ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОДВЕСОК ГОНОЧНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

MAIN FEATURES OF THE DESIGN OF RACING CAR SUSPENSIONS

УДК: 629.33

Губанов Александр Александрович, Студент 2-го года обучения по программе специалитета кафедры “Колесные машины”, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005, РФ, г. Москва, Басманный район, ул. 2-я Бауманская, д5. E-mail: allosaurusmaximusattrox@gmail.com

Gubanov Alexander, Student of the 2nd year of study in the specialty program of the department "Wheeled vehicles”, Bauman Moscow State Technical University, 105005, Russian Federation, Basmanny district, 2-ya Baumanskaya str., d5

Аннотация

Данная статья является вводной для цикла статей, посвященного инженерным особенностям конструкций гоночных и спортивных автомобилей. В основном он будет посвящен подвеске и смежным с ней элементам и системам. С каждой статьей будут более подробно и детально раскрыты особенности методов расчета и поведения этой системы.

В статье затронуты как всем известные понятия, так и специализированные понятия, применимы, по большей части, к спортивным автомобилям. Для удобства были введены оригинальные классификации и трактовка некоторых явлений. В самой работе подробно разобраны поведение спортивного автомобиля на трассе, его развесовка и особенности разных массовых моделей. Разобран эффект перераспределения масс как для автомобиля в целом, так и для

подвески в частности. Представлены основные характеристики спортивной шины, необходимые для расчета и проектирования подвески. В заключительной части статьи были разобраны центры крена и перечислены основные параметры необходимые для проектировки подвесок спортивного назначения.

Annotation

This article is an introduction to a series of articles devoted to the engineering features of the designs of racing and sports cars. It will mainly focus on the suspension and related elements and systems. With each article, the features of the calculation methods and the behavior of this system will be revealed in more detail and in detail.

The article touches on both well-known concepts, and specialized concepts are applicable, for the most part, to sports cars. For convenience, original classifications and interpretations of some phenomena were introduced. In the work itself, the behavior of a sports car on the track, its weight distribution and the features of different mass models are analyzed in detail. The effect of mass redistribution is analyzed both for the car as a whole and for the suspension in particular. The main characteristics of a sports tire that are necessary for the calculation and design of the suspension are presented. In the final part of the article, the roll centers were analyzed and the main parameters necessary for the design of sports suspensions were listed.

Ключевые слова: подвеска, спортивный автомобиль, гоночная инженерий, автоспорт, клевковый эффект, центр крена, анти-геометрия.

Keywords: suspension, racing car, race engineering, motorsport, dive effect, roll center, anti-geometry.

ПОДВЕСКА СПОРТИВНОГО АВТОМОБИЛЯ

Как мы уже знаем, подвеска обеспечивает упругую связь кузова автомобиля с дорогой через шину. Она гасит колебания, возникающие во время движения. Так же она обеспечивает плавность хода и смягчает все неровности дороги во время езды. То есть для обычного гражданского автомобиля подвеска – это в первую очередь комфорт и безопасность. Вы не чувствуете всех изъянов покрытия, машина ведет себя спокойно и стабильно – все это благодаря подвеске.

В шоссейно-кольцевом автоспорте все намного сложнее. Подвеска – это не просто связь всего автомобиля с дорогой, она обеспечивает его максимально возможную скорость на трассе.

Все начинается с шины. Это отправная точка в проектировании и настройке любой спортивной подвеске. Благодаря характеристикам шины мы можем развить определенную скорость в процессе всех фаз движения автомобиля на трассе. Есть только одно “но” – это положение шины во время езды – оно не постоянное. И в каждом таком положении характеристики шины различны.

Функции спортивной подвески:

- Связь колеса с несущей системой
- Передача сил и моментов (вытекает из первого)
- Компенсация части нагрузки на несущую систему
- Обеспечение работы шины в рабочем режиме в процессе гонки
- Возможность регулировки и настройки

ПОВЕДЕНИЕ СПОРТИВНОГО АВТОМОБИЛЯ НА ТРАССЕ

Воспользуемся дедуктивным методом построения логических связей – от общего к частному. Мы разберемся в поведении спортивного автомобиля на трассе (это общее), а затем рассмотрим, что необходимо сделать (это частное), чтобы автомобиль ехал как можно быстрее.

Задача любой гонки – это проехать участок дороги (замкнутой или прямой) за кротчайшее время. В нашем случае, в случае кольцевых гонок, трассы замкнутые и состоят из прямых и поворотов, и наша цель потратить как можно меньше времени на одном круге. Для этого гонщик обязан выполнять четыре условия:

1. Разгоняться до максимально возможной скорости
2. Тормозить как можно позже и тормозить за минимально возможную дистанцию. При этом торможение – это не только нажатие педали тормоза. Так же это отпуск педали газа или поворот руля – это тоже одни из способов сброса скорости. При любом торможении масса перераспределяется между передней и задней осью – перед нагружается больше, а зад разгружается на эту же величину под действием сил инерции.

3. Проходить повороты и связки поворотов за минимально возможное время, и что самое важное на выходе из них иметь максимально возможную скорость, чтобы эта самая скорость стала преимуществом на следующей прямой.

4. Пилот едет всегда с ускорением, так как при таком раскладе средняя скорость движения выше. Езда с постоянной скорость без ускорения не используется, за редким исключением. Даже моторы настраиваются таким образом, чтобы на самой длинной прямой трассы машина ускорялась до самого конца этой прямой.

По мнению Дерека Сюварда [1], известного гоночного инженера, гоночный автомобиль – это всего лишь инструмент в руках гонщика. От того насколько он точен и зависит результат гонки. Действительно, гонщик едет быстро, если он едет на грани возможностей своего автомобиля. Если навык пилотировать на пределе достигается самим гонщиком, то предельные значения этой грани – исключительно задача инженера. Инженер проектирует и настраивает машину в строгих рамках регламента и, применяя разные технические решения, добивается компромисса между конкурирующими друг с другом целями.

Общие критерии быстрого гоночного автомобиля:

- Малая масса
- Высокая максимальная скорость
- Малое время разгона до максимальной скорости
- Малый тормозной путь
- Оптимальная прижимная сила (если разрешена)
- Хорошая поворачиваемая способность
- Низкий износ шин

И это не все критерии, а только их часть. И все они конкурируют между собой. Задача инженера добиться экстремума, сделать так, чтобы каждый из этих параметров достиг своего максимального значения при прочих равных. Так же, мы уже упомянули про настройки, они необходимы для подстройки автомобиля по стиль пилотирования гонщика и саму трассу. Если проектирование – это

основа быстрого автомобиля, то его настройка – адаптация этой основы для конкретных условий и обеспечение конкурентоспособности.

ЭФФЕКТ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАСС

Проектирование любого спортивного автомобиля – это компромисс. Само проектирование начинается с трех вещей: значение подрессоренной массы; положение центра подрессоренной массы; характеристики выбранной шины. Как только мы определились с этими параметрами, начнем разбираться с тем, что будет происходить с автомобилем при движении.

- Развесовка автомобиля [1].

Будем считать, что все наши автомобили заднеприводные или с переменным приводом на переднюю ось за исключением первого случая.

1. Front position engine mass model (англ.) – переднемоторная компоновка. Как нам известно, самая тяжелая часть автомобиля – это двигатель. От его положения в большей степени зависит положения центра масс. Переднемоторная компоновка в автоспорте используется в младших кузовных классах – машины переделаны под регламент соревнований из гражданских. Как правило это переднеприводные модели. Для них характерен занос задней оси в силу ее разгруженности. Акцент делается на вход в поворот, и как правило под сброс газа.

Распределение массы между передом и задом F/R = ~ 64% / ~ 36%

2. Front / mid. position engine mass model (англ.) – средняя переднемоторная компоновка с вывешенным мотором за переднюю ось в “салон.” Ярким примером такой компоновки является Aston Martin Vantage GT3. Как правило такие машины имеют небольшую недостаточную поворачиваемость, но спортивные подготовленные модели склонны к нейтральной. Так же известны модели с такой компоновкой, но при этом имеют большую избыточную поворачиваемую способность. Распределение массы между передом и задом F/R = ~ 50% / ~ 50%

3. Mid. position engine mass model (англ.) – средняя заднемоторная компоновка с мотором до задней оси, убранным в “салон.” Ярким

представителем этого типа являются Ferrari 458 Italia; Lamborghini Huracan; Formula 1; прототипы LMP. Они склонны к нейтральной поворачиваемости, но прослеживается небольшой недостаток на входах в поворот, но сам поворот и выход из него – это их сильная сторона.

Распределение массы между передом и задом F/R = ~ 45% / ~ 55%

4. Rear position engine mass model (англ.) – заднемоторная компоновка с вывешенным мотором за заднюю ось, “на улицу.” Ярким представителем этого класса являются почти все Porsche 911. Сейчас это самая нестандартная развесовка, но выпущенные модели имеют сильную недостаточную поворачиваемость. При управление используется прием торможения с длительным отпусканием тормоза в самом повороте – Trail-braking. Это необходимо для загрузки передней оси на входе в поворот. В скоростных поворотах задняя часть держит машину в сносе и выход является их сильной стороной. Ярко выражена избыточная поворачиваемость в скоростных поворотах. Распределение массы между передом и задом F/R = ~ 37% / ~ 63%

Нынешние тенденции показывают, что самая оптимальная гоночная развесовка с легким недостатком 44% / 56%.

- Эффект перераспределение масс.

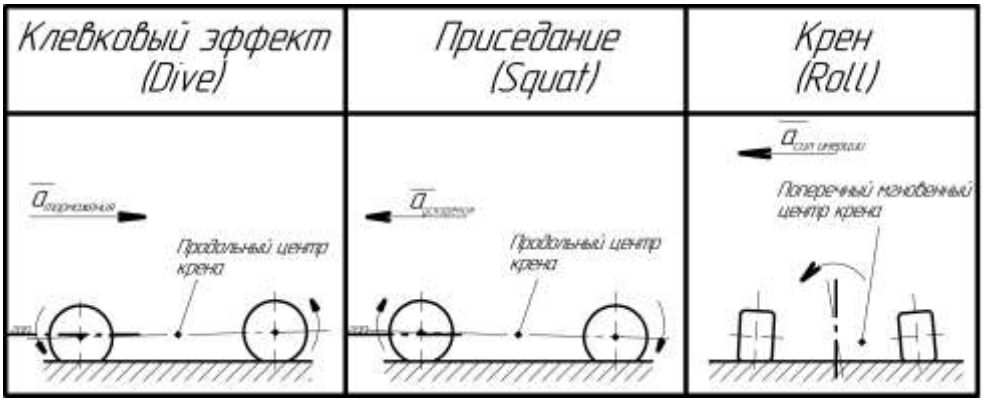
Основная сила, которая влияет на подрессоренную массу – это сила инерции. Благодаря ней корпус смещается, смещается центр масс и в следствии чего нагрузка на колесах тоже меняет свое значение. Шины тоже меняют свое положение относительно асфальта. На данный момент нам известно три основных проявление этого явления:

1. Клевковый эффект – этот эффект проявляется при торможении. Если Вы замечали, то при торможении вы стремитесь вылететь из кресла. То же самое происходит и с кузовом. Он проседает на передних пружинах, как бы клюя вниз. При этом часть массы с задней оси уходит на переднюю.

2. Приседание – этот эффект проявляется, наоборот, при ускорении. При разгоне, корпус стремится уйти назад. Таким образом он приседает на задних пружинах. Часть массы уходит с переда на зад.

3. Крен – это эффект проявляется при поворотах. При прохождении поворота, корпус стремится вывалится на внешнюю часть поворота. Таким образом масса перераспределяется между внешними и внутренними колесами.

Таблица 1: Иллюстрация эффектов перераспределения масс.



Таким образом, заметим, что эффекты перераспределения масс сопровождают автомобиль на всех стадиях его движения по трассе. Задача инженера минимизировать, все вышеперечисленные явления и их последствия. При этом, нужно учитывать, что они могут комбинироваться друг с другом. Например, торможение и поворот (крен + клевковый эффект) или разгон и поворот (крен + приседание). Самый основной метод компенсации – это сделать центр масс как можно ниже и значение его как можно меньше. Все что осталось уже корректируется настройками подвески и ее кинематикой.

СПОРТИВНАЯ ШИНА

От характеристик шины зависит возможности нашего автомобиля. Самый распространенный вид шины в автоспорте – это слик, шина без протектора. Она, как правило, имеет переменное сцепление в зависимости от ее температуры. Слики работают в узком температурном диапазоне и как бы прилипают к асфальту во время езды. Для нас будут важны следующие параметры шины:

- Коэффициент сцепления – это основной параметр шины. Это число – отношение нормальной нагрузки к поперечной (веса на колесе к максимальной силе трения в поперечном направлении). Но не нужно слепо следовать этой

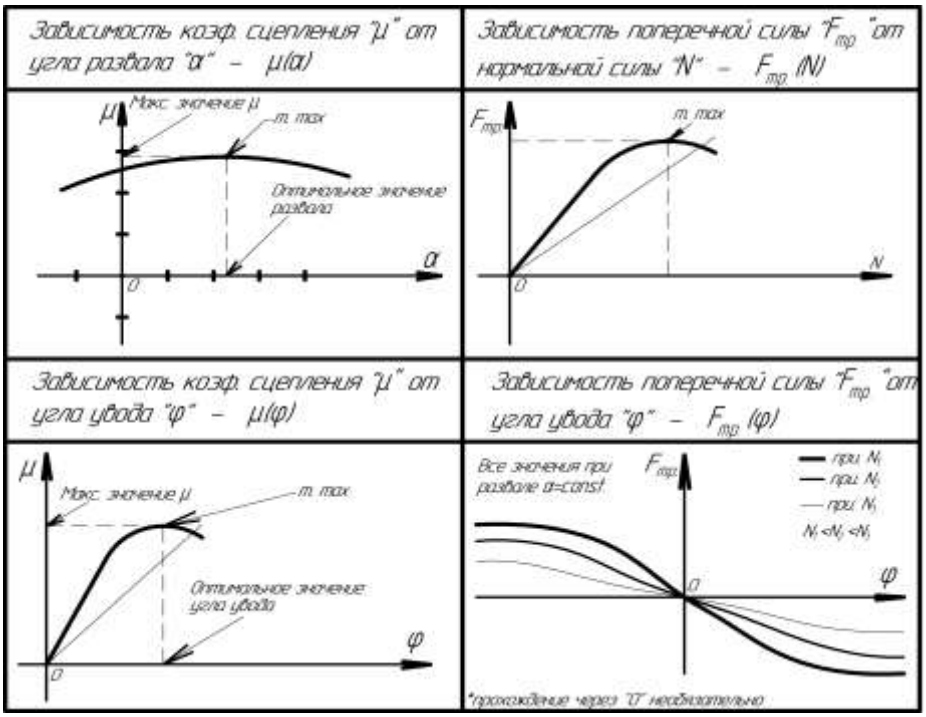
формуле. Математически, действительно, это отношение силы трения к весу, но сам коэффициент сцепления – это комплексный набор факторов, которые не учитываются в вышеизложенном отношении. Как правило для гражданской шины, это значение около 0.9, а для спортивной шины это значение около 1.4-1.6. При этом повысить коэффициент сцепления можно двумя способами: установить аэродинамическое оперение; использовать более мягкий состав. При этом нужно учитывать, что намеренное увеличение это значение влечет больший износ шины.

Сама же способность цепляться за асфальт обусловлена тремя факторами: механическое сцепление – свойство повторять неровности асфальта и “толкаться” от них; физическое сцепление – свойство эквивалентное силе трения и зависящее от коэффициента трения материалов шины и дороги; химическое сцепление – адгезионные свойства, обусловленные химическим составом шины, свойство прилипать к дороге. Будем говорить только о поперечном коэффициенте сцепления – он влияет на способность прохождения поворота. Продольный – на разгон и торможение.

- Угол увода – это еще одно фундаментальное понятие. Во время езды и особенно поворотах шина деформируется. И угол увода возникает из-за изгиба шины в поперечном направлении. То есть сам колесный диск смещается относительно пятна контакта шины с дорогой. Угол увода можно считать погрешностью теоретического поворота от фактического. То есть, если Вы повернете колеса на 8 градусов, то на самом деле вы повернете на меньшее значение. Эта разница и есть проявление угла увода шины. Его компенсация тоже достаточно важная задача для инженера. Его можно компенсировать в основном двумя способами: поставить низкопрофильную шину (высота ее профиля будет меньше и сам изгиб тоже будет меньше); использовать разные рулевые зависимости – угол Аккермана, сделать зависимость левой и правой шиной такой, чтобы угол увода компенсировался взаимным положением обоих передних колес.

Намного важнее для инженера зависимости характеристик шины друг от друга. Вся информация о шине носит название Tyres Data. Примерный графический вид основных зависимостей [1] приведен ниже в таблице 2. Опираясь на них, инженер настраивает подвеску таким образом, чтобы шина находилась в оптимальных диапазонах во время всего заезда.

Таблица 2: Примерный вид зависимостей характеристик шины друг от друга.



СПОРТИВНАЯ ПОДВЕСКА И ЕЕ ГЕОМЕТРИЯ

Выделим шесть основных “чистых” перемещений подвески, происходящих в процессе движения по гоночной трассе.

- Ход сжатия – это один из одноименных ходов подвески. Проявляется одновременным поднятием двух колес относительно кузова на какую-то величину. Как видно из названия, пружина сжимается в процессе этого перемещения. При сжатии развал стремится измениться в сторону “-“
- Ход отбоя – это тоже одноименный ход подвески, но противоположный ходу сжатия. Это одновременное опускание двух колес относительно кузова. При сжатии развал стремится измениться в сторону “+“

- Крен. Тут немного сложнее. Как мы уже выяснили – это смещения центра подрессоренной массы на внешнюю сторону поворота. Но если обратить внимание на перемещение колес – мы сможем сделать вывод, что крен – это разноименный ход подвески, где внутреннее колесо совершает отбой, а внешнее сжатие. Развал стремится в сторону разных знаков.
- Клевок (Dive (англ.)); приседание (Squat (англ.)); подъем (Lift (англ.)) – все эти явления рассматривают обе оси автомобиля одновременно.

При клевке – передняя подвеска совершает сжатие, задняя отбой. При приседании – задняя подвеска совершает сжатие, а передняя отбой. То есть формально оба этих явления представляют собой разноименный ход осей автомобиля при торможении и разгоне. А подъемом называют перемещение подвески в противоположном клевку и приседанию случаю. То есть, когда перед клюет – зад поднимается, а когда зад приседает поднимается уже перед.

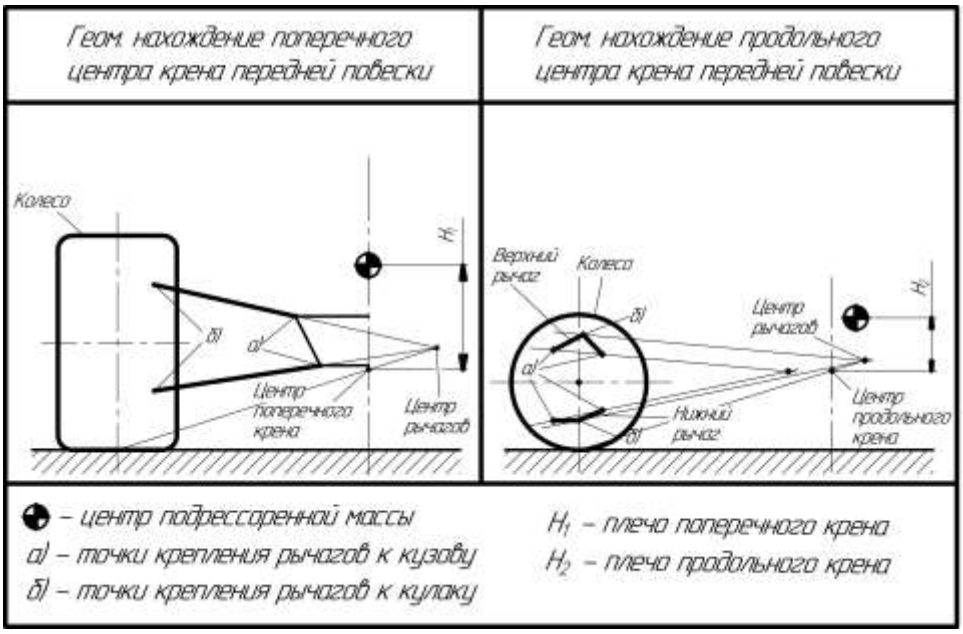
Естественно, в процессе езды все они тоже комбинируются и перестают быть “чистыми.” В спортивной подвеске проявления этих эффектов стараются свисти к минимуму. Так же стараются не допускать отрывания колес от асфальта, хотя и не всегда это получается.

Все виды перемещений определяет центр крена – это теоретическая точка является результатом геометрических построений. Она бывает поперечной – это в случае обычного крена, и продольной – в случае клевка или приседания.

- Центр поперечного крена – это динамическая точка и мгновенная для данного положения. Из-за того, что подвеска меняет свою геометрию и сама точка меняет свое положение. Для ее нахождения нам нужно для начала найти центр рычагов. Она лежит на линии пересечения верхнего рычага с нижним. Если мы соединим ее с центром кулака, то получим эквивалентную геометрическую систему. Затем, соединив ее с центром пятна контакта получим точку пересечения этой линии с центральной осью автомобиля – это и есть центр крена.
- Центр продольного крена имеет точно такое же определение, только для продольного направления. Построение аналогично с маленьким дополнением.

После построения осей рычагов, нам необходимо параллельно перенести соответствующие линии, до пересечения с внешними точками рычага, точки крепления к кулаку. Полученную точку соединить с центром пятна контакта и найти точку пересечения с вертикальной осью автомобиля. Это и есть центр продольного крена.

Таблица 3: Нахождение центров крена.



Укажем, что если мы соединим центр поперечного крена передней и задней подвески, они могу различаться по положению, то полученная линия будет носить название оси крена (roll axis (англ.)). И относительно нее будет крениться весь кузов автомобиля.

Рассмотрим особенности, проявляющиеся при наклоненной оси крена. Передний центр крена оказывает наибольшее влияние на поворачиваемость при ускорении автомобиля во время прохождения середины поворота и выхода из него.

Передний центр крена ниже заднего:

- Больше поворачиваемость при ускорении.
- Автомобиль менее отзывчив.
- Больше подходит для ровных трасс с высоким сцеплением и длинными быстрыми поворотами.

Передний центр крена выше заднего:

- Меньше управляемость при ускорении.

- Автомобиль более отзывчив.
- Используется на трассах с быстрыми изменениями направления.

Задний центр крена влияет на управляемость при ускорении и управляемость со сброшенным газом во всех фазах поворота (вход, середина, выход).

Задний центр крена ниже переднего:

- Большее сцепление при ускорении.
- Меньшее сцепление при торможении.
- Используется для предотвращения больших значений крена на входе в поворот (увеличивает заднее сцепление).
- Используется в условиях низкого сцепления.
- Уменьшает износ задних шин.

Задний центр крена выше переднего:

- Недостаточная поворачиваемость при ускорении.
- Автомобиль более отзывчив.
- Используется на трассах с быстрыми изменениями направления.

При проектировании, если мы хотим сделать значение поперечного крена минимальным, мы должны сделать плечо крена как можно меньше. При этом важно учитывать и само перемещение этой точки. Если она отклоняется на очень большое расстояние, то это не обязательно приведет к возникновению большого крена, но это может привести к не стабильному поведению автомобиля.

Из-за возникновения клевка и приседания, появилась необходимость появления анти-геометрий. Благодаря ним уменьшается плечо продольного крена как при клевке, так и при приседании. Само расположение рычагов влияет на это плечо, и тогда появляется процент анти-геометрии. Он равен отношению разности высоты центра подрессоренной массы и плеча продольного центра крена к высоте центра масс, умноженной на сто. То есть если высота центра масс 100 мм., а плечо будет равно 40 мм., то высота продольного центра крена будет равно 60 мм. Таким образом анти-клевок равен 60%. Аналогично с приседанием и подъемом.

В таблице 3, где строится поперечный центр крена, представлена анти-клевковая геометрия, так как плечо крена меньше, чем значение высоты центра масс. На глаз, так же, можно оценить, что ее процент более 50%.

Естественно, не все так однозначно. Анти-геометрия имеет как плюсы, так и минусы.

Плюсы анти-геометрий:

- Компенсация нежелательных эффектов при разгоне и торможении.
- Более высокая стабильность при езде.

Минусы анти-геометрия:

- Повышенная нагрузка на направляющие элементы.
- Меньшая чувствительность и отзывчивость автомобиля.

Инженеры, учитывая все отрицательные и положительные эффекты, получили рекомендуемые значения анти-геометрий в районе 20-30%, но встречаются и подвески с более высокими процентами вплоть до 85%

ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О ПОВОРАЧИВАЕМОЙ СПОСОБНОСТИ

На данный момент мы знаем общие положения:

- Недостаток – эффект, проявляющийся во время поворота, и сопровождающийся сносом передней оси. Формально мы можем ввести более конкретное определение – задняя ось имеет сцепление более высокое, чем передняя.
- Нейтраль – эффект, проявляющийся во время поворота, и сопровождающийся примерно одинаковыми возможностями проходить поворот как передней осью, так и задней. Машина проходит поворот без лишних сносов и заносов. Достичь его в идеале достаточно сложно, поэтому все стремятся к легкому избытку или наоборот, легкому недостатку.
- Избыток – эффект, проявляющийся во время поворота, и сопровождающийся заносом задней оси. Сцепление передних шин выше, чем задних в результате чего задняя ось не может проходить поворот и уходит в скольжение.

Но это лишь результат проявления данных способностей, но сама причина возникновения их кроется в шине и ее угле увода. Как мы уже сказали, считаем, что угол увода – это погрешность фактической кривизны поворота от теоретической. Представим классическую схему поворота для его центров [2,4]: теоретического (без углов увода) и практического (с их учетом) в таблице 4. На графике 1 покажем геометрические проявления разных поворачиваемостей.

График 1: Геометрическое проявление поворачиваемой способности.

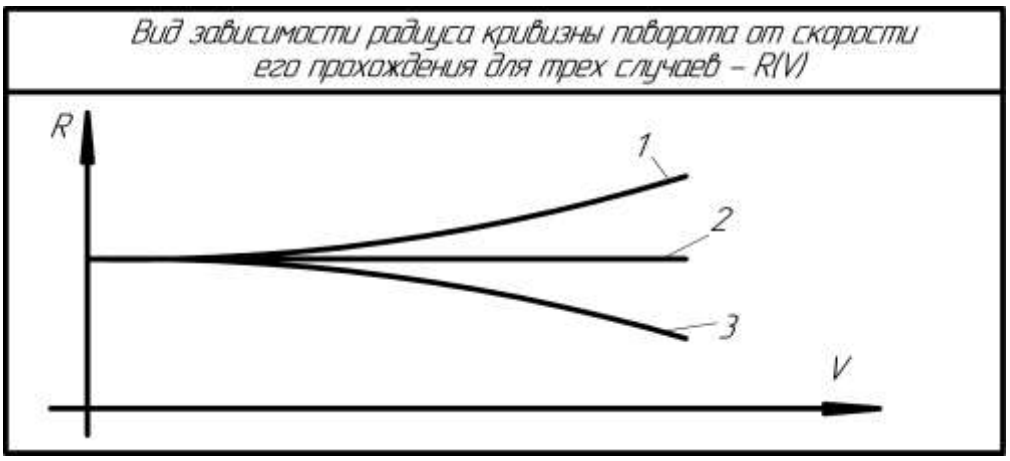
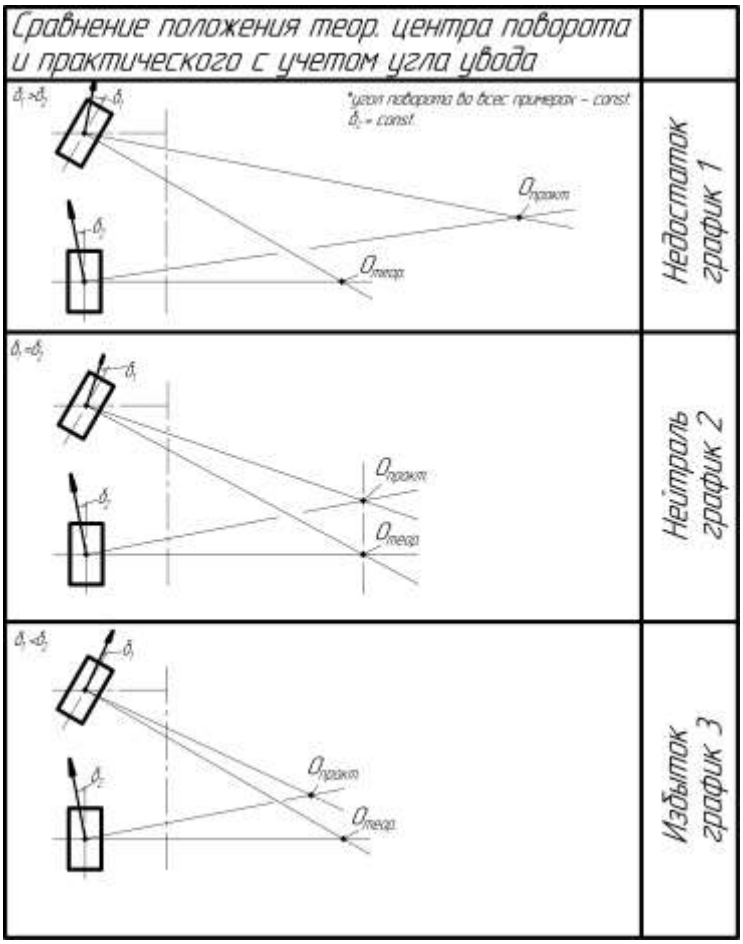


Таблица 4: Проявление поворачиваемой способности.



При недостатке, радиус кривизны поворота стремится в сторону увеличения, а при избытке радиус, наоборот, стремится в сторону минимального значения при приросте скорости.

Все это формирует понятие управляемости автомобиля – способность автомобиля точно следовать курсу управляемых колес.

Для гоночного автомобиля поворачиваемая способность должна быть смещена в сторону легкого избытка, в рамках разумных значений. Сделаем поправку, что за рулем буде подготовленный и опытный пилот, способный грамотно и эффективно воспользоваться данной особенностью.

ТРЕБОВАНИЯ К СПОРТИВНОЙ ПОДВЕСКЕ (ВЫВОД)

- Смещение центра поперечного крена должно быть минимальным. Рекомендуется использовать смещение около 50 мм. по вертикали и около 100 мм. по горизонтали. Чем больше перемещается центр крена, тем больше автомобиль приобретает нестабильность на трассе – происходит резкое

изменение поворачиваемой способности от избытка до недостатка и наоборот в процессе всей езды.

- Вертикальные и угловые перемещения должны быть минимальными, но следует избегать отрывания колес от поверхности асфальта. Это корректируется вертикальной жесткостью и угловой.

*так же достаточно действенный метод корректировки этих явлений – это проектировать подвеску с длинными рычагами.

- Поддерживать значение развала колес во время хода сжатия и хода отбоя постоянным. То есть минимизировать изменения угла постановки колес при кренах. И желательно подогнать значение этих углов под Tyres Data конкретной шины, а именно график зависимость коэффициента сцепления от угла развала.
- Приветствуется наличие анти-геометрии в районе 20-30%

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении, хотелось бы отметить, что автор попытался собрать в одной статье как можно больше информации о том, как должна выглядеть подвеска спортивного и гоночного автомобиля, опираясь на зарубежную специализированную литературу, отечественные издания, личный автоспортивный опыт, как инженера и пилота, и на знания более опытных гоночных инженеров и пилотов. Статья имеет больше обзорный теоретический характер и включает в себя базовые и важные понятия о спортивной подвеске и о гоночной инженерии в целом. В результате использования дедуктивного метода, мы провели связь от общего поведения автомобиля на трассе до более точечных и частных аспектов характеристик подвески и ее строения. В дальнейшем, цикл статей планируется направить в прикладное и практическое направление, где будут решаться задачи по проектированию и настройки подвески с учетом взаимодействия с внешними смежными системами, конечно же, опираясь на описанную выше информацию, возможно даже в более развернутой форме. От себя автор добавит, что полезно анализировать современные технологические решения, наблюдая за передовыми автоспортивными дисциплинами F1 и WEC.

Особая благодарность выражается: гоночному инженеру команды FDR Moscow, учителю и товарищу, Роману Зимову; экс-пилоту программы NISSAN, инструктору Porsche experience Russia Стасу Аксенову и старшему преподавателю кафедры “Колесные машины” Георгию Артуровичу Арутюняну за полученные знания и опыт.

“Смысл нашей жизни – это поиск экстремума” И.П. Казанджан, преподаватель высшей математики МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Консультанты статьи:

1. Р.В. Зимов – инженер подвески гоночной команды FDR Moscow
2. С.Д. Аксенов – экс-пилот NISSAN; инструктор Porsche Experience Russia
3. Г.А. Арутюнян – к.т.н.; старший преподаватель МГТУ им. Н.Э. Баумана кафедры “Колесные машины” МГТУ им. Н.Э. Баумана

Литература

1. Dereck Seward Race car Design, 2014. 271c.
2. Селифанов В.В., Хусаинов А.Ш., Ломакин В.В. Теория Автомобиля, 2007. 102с.
3. Успенский И.Н., Мельников А.А. Проектирование подвески автомобиля, 1976. 165с.
4. Ларин В.В. Теория движения полноприводных колесных машин, 2010. 388с

Literature

1. Dereck Seward Race car Design, 2014.271c.
2. Selifanov V.V., Khusainov A.Sh., Lomakin V.V. The Theory of the Automobile, 2007.102s.
3. Uspensky I. N., Melnikov A. A. Car suspension design, 1976.165 p.
4. Larin V.V. The theory of motion of all-wheel drive vehicles, 2010.388s