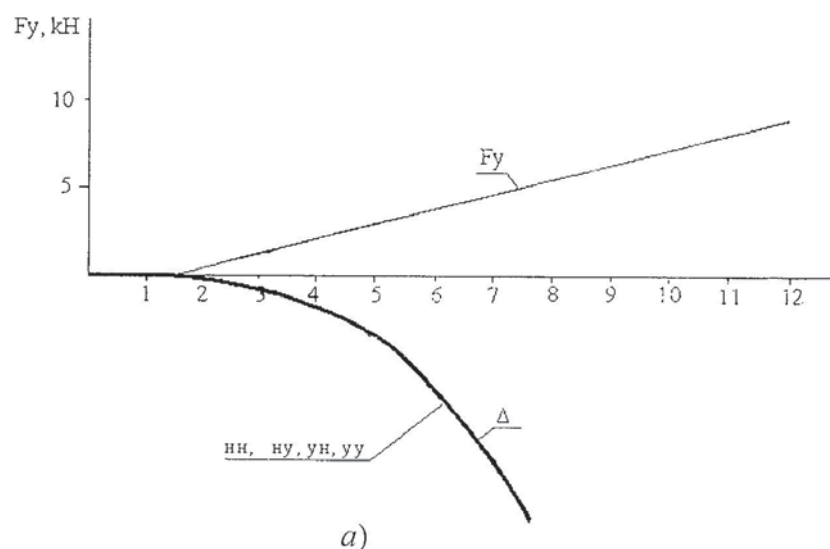


Рис. 1. Отклонения траектории при движении неуправляемого автомобиля по горизонтальной плоской поверхности с постоянной скоростью под действием боковой возрастающей силы F_y : а — автомобиль с недостаточной поворачиваемостью; б — автомобиль с нейтральной поворачиваемостью; в — автомобиль с избыточной поворачиваемостью

Анализируя влияние применения САРС на характер траектории движения автомобиля, можно констатировать, что при недостаточной поворачиваемости автомобиля на этом режиме влияние САРС практически отсутствует (рис 1, а). Заметим, что дан-

ный расчет выполнен для случая, когда коэффициент сопротивления уводу колес передней оси в 1,5 раза меньше соответствующего коэффициента колес заднего моста.

Анализируя результаты расчета движения автомобиля с нейтральной поворачиваемостью констатируем, что наименьшее отклонение траектории получается при управлении схождение колес передней оси. Наибольшее отклонение оказалось при управлении схождение колес задней оси. В одном из сечений графика соответствующие отклонения траектории составляют 4,76 и 8,09 м. Разность отклонений составляет 3,33 м или $3,33/4,76 \cdot 100\% = 69,96\%$ по отношению к минимальному отклонению. Применение управления схождение колес на всех осях, а также полное отсутствие такого управления дают похожие, средние по значению результаты.

При избыточной поворачиваемости автомобиля (рис.1, в) в условиях применения различных комбинаций управления схождение по осям изменения траекторий сравнительно малы. Отметим некоторые особенности траектории автомобиля в этом случае. С увеличением внешней боковой силы F_y автомобиль сначала отклоняется на небольшую величину в сторону по направлению действия боковой силы. Затем все большую роль начинает играть преобладание отклонения задней оси из-за сниженного сопротивления боковому уводу. Автомобиль разворачивается в сторону, противоположную направлению действия боковой силы, и начинает перемещаться в этом направлении. По результатам расчетов можно видеть, что наилучший положительный эффект в этом режиме дает управление схождение на задней оси.

Избыточная управляемость создавалась в представленном расчете применением уменьшенного в 1,5 раза коэффициента сопротивления увода задних колес. Для автомобиля с избыточной поворачиваемостью в рассмотренном режиме движения влияние применения САРС имеет место, но сравнительно невелико.

На рис. 2 представлены графики изменения углов схождения на режиме движения автомобиля по прямой под действием боковой силы без управления рулем при различных схемах управления схождение колес. Для такого режима, упомянутые углы являются, фактически, абсолютными углами увода колес.

Проанализируем процессы изменения регулируемых углов схождения на режиме движения автомобиля с нейтральной поворачиваемостью.

При регулировании схождения колес на всех осях процесс регулирования схождения колес передней оси прекращается при выходе обоих передних колес на боковое скольжение. Аналогично, при выходе на скольжение обоих задних колес прекращается регулирование схождения задних колес. С этого момента колеса занимают неизменное положение. В режиме движения с регулированием схождения колес передней оси на кривых изменения положений 1-го и 2-го колес можно отметить две характерных точки, в которых происходят относительно резкие изменения значений углов. Первая такая точка соответствует выходу на боковое скольжение заднего 4-го колеса (со стороны действия ветра). В этой точке начинается относительно интенсивный рост абсолютных значений углов поворота колес. Вторая точка излома кривой соответствует выходу на боковое скольжение практически одновременно обоих передних колес. Здесь процесс регулирования их схождения блокируется и углы остаются постоянными. Аналогичные процессы можно наблюдать на задней оси при активном управлении схождение ее колес. Также видно, что при управлении схождение на всех осях процесс изменения углов протекает гладко более длительное время, что благоприятно сказывается на устойчивости движения автомобиля.

С точки зрения влияния режима управления схождение (комбинаций управления схождения по осям) на устойчивость движения автомобиля сравнение результатов расчетов на

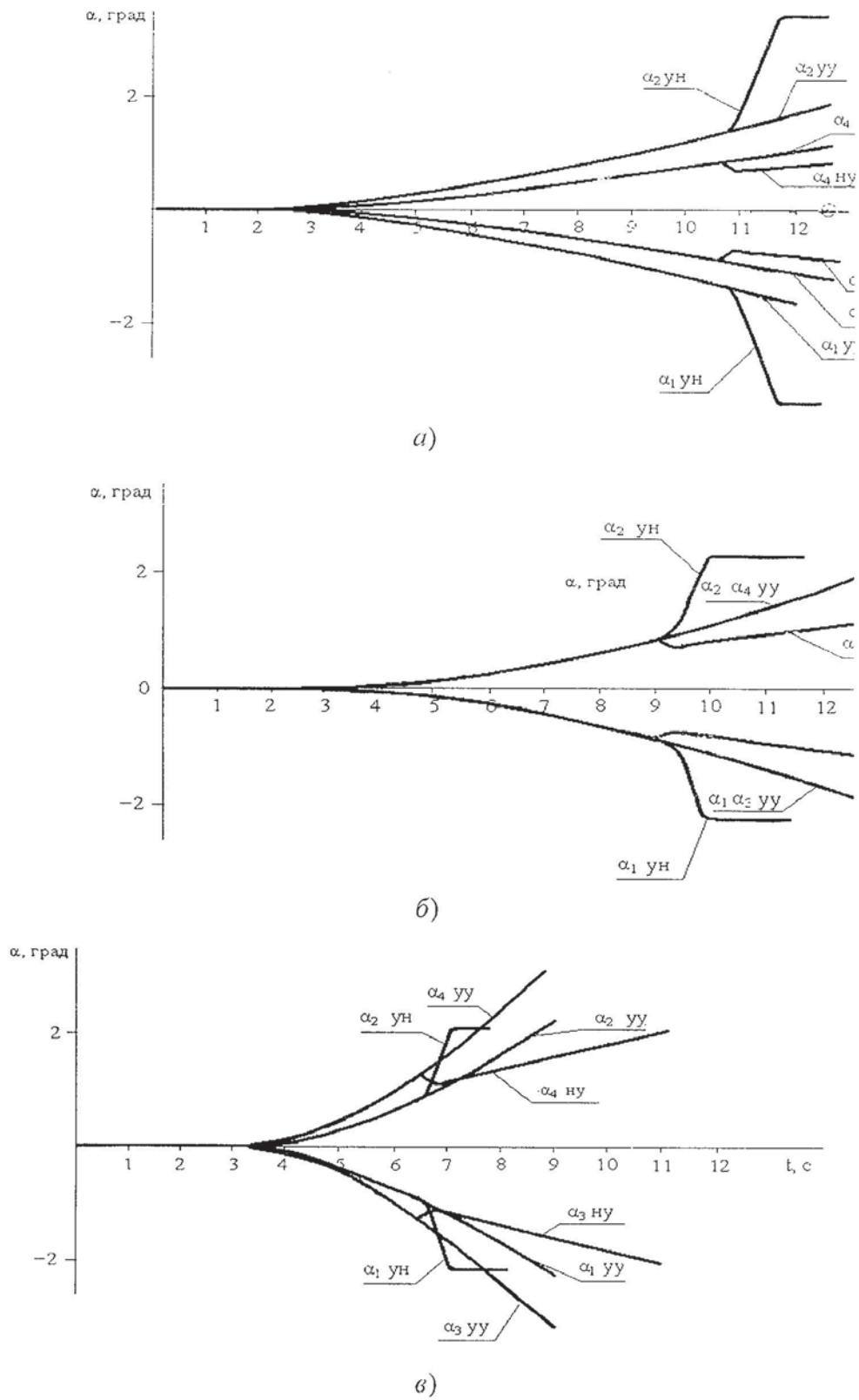


Рис. 2. Процессы изменения углов поворота колес при движении автомобиля по горизонтальной плоской поверхности с постоянной скоростью под действием возрастающей боковой силы F_y : а — автомобиль с недостаточной поворачиваемостью; б — автомобиль с нейтральной поворачиваемостью; в — автомобиль с избыточной поворачиваемостью

режимах без управления рулем с результатами расчета траектории при условии управления рулевым колесом с целью поддержания желаемой траектории показывает более существенную эффективность применения управления сходимением в последнем случае (рис. 3).

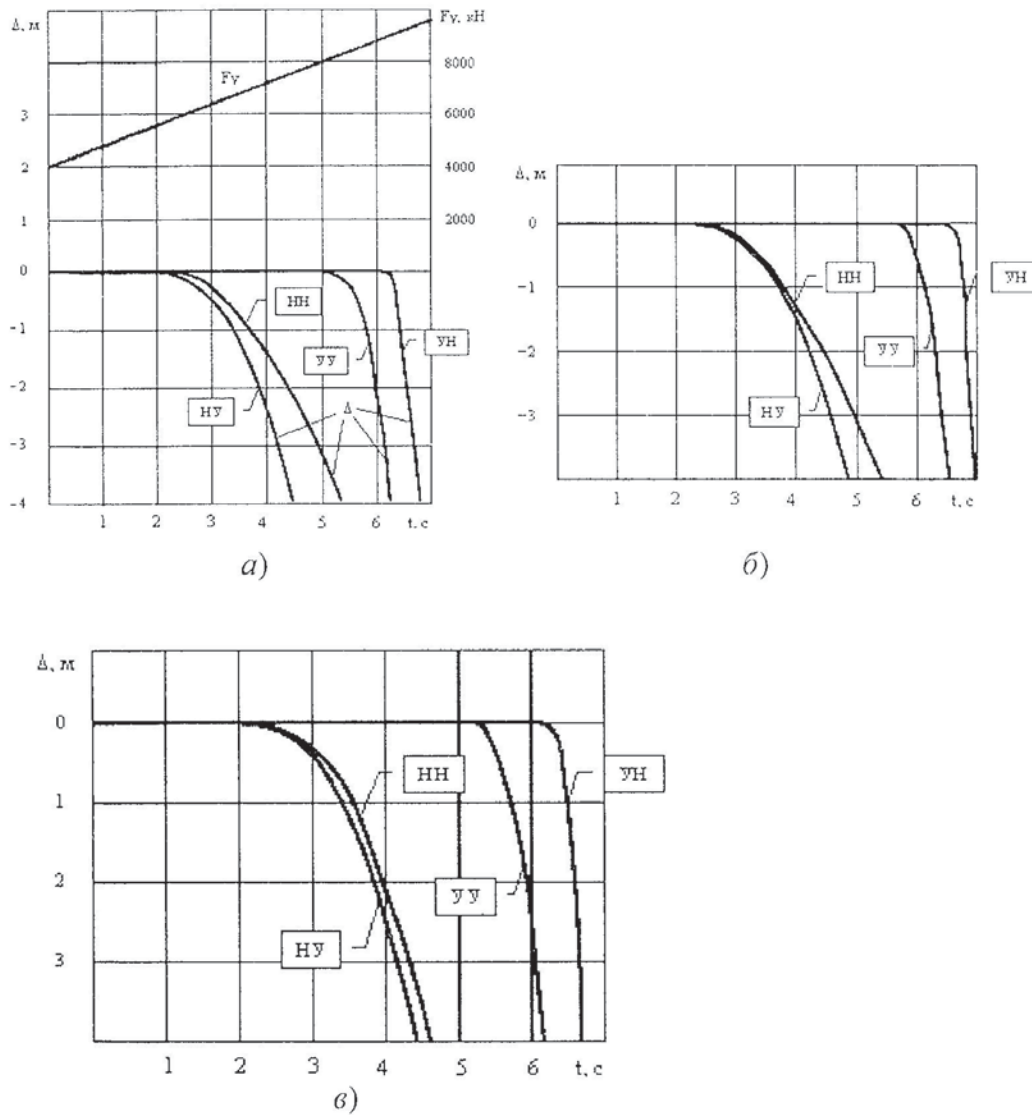


Рис. 3. Отклонения траектории автомобиля, управляемого виртуальным водителем, при движении по прямой на горизонтальной плоской поверхности с постоянной скоростью под действием боковой возрастающей силы F_y ; *a* — автомобиль с недостаточной поворачиваемостью; *б* — автомобиль с нейтральной поворачиваемостью; *в* — автомобиль с избыточной поворачиваемостью

Так, прежде всего, точки выхода автомобиля с траектории прямолинейного движения отстоят друг от друга достаточно далеко по времени. Соответственно, они отстоят достаточно далеко друг от друга по пути. Существенно различны и значения боковой силы, при которых происходит сход автомобиля с заданной прямолинейной траектории. При линейном возрастании внешней силы, временное различие моментов схода с траектории прямолинейного движения пропорционально различию значений действующей боковой внешней силы.

На графиках (рис. 4) представлены процессы изменения боковых сил, действующих на колеса автомобиля, при движении по прямой на горизонтальной плоскости при боковой силе и с управлением виртуальным водителем.

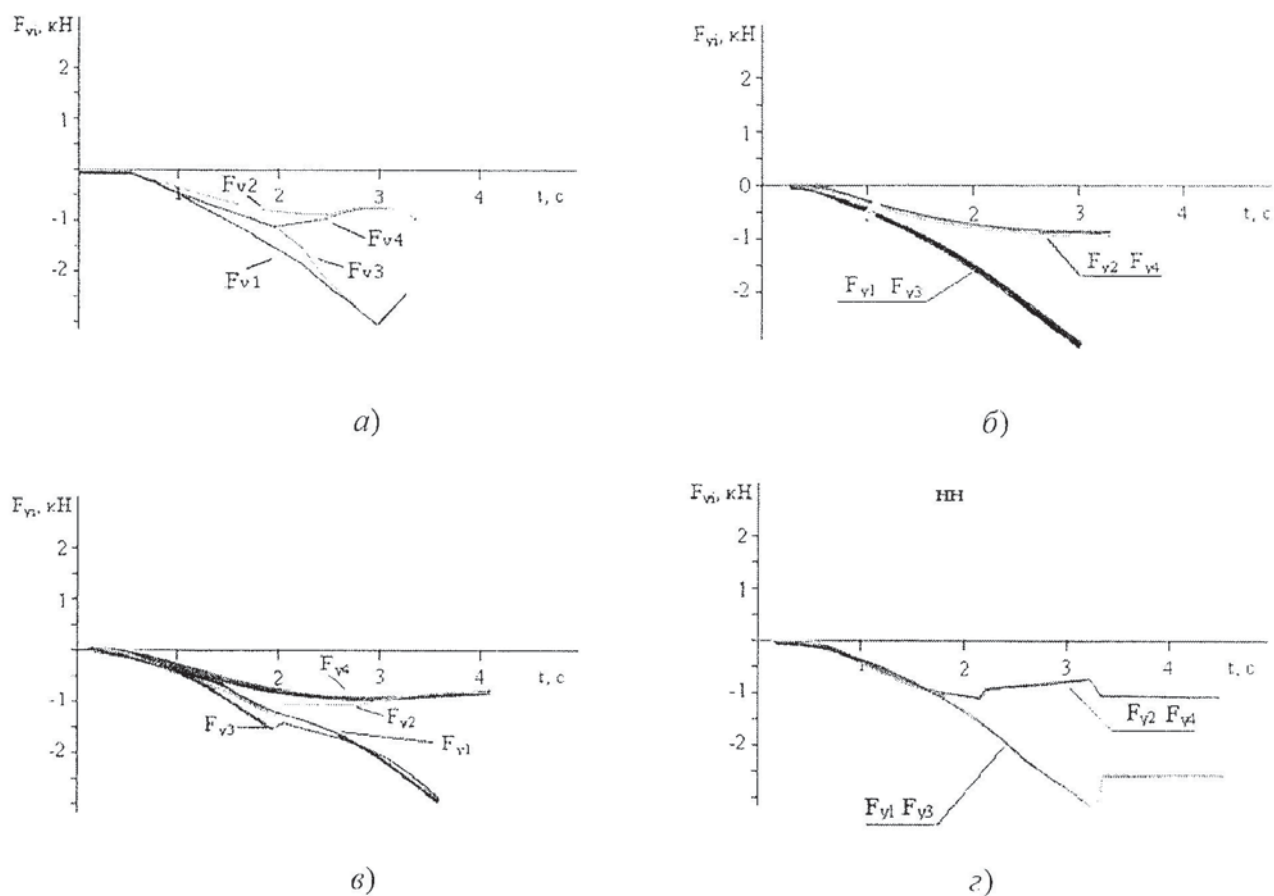


Рис. 4. Боковые силы на колесах автомобиля, управляемого виртуальным водителем, при движении по прямой на горизонтальной плоской поверхности с постоянной скоростью под действием боковой возрастающей силы F_y : а — управление сходимостью на передней оси; б — управление сходимостью на всех осях; в — управление сходимостью на задней оси; з — управление сходимостью отсутствует

Режим управления сходимостью на всех осях (рис. 4, б) характеризуется близкими значениями сил на колесах одного борта, как с подветренной стороны, так и противоположной стороны автомобиля. Это свидетельствует о том, что соотношение, в котором находится боковые силы передних колес, а также соотношение задних сил примерно одинаковы. В то же время это показывает, что в этих же соотношениях находятся и вертикальные реакции на колесах переднего моста, а также заднего моста. Такая ситуация соответствует примененному закону регулирования.

Похожее протекание изменения сил наблюдается и на режиме управления сходимостью колес заднего моста. На графике (рис. 4, в) виден некоторый срыв процесса, что вызывается срывом в поперечное скольжение колеса переднего моста с разгруженной подветренной стороны.

При управлении в режиме управляемого схождения передних колес на графике видно первое резкое изменение боковых сил, которое соответствует началу скольжения первого из задних колес, наименее нагруженного вертикальной силой (4-го колеса). Затем срывается более сильно нагруженное заднее колесо. С этого момента весь задний мост скользит, провоцируя интенсивную потерю устойчивости автомобиля. В режиме движения автомобиля с неуправляемым сходом резко изменяются реакции в момент, соответствующий началу скольжения, практически, одновременному слабонагруженным колесам обеих осей, т.е. колес с подветренной стороны.

В представленных расчетах для случая нейтральной поворачиваемости автомобиля значение максимальной боковой внешней силы, соответствующее наименее эффективной комбинации управления сходимением, составляет 6061 Н. В случае наиболее эффективного управления это значение составляет 9527 Н. Разность этих значений равна 3466 Н. В процентном выражении это составляет $(3466/6061 \cdot 100\% = 57\%)$ по отношению к худшему из всех вариантов управления.

На рис. 5 представлены графики изменения углов поворота левого и правого передних колес в рассматриваемом режиме с управлением рулем, а также график изменения боковой силы и отклонения траектории автомобиля от прямой линии.

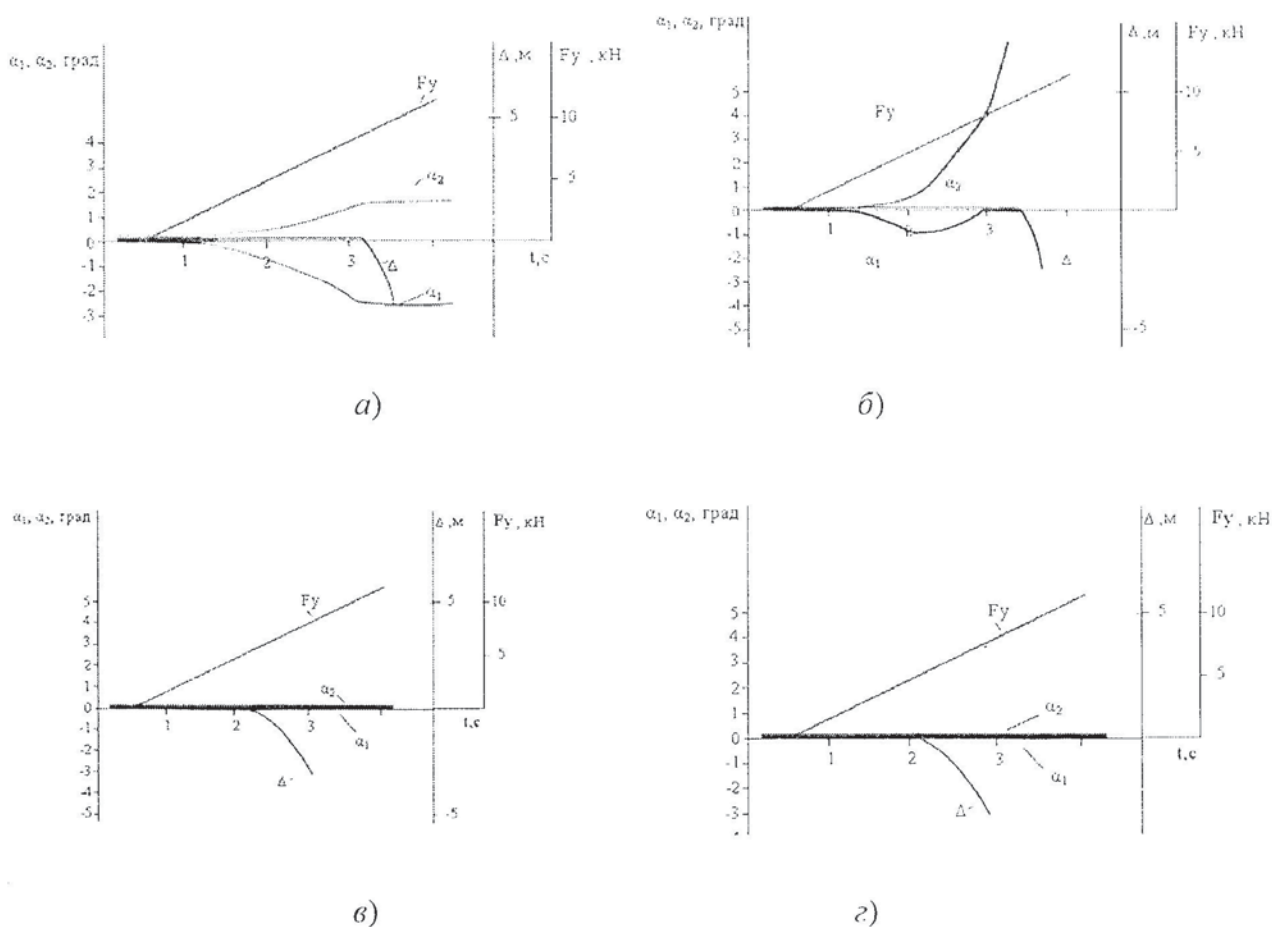


Рис. 5. Процессы изменения боковой силы, углов передних колес и отклонения от прямой линии траектории автомобиля, управляемого виртуальным водителем, в режиме прямолинейного движения под действием внешней боковой силы F_y : а — управление сходимением колес на передней оси; б — управление сходимением на всех осях; в — управление сходимением на задней оси; г — без управления сходимением

Вначале под действием еще достаточно слабой боковой силы автомобиль движется с небольшим, практически постоянным, отклонением (0,017 м от намеченной прямой линии), с незначительным поворотом передних управляемых колес (0,07—0,08 град), компенсирующим действие боковой силы.

При регулировании сходимения только на передней оси первым заскользившим колесом становится заднее внутреннее (4-ое) колесо автомобиля. Под действием боковой силы именно оно становится более разгруженным по сравнению с правым (3-им) колесом. На-

чинается некоторое, пока еще незначительное, сползание заднего моста с траектории, и, также, начинается активная работа рулевым колесом для поддержания прямолинейной траектории. Продолжение этого вялого процесса прерывается срывом в скольжение 3-го колеса, что вызывает интенсивные перемещения заднего моста и в целом автомобиля. На рисунках 5, в и 5, г представлены режимы с управлением сходимением задних колес и без управления сходимением. Эти графики особых комментариев не требуют.

На графиках (рис. 6) представлены траектории движения автомобиля под действием боковой внешней силы при различных комбинациях управления сходимением по осям автомобиля. Отличие такого графического представления траекторий от представленных выше графиков отклонений от траектории заключается в дополнении графика элементом, информирующим о текущем угловом положении корпуса автомобиля.

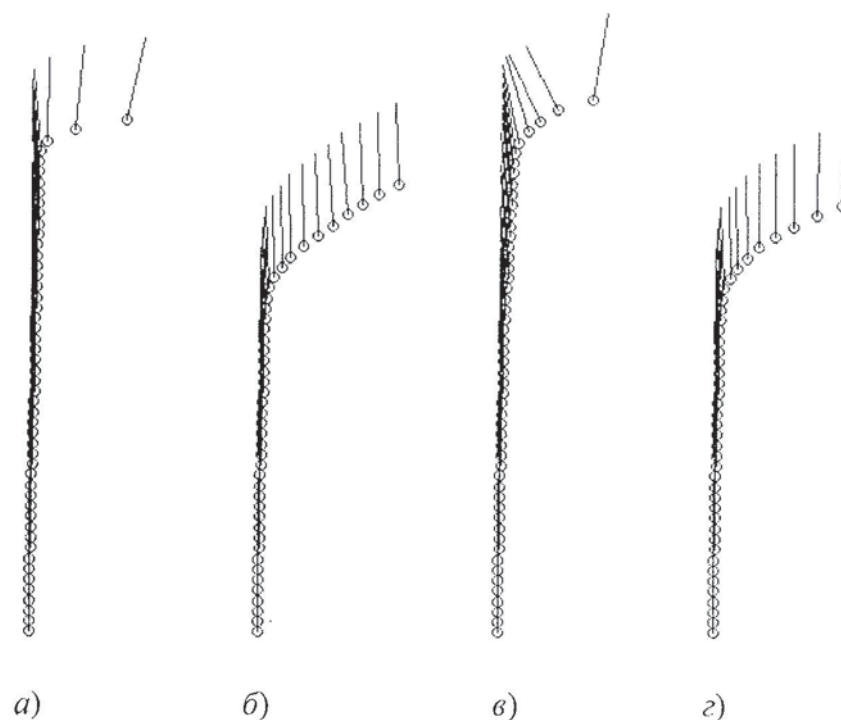


Рис. 6. Траектории движения автомобиля, управляемого виртуальным водителем, на режиме прямолинейного движения под действием возрастающей боковой внешней силы F_y ; а — управление сходимением на всех осях; б — без управления сходимением; в — управление сходимением колес на передней оси; г — управление сходимением на задней оси

Исследование зависимости траектории движения автомобиля в указанных условиях в функции свойства поворачиваемости автомобиля приводит к выводу, что на рассматриваемом режиме различия в этом свойстве практически оказывают достаточно малое влияние на устойчивость движения автомобиля.

Рассмотрено также влияние управления сходимением на траектории движения автомобиля в функции продольной координаты центра давления ветровой нагрузки. В зависимости от характера геометрии бокового профиля автомобиля центр давления может перемещаться примерно от передней оси автомобиля (свободный тягач) до задней оси (что может быть определено характером геометрии перевозимого груза).

Проанализировав влияние положения центра давления от ветровой нагрузки на устойчивость движения автомобиля, приходим к выводу, что наилучшим случаем располо-

жения центра давления является его положение в районе передней оси (рис. 7). На графиках видно, что в этом случае потеря устойчивости движения наступает наиболее скоро. Наилучший результат по сохранению траектории движения получается при положении центра давления в центре тяжести автомобиля. Во всех этих примерах центр тяжести автомобиля находится в геометрическом центре автомобиля, посередине между его осями. Здесь также уместно сравнить значения боковых сил, при которых наступает потеря устойчивости движения автомобиля. В зависимости от расположения центра давления наибольшая боковая сила без потери устойчивости автомобиля в случае управляемого схождения составляет 8598 Н, наихудшая — 4580 Н. В режиме с неуправляемым схождением соответствующие цифры — 5800 Н и 3500 Н.

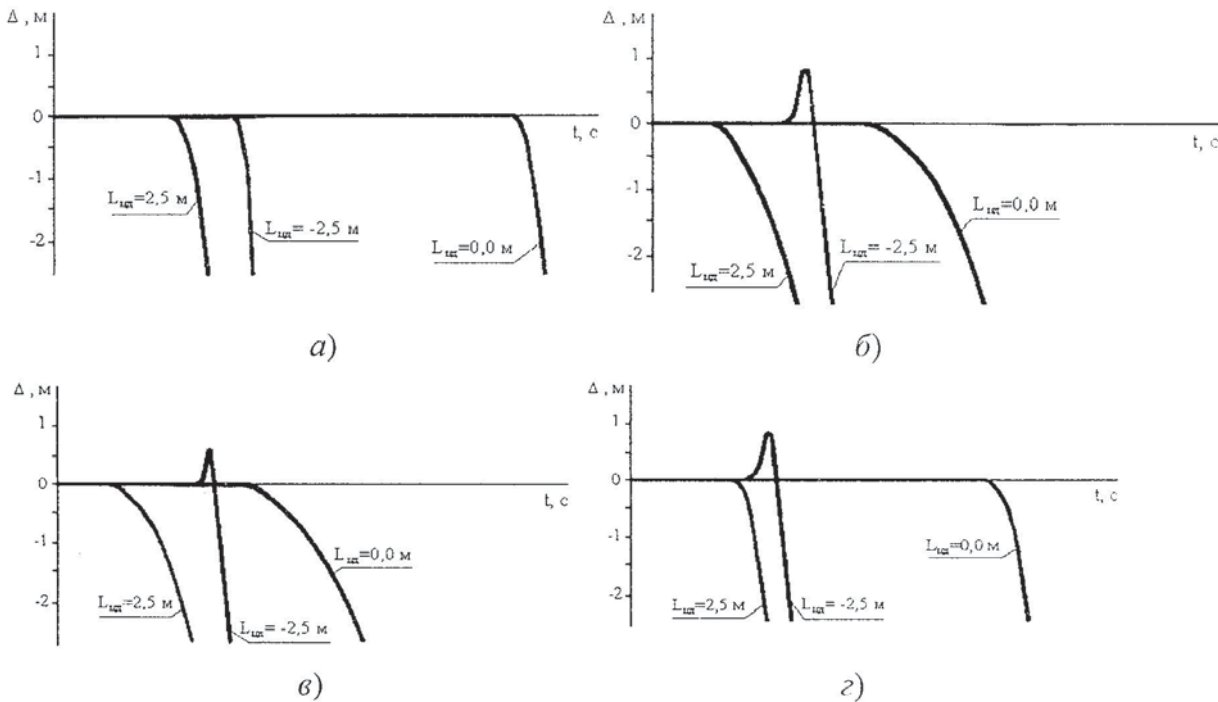


Рис. 7. Отклонения траектории автомобиля, управляемого виртуальным водителем, от прямой линии при различных положениях центра давления боковой ветровой нагрузки F_y : а — управление схождением колес на передней оси; б — управление схождением на задней оси; в — без управления схождением; г — управление схождением на задней оси

Рассматривая влияние комбинаций управления схождением колес по осям на устойчивость движения автомобиля констатируем, что наилучший результат в этих режимах дает применение управления схождением на передней оси (рис. 7), что позволяет выдерживать боковую силу до 9300 Н, против предельно выдерживаемой силы в 4580 Н при неуправляемом схождении на всех осях. Таким образом, в процентном отношении увеличение выдерживаемой без потери устойчивости боковой силы составляет 102 %.

Следует также указать, что в рассмотренных режимах наихудший результат получается при управлении схождением только на одной задней оси.

Режим управления схождением на всех осях в данном случае не позволяет получить максимальную эффективность. Эго эффективность может быть оценена как 87 % по отношению к режиму неприменения САРС. В случае применения САРС только на передней оси эффективность этого мероприятия может быть оценена как 102 % по отношению к режиму неприменения САРС.

Управление схождением на передней оси дает предпочтительные результаты при любом расположении центра давления. Эффективность влияния управления схождением на устойчивость возрастает с удалением центра давления от геометрического центра автомобиля в сторону передней оси.

Следует также отметить различный характер потери устойчивости при различных положениях центра давления. В случаях с расположением центра давления в центре автомобиля и в районе передней оси на графиках процессы изменения отклонений идентичны и монотонны. Характерным является график отклонения траектории автомобиля от прямой линии при расположении центра давления в районе задней оси. В этом варианте движения отклонение происходит сначала против направления действия боковой силы, и только позже машина начинает двигаться в направлении действия указанной силы. Значение первоначального отклонения от траектории в сторону противоположную направлению действия боковой силы увеличивается с увеличением сдвига центра давления от центра тяжести автомобиля в сторону задней оси. Важный для настоящей работы вывод, который можно сделать на основании анализа представленного материала, что применение управления схождением существенно повышает устойчивость движения автомобиля на режимах с неблагоприятным расположением центра давления (ближе к передней или задней осям).

Подводя итог анализу применения регулирования схождения на рассмотренных режимах, можно констатировать, что для получения наивысшего положительного эффекта необходимо применить алгоритм работы САРС, позволяющий включать регулирование схождения на всех осях или на какой либо одной оси в зависимости от текущего режима движения.

Выводы

1. На режимах движения автомобиля накатом, характеризующихся отсутствием продольного усилия на шине, в прямолинейном движении и, главное, на режиме криволинейного движения, одним из немногих оставшихся средств повышения устойчивости остается регулировка схождения.

2. Для получения наибольшей эффективности повышения устойчивости автомобиля САРС должна быть применена как для передних колес, так и для задних. В зависимости от режима движения управление схождением должно осуществляться либо на одной какой-то оси, либо на всех осях, в отдельных случаях от управления схождением можно отказаться (это, прежде всего, при малых скоростях на усовершенствованных дорогах).

3. На автомобилях, не оборудованных САРС, при движении на прямой под действием боковой внешней силы боковые реакции колес являются следствием конструктивных параметров и режима движения. Значения этих реакций отличаются существенно от значений, обеспечивающих наилучшую устойчивость.

4. Алгоритм работы САРС при движении накатом по прямой с боковой внешней силой должен быть направлен на поддержание пропорциональности вертикальной и боковой реакций.

5. На рассчитанных режимах выдерживаемая автомобилем с регулируемым схождением боковая сила увеличивается на 57 %. На отдельных режимах это увеличение может достигать 102 %.

6. Применение САРС снижает требования к характеристикам привода рулевого управления и подвески (прежде всего требования к кинематическим характеристикам), что облегчает проектирование конструкции.

7. САРС органично дополняет многочисленные, теперь уже существующие системы автоматического регулирования, примененные на автомобиле (АБС, ПБС, электронная система стабилизации). С некоторыми из них работа системы управления сходимением может быть связана алгоритмически.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рязанцев В. И. Автоматическое регулирование угла схождения колес при движении автомобиля. Автомобильная промышленность, 2003. — №10. — С. 38—40.
2. Рязанцев В. И. Повышение активной безопасности автомобиля введением автоматически управляемого схождения. «Мехатроника, автоматизация, управление». — Новые технологии, 2004. — № 9. — С. 40—47.

629 113

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ МАШИН ПО СНЕГУ

Канд. техн. наук, доц. А.А. АНИКИН, д-р техн. наук, проф Л.В. БАРАХТАНОВ,
канд. техн. наук И.О. ДОНАТО

Рассмотрены известные зависимости для расчета силы сопротивления качению колеса в зависимости от смятия грунта. Показано, что при движении по реально залегающим снегам использование их в чистом виде приводит к большим погрешностям. Получены выражения для определения сопротивления качению по снегу жесткого колеса и пневматической шины.

The known dependencies are considered for calculation of power of the resistance to swing travel about from compressions soil. It is shown that when moving on real lying snow use them in clean type brings about big inaccuracy. Expressions are received for determination of the resistance to swing on snow hard travel about with pneumatic tire.

Одной из первых зависимостей для расчета силы сопротивления качению колеса от смятия грунта является формула, предложенная Вюстом [1],

$$P = K\sqrt{DB}, \quad (1)$$

где D — диаметр колеса; B — ширина обода; K — постоянный коэффициент, $K = 2/3k\sqrt{H^3}$, k — сопротивление грунта взаимодействию; H — глубина колеи, которая определялась из формулы Берстнера [1]

$$H = \sqrt[3]{\frac{9Q^2}{4B^2D^2k^2}}; \quad (2)$$

здесь Q — нагрузка на колеса.

На основе широких экспериментальных работ М.Н. Летошневым получена зависимость для определения силы сопротивления качению от деформации грунта [2]