Имамов И.А., Новодворский А. С.

Прогнозирование поведения гоночного автомобиля и вычисление оптимальных значений настроек методом математического моделирования

(Россия, Москва)

doi: 10.18411/lj-01-2019-129

idsp: ljjournal-01-2019-129

Аннотация

В рамках данной научной работы исследованы основные параметры, характеристики и факторы, влияющие на движения колесной машины, спортивное управление автомобилем, объективные и субъективные факторы, влияющие на спортивное вождение, идеальная геометрия и распределение масс гоночного автомобиля с передним приводом. Разработана программа в среде MATLAB Simulink, которая позволяет, варьируя входными данными автомобиля и внешних условий, определить характер поведения автомобиля и понять влияние каждого параметра на результаты прохождения поворотов категорий 1-6 еще до постройки автомобиля. В статье приведены основные сведения о расчетах динамики автомобиля и результаты моделирования для автомобиля Лада «Калина».

Ключевые слова: динамика автомобиля, настройка гоночного автомобиля, постройка гоночного автомобиля, моделирование движения автомобиля, прогнозирование поведения автомобиля.

Abstract

Within this scientific work, the main parameters, characteristics and factors affecting the movement of a wheeled car, sports car control, objective and subjective factors affecting sports driving, ideal geometry and mass distribution of a front-wheel drive race car are investigated. The developed in MATLAB Simulink programme allows, varying the input data of the car and the external conditions, to determine the behavior of the car and understand the impact of each parameter on the results of cornering in categories 1-6 before the car construction. The article provides basic information about the calculations of the dynamics of the car and the simulation results for the car Lada Kalina.

Key words: vehicle dynamics, setting up a race car, construction of a race car, simulation of driving a racing car, the prediction of the behavior of the car

1. Теория движения автомобиля

Трассы и их участки, используемые для проведения автомобильных гоночных соревнований или спокойного движения автомобилей, классифицируются:

- длина (протяженность) и ширина;
- скоростной режим;
- тип дорожной поверхности (асфальт, бетон, гравий, булыжник, грунт, песок, снег, лед);
- категория (от 0 до 7; одиночные или повторяющиеся простые и сложные повороты).

Трассу и ее части разделяют на участки, состоящие из элементов разной сложности: торможение, вход в поворот, криволинейное движение (поворот) с установившимся или переменным углом поворота руля, выход из поворота, ускорение до скорости, после которой следует следующий элемент трассы. Криволинейное движение колесной машины (далее «КМ»), реализуемое под управлением водителя, называется поворотом. Свойство КМ совершать повороты с максимальной кривизной и минимальным радиусом называется поворотливостью.

Рисунок 1 – Упрощение схема криволинейного движения КМ

На колесо от корпуса автомобиля и со стороны опорной поверхности (далее «ОП») действуют силы и реакции. Под действием сил и моментов происходит перемещение (деформация) обода колеса относительно контактной площадки и скольжение (сдвиг) последней относительно ОП.

При качении эластичного колеса под действием боковой силы по прямолинейной траектории происходит силовой увод, особенностью которого является боковая деформация оболочки шины в области контакта. Этим вызвано движение катящегося колеса одновременно со скоростями $V_{кy}$ (плоскости симметрии колеса) и $V_{кx}$ (перпендикулярно этой плоскости). Вектор скорости центра обода отклоняется от плоскости вращения на определенный угол δ , называемый углом бокового увода. Отклонение вектора скорости V_k эластичного колеса от плоскости его вращения при действии любой боковой силы P_y называется боковым уводом, а отклонение вектора скорости, вызванное действием только боковой силы – силовым уводом колеса.

Рисунок 2 – Расчетные схемы сил, действующих на колесо при силовом уводе в продольно-вертикальной (а) и в поперечно-вертикальной (б) плоскостях колеса, в горизонтальной плоскости обода и пятне контакта колеса с ОП (в).

Рассмотрим криволинейное движение КМ в подвижной системе координат с центром $C_{пд}$, совпадающим с центром подрессоренной массы, и осью $X_{C_{пд}}$, совпадающей с продольной осью симметрии КМ и направленной в сторону ее движения.

Кинематический центр поворота $O_{кин}$ – точка пересечения линий, проведенных из центров поворотных колес перпендикулярно их плоскости симметрии (вращения). Минимальное расстояние от точки $O_{кин}$ до оси симметрии КМ называют кинематическим радиусом поворота $R_{кин}$, а расстояние от полюса $O'_{кин}$ рулевого управления до задней оси КМ – смещением $x_{кин}$ полюса рулевого управления. Под воздействием внешних боковых сил при криволинейном движении на эластичных колесах возникает эффект бокового увода, при этом векторы скоростей V_{kij}

отклоняются от плоскостей их вращения на углы увода δ_{ij} , а положение мгновенного центра вращения смещается в точку O_{Π} .

Рисунок 3 – Расчетная схема криволинейного движения КМ в подвижной системе координат $X_{C_{пд}}$ $Y_{C_{пд}}$

Углы увода колес вычисляют с помощью уравнений:

$$\delta_{i\text{ вн}} = \delta_{i2} = \theta_{i\text{ вн}} - \arctg\left(\frac{L-x_{\Pi}-l_{1i}}{R_{\Pi}-0,5B}\right); \quad (1.01)$$

$$\delta_{i\text{ н}} = \delta_{i1} = \theta_{i\text{ н}} - \arctg\left(\frac{L-x_{\Pi}-l_{1i}}{R_{\Pi}+0,5B}\right); \quad (1.02)$$

Для упрощения расчетов рассматривают «велосипедную схему», когда два колеса одной оси приводят к одному, расположенному на продольной оси симметрии КМ.

Радиус поворота при велосипедной схеме вычисляют с помощью уравнения:

$$R_{\Pi} = L/[tg(\theta_1 - \delta_1) + tg(\theta_n + \delta_n)]; \quad (1.03)$$

Смещение полюса поворота вычисляют с помощью уравнения:

$$x_{\Pi} = R_{\Pi}tg(\theta_n + \delta_n); \quad (1.04)$$

Угловая скорость поворота КМ вычисляют с помощью уравнения:

$$\omega_{мz} = v_{мx}/R_{\Pi}; \quad (1.05)$$

Угловое ускорение поворота КМ вычисляют с помощью уравнения:

$$\varepsilon_{мz} = a_{мx}/R_{\Pi}; \quad (1.06)$$

Центр поддресоренных масс $C_{пд}$ совершает сложное движение в горизонтальной плоскости $X_{C_{пд}}$ $Y_{C_{пд}}$, состоящее из кругового движения центра масс $C_{пд}$ относительно поворота O'_{Π} и кругового движения полюса O'_{Π} относительно мгновенного центра поворота O_{Π} .

Скорость центра масс $C_{пд}$ вычисляется с помощью уравнения:

$$v_{C_{пд}x} = v_{мx}; v_{C_{пд}y} = \omega_{мz}l_{C_{пд}O'_{\Pi}}; \quad (1.07)$$

Ускорение центра масс $C_{пд}$ вычисляется с помощью уравнения:

$$a_{C_{пд}x} = a_{мx} - l_{C_{пд}O'_{\Pi}}\omega_{мz}^2; a_{C_{пд}y} = v_{мx}\omega_{мz} + l_{C_{пд}O'_{\Pi}}\varepsilon_{мz}; \quad (1.08)$$

При постоянных углах поворота θ_i управляемых колес и различных углах увода δ_i положение мгновенного центра поворота O_{Π} изменяется.

Свойство КМ изменять кривизну траектории под действием внешних сил при зафиксированном рулевом управлении называется поворачиваемостью.

Категории поворачиваемости:

- нейтральная, если кривизна траектории при действии боковой силы постоянная, но изменяется положение полюса поворота.
- недостаточная, если кривизна траектории при действии боковой силы уменьшается и изменяется положение полюса поворота.

- избыточная, если кривизна траектории при действии боковой силы увеличивается и положение полюса поворота изменяется.

Рисунок 4 – Схемы изменения параметров криволинейного движения КМ при нейтральной (а, г, ж), недостаточной (б, д, з) и избыточной (в, е, и) поворачиваемости.

Кроме нормальных деформаций по причине существенного перераспределения нормальных нагрузок по бортам колес их наклон на угол γ_{ky} определяется кинематикой направляющих элементов системы поддрессоривания, при этом углы наклона γ_{ky} и увода δ_γ могут быть как положительными, так и отрицательными.

Чтобы обеспечить устойчивое прямолинейное движение КМ и уменьшить колебания колес их устанавливают с развалом и схождение. При наклоне плоскости колеса относительно продольно-вертикальной плоскости на угол поперечного наклона (развала) γ_{ky} по причине боковой деформации шины возникает дополнительная боковая реакция:

$$R_{y\gamma} = R_z \tan \gamma_{ky}; \quad (1.09)$$

Наклоненное колесо всегда стремится катиться с уводом в сторону наклона под углом δ_γ .

Проанализируем этапы криволинейного движения на примере двухосной КМ с одной передней управляемой осью (велосипедная схема), приводя колеса бортов осей к условным, установленным в плоскости симметрии КМ. Момент сопротивления повороту КМ находим по формуле:

$$M_{\text{сп м}} = M_{\text{сп о1}} + M_{\text{сп о2}} + \sum_{i=1}^{n_0} \sum_{j=1}^2 M_{\text{сп ij}}; \quad (1.10)$$

Рисунок 5 – Расчетная схема криволинейного движения двухосной КМ

Массы, распределенные по осям:

$$m_{o1} = m_m l_2 / L; \quad m_{o2} = m_m l_1 / L; \quad (1.11)$$

Преобразовав уравнения 1.18 и 1.19 получаем

$$R_{y1} = \frac{m_{o1} v_{mx}^2}{R_{II}} + \frac{m_m (l_2^2 + \rho_m^2 z) \epsilon_{mz}}{L \cos \theta_1} + \frac{M_{\text{сп м}}}{L \cos \theta_1} - R_{x1} \tan \theta_1; \quad (1.12)$$

$$R_{y2} = \frac{m_{o2} v_{mx}^2}{R_{II}} + \frac{m_m (l_1 l_2 - \rho_m^2 z) \epsilon_{mz}}{L} - \frac{M_{\text{сп м}}}{L}; \quad (1.13)$$

Из уравнения (1.21) и (1.22) делаем выводы о влиянии следующих факторов на боковые реакции осей КМ:

1. При движении с постоянной скоростью по кривой постоянной кривизны боковая составляющая силы инерции распределяется пропорционально массам, приходящимся на соответствующие оси.
2. При положительном ускорении реакция R_{y1} увеличивается, а направление реакции R_{y2} определяется величиной $(l_1 l_2 - \rho_{Mz}^2)$, которая может быть, как положительной, так и отрицательной, поскольку для КМ $\rho_{Mz}^2 / (l_1 l_2) = 0,8..1,2$.
3. При увеличении угла поворота θ_i (вход в поворот) угловая скорость $\dot{\theta} > 0$ и реакция R_{y1} увеличивается, а при уменьшении угла ТЕТА1 (выход из поворота) $\dot{\theta} < 0$ и реакция R_{y1} уменьшается. Знак составляющей боковой реакции R_{y1} может меняться в зависимости от отношения $\rho_{Mz}^2 / (l_1 l_2)$.
4. Момент сопротивления повороту $M_{спм}$ увеличивает боковую реакцию на передней оси и уменьшает на задней.
5. Положительная продольная реакция R_{x1} на передней оси снижает боковую реакцию R_{y1} и не влияет на R_{y2} . Причем, чем больше угол поворота колес передней оси, тем меньше реакция R_{y1} .

Рисунок 6 – Изменение боковых реакций на первой (а) и второй (б) оси КМ при входе (I), движении с постоянным радиусом (II) и выходе (III) из поворота.

2. Спортивное управление автомобилем

2.1 Гоночная трасса, оптимальная траектория

Оптимальная траектория является идеальной замкнутой линией по которой рекомендуется двигаться гонщику. Так как ее геометрия определена совместно наивысшей средней скоростью и минимальным временем прохождения трассы, она характерна высоким «держакom» - параметром дорожного полотна, вызванным многократным прохождением автомобилей с износом покрышек, оставляющих частицы разложения в маленьких и больших открытых углублениях трассы.

2.2 Классификация поворотов.

Все существующие повороты можно разделить на три группы: простые, сложные, опасные.

Для простых поворотов радиус кривизны постоянен, а для сложных он может меняться. Простые повороты различаются только направлением движения (левый, правый) и крутизной траектории. Разновидностей сложных поворотов достаточно много: плавный, резкий, длинный, крутой, сочлененный, S-образный и другие.

Рисунок 7 - Классификация поворотов по углу и кривизне.

2.3 Траектория движения и ее фазы

При движении в повороте важно правильно выбрать траекторию. Оптимальной траекторией является не симметричная «правильная» дуга, а такая, которая позволит начать более ранний и интенсивный разгон, так как динамика торможения автомобиля всегда больше динамики его ускорения.

При прохождении поворота способом «глубокий вход» автомобиль движется по наружной стороне поворота, при этом необходимо как можно дальше проехать, удерживая колеса в положении «прямо» до начала маневра.

Тактика прохождения поворота:

1. Использование всей ширины дорожного полотна: на входе и выходе автомобиль должен двигаться по внешней стороне трассы;
2. Точка приближения к внутренней границе трассы должна быть насколько возможно дальше по направлению движения.

Прохождение поворотов важно реализовывать, имея только 3 точки контакта (3 колеса, причем их выбор обусловлен типом привода автомобиля). После прохождения поворота необходимо вернуть автомобиль в положение, когда он имеет 4 точки опоры, что позволяет добиться одинаковой загрузки колес левого и правого бортов. Стоит напомнить, что развесовка между передней и задней осью определяется исходя из типа привода, кинематики рулевого управления и подвески.

3. Рекомендации по настройке переднеприводного гоночного автомобиля.

У гоночного автомобиля особое значение имеет тип привода. У переднеприводного автомобиля, масса которого в неснаряженном состоянии равна 1000 кг, нагрузки на оси распределены в соотношении $i=60/40$ или близком к этому, нагрузка на переднюю ось составляет примерно 600 кг.

На современных легковых автомобилях класса «В» на переднем мосту устанавливается независимая подвеска типа «Макферсон» с реечным рулевым управлением с задним рулевым трехзвенником, а на заднем мосту – полузависимая подвеска с сопряженными рычагами, независимая подвеска на продольных рычагах или многорычажная независимая подвеска.

С помощью изменения установочных параметров рулевого механизма, подвески переднего и заднего мостов можно добиться избыточной, нейтральной или недостаточной поворачиваемости автомобиля. Каждый гонщик настраивает данный параметр своего автомобиля исключительно под себя.

Так как начальные установочные параметры передних колес соответствуют отрицательному развалу (направленному внутрь автомобиля), то при движении в повороте при крене автомобиля колеса не переходят в зону положительного развала и сохраняют максимальное сцепление и значения продольных и поперечных реакции колеса с дорогой.

При движении в установившемся повороте, когда происходит крен кузова автомобиля, колеса задней оси незначительно изменяют угол наклона относительно поперечной плоскости симметрии автомобиля в сторону положительного развала, что увеличивает угол увода и увеличивает избыточную поворачиваемость, что наиболее выгодно при прохождении поворотом большой крутизны на малой скорости.

В процессе поворота под действием центробежной силы кузов передает усилие на колесо, контактирующее с дорожной поверхностью. В результате создается момент, изгибающий колесо в направлении положительного развала. Тем самым в зависимости от изначальных параметров установки колес задней оси можно получить разные характеристики передачи усилия со стороны дороги от угла крена или хода подвески.

4. Идеальная геометрия и распределение массы гоночного автомобиля с передним приводом колес.

Для расчетов был выбран автомобиль марки Лада «Калина» с распределением массы автомобиля по осям – 659 кг на переднюю ось и 432 кг на заднюю ось, при условии полной массы 1091 кг, развесовкой 60,4% на переднюю ось и 39,6% на заднюю ось. Для переднеприводного гоночного автомобиля, оснащенного каркасом безопасности, идеальной развесовкой является: 70% на переднюю ось (по 35% на каждое колесо) и 30% на заднюю ось (по 15% на каждое колесо). Такое распределение массы позволяет уменьшить потери сцепления во всех фазах прохождения поворотов любой категории.

Расчетная масса автомобиля имеет 1030 кг. Построив математическую модель выбранного автомобиля с учетом всех параметров и установочных углов подвески рулевого управления, в том числе переменные значения плеча крена левого и правого передних колес, вычисляем идеальное распределение массы на колеса при определенном положении среднего колеса передней оси, используя дублирующую велосипедную схему. В результате расчетов развесовка составила 67% на переднюю ось и 33% на заднюю ось, что близко к идеальному.

5. Результаты расчетов математической модели в программном пакете MATLAB Simulink.

Задаем кинематику подвески и рулевого управления автомобиля, вводим данные физических свойств шин, категории поворота (с 1-го по 6-ой) и траектории движения (поворотом рулевого колеса), определяем скоростные режимы и отслеживаем состояние всех параметров автомобиля.

Рисунок 8 – Категории поворотов

Рисунок 9 – Поворот категории 1, траектория движения

Рисунок 10 – Поворот категории 1, скорость КМ

Рисунок 11 – Поворот категории 1, моменты вращения

Рисунок 12 – Поворот категории 1, скорости вращения

Рисунок 13 – Поворот категории 1, углы вращения

Рисунок 14 – Поворот категории 1, ускорения

Рисунок 15 – Поворот категории 1, нормальные силы в пятне контакта

Рисунок 16 – Поворот категории 1, уводы в пятне контакта

Рисунок 17 – Поворот категории 2, траектория движения

Рисунок 18 – Поворот категории 2, скорость КМ

Рисунок 19 – Поворот категории 2, моменты вращения

Рисунок 20 – Поворот категории 2, скорости вращения

Рисунок 21 – Поворот категории 2, углы вращения

Рисунок 22 – Поворот категории 2, ускорения

Рисунок 23 – Поворот категории 2, нормальные силы в пятне контакта

Рисунок 24 – Поворот категории 2, уводы в пятне контакта

Рисунок 25 – Поворот категории 3, траектория движения

Рисунок 26 – Поворот категории 3, скорость КМ

Рисунок 27 – Поворот категории 3, моменты вращения

Рисунок 28 – Поворот категории 3, скорости вращения

Рисунок 29 – Поворот категории 3, углы вращения

Рисунок 30 – Поворот категории 3, ускорения

Рисунок 31 – Поворот категории 3, нормальные силы в пятне контакта

Рисунок 32 – Поворот категории 3, уводы в пятне контакта

Рисунок 33 – Поворот категории 4, траектория движения

Рисунок 34 – Поворот категории 4, скорость КМ

Рисунок 35 – Поворот категории 4, моменты вращения

Рисунок 36 – Поворот категории 4, скорости вращения

Рисунок 37 – Поворот категории 4, углы вращения

Рисунок 38 – Поворот категории 4, ускорения

Рисунок 39 – Поворот категории 4, нормальные силы в пятне контакта

Рисунок 40 – Поворот категории 4, уводы в пятне контакта

Рисунок 41 – Поворот категории 5, траектория движения

Рисунок 42 – Поворот категории 5, скорость КМ

Рисунок 43 – Поворот категории 5, моменты вращения

Рисунок 44 – Поворот категории 5, скорости вращения

Рисунок 45 – Поворот категории 5, углы вращения

Рисунок 46 – Поворот категории 5, ускорения

Рисунок 47 – Поворот категории 5, нормальные силы в пятне контакта

Рисунок 48 – Поворот категории 5, уводы в пятне контакта

Рисунок 49 – Поворот категории 6, траектория движения

Рисунок 50 – Поворот категории 6, скорость КМ

Рисунок 51 – Поворот категории 6, моменты вращения

Рисунок 52 – Поворот категории 6, скорости вращения

Рисунок 53 – Поворот категории 6, углы вращения

Рисунок 54 – Поворот категории 6, ускорения

Рисунок 55 – Поворот категории 6, нормальные силы в пятне контакта

Рисунок 56 – Поворот категории 6, уводы в пятне контакта

Данное научное исследование проводится при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «УМНИК» по теме «Исследования и разработка системы прогнозирования поведения гоночного автомобиля и вычисления оптимальных значений настроек для достижения лучших результатов» в рамках договора №10903ГУ/2016 от 29.12.2016г

1. Теория движения полноприводных колесных машин: учебник / В. В. Ларин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 391, [1]с.: ил.
 2. Теория механизмов и машин. Курсовое проектирование: учеб. пособие / под ред. Г. А. Тимофеева и Н. В. Умнова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 154, [2]с.: ил.
 3. Проектирование полноприводных колесных машин: Учебник для вузов: П79 В 3 т. Т. 2 / Б.А. Афанасьев, Л.Ф. Жеглов, В.Н. Зузов и др.; Под ред. А.А. Полунгяна. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 528 с.: ил.
 4. Шасси автомобиля: Конструкция подвесок. Й. Рампель / Пер. с нем. В.П. Агапова. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.: ил.
 5. Шасси автомобиля: Элементы подвески. Й. Рампель / Пер. с нем. А.Л. Карпухина; Под ред. Г.Г. Гридасова. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.: ил.
 6. Шасси автомобиля: Амортизаторы, шины и колеса. Й. Рампель / Пер. с нем. В.П. Агапова; Под ред. О.Д. Златовратского. – М.: Машиностроение, 1986. – 320 с.: ил.
 7. Экстремальное вождение. Гоночные секреты. М. Г. Горбачев – М.: Рипол Классик, 2007. – 304 с.: ил.
-