

Введение

Я начал писать этот сборник статей в 1991 году для газеты местного гоночного клуба. Веб тогда ещё только родился, и интернет не был так развит. Тем не менее, я распространял статьи через интернет в то время и они стали достаточно известными, особенно в обществе автокроссеров США. Первые 13 частей были написаны в 1991 году, поэтому они содержат некоторые устаревшие идеи, например использование Scheme для моделирования. Тем не мен, полный сборник статей представлен здесь в первоначальном виде. Возможно, позже я объединю и обновлю этот сборник, но сейчас я нацелен на написание новых статей. Сейчас существуют обсуждения тем, с которыми я буду пристально работать в будущем.

Основная задача этого сборника статей представить свежий взгляд на гоночную физику, который будет понятен технически заинтересованному неспециалисту. Выбранные для статей проблемы имеют разные источники. Часто они интересовывали меня при компьютерном моделировании, и так же часто они возникали на соревнованиях. Некоторые из поздних статей содержат много технической информации, но я всегда стараюсь сохранять баланс и добавлять понятные всем абстрактные рассуждения наравне с математическим анализом который может быть интересен только для специалистов. Последний в свою очередь содержит численные результаты доступные всем.

Когда я начал писать сборник я нарочно избегал общепринятый список использованных источников, предпочитая приводить свои собственные рассуждения. В последние десять лет стали доступными много первоклассных источников, книг, статей, программ, которые я стал использовать. Сначала это было забавно, но теперь пришлось переходить в реальность, и поэтому в поздних статьях я ссылаюсь на хорошо известные книги Milliken, Gillespie, Genta и Carroll Smith, а также на бесплатные пакеты моделирования, такие как RARS, TORCS и Racer.

В настоящее время тема гоночного моделирования очень активна, производительность компьютеров достаточно высока для того чтобы проводить предельно подробное моделирования гоночных автомобилей в реальном времени. Например, о реализме игры Grand-Prix Legends в 1991 году нельзя было даже подумать. Несмотря на это развитие, я продолжаю надеется что Физика Гонок будет выполнять свою первоначальную двойную роль связки практического гоночного мастерства и сложной физики, делая физику понятной для гоночных команд и их пилотов.

В заключение я хочу подчеркнуть, что этот сборник статей БЕСПЛАТНЫЙ. Права на эту статью принадлежат мне для предотвращения плагиата. Это означает что я разрешаю всем проводить передачу, использование, перевод, тиражирование в любом виде. Я прошу только не менять текст и содержание статей.

Часть 1. Перераспределение веса

Большинство пилотов рано учатся тому, что балансирование автомобилем важно. Обучение делать это автоматически и последовательно это одна из самых важных частей становления настоящего пилота. В то время как умению балансировать машиной обычно обучают в школах пилотов, логическое обоснование этому обычно не приводят. Это обоснование вытекает из простой физики. Понимание физики пилотирования не только помогает стать более быстрым пилотом, но и позволяет получить больше удовольствия от вождения. Если Вы знаете основные причины того, что должны сделать, вы запомните эти вещи лучше и быстрее начнете использовать все свои умения вместе.

Балансирование автомобилем это управление перераспределением веса с использованием акселератора, тормозов и рулевого управления. Эта статья опишет перераспределение веса. Вы будете часто слышать от инструкторов и пилотов то, что применение тормоза переносит вес в переднюю часть автомобиля и вызывает появление избыточной поворачиваемости. Подобно, ускорение переносит вес в заднюю часть авто, вызывая недостаточную поворачиваемость, а в поворотах вес переносится на внешнюю часть автом разгружая внутренние колеса. Почему вес перемещается в ходе этих маневров? Как может вес перемещаться, когда всё в автомобиле закреплено? Кратко – причина это инерция, которая действует через центр тяжести (ЦТ) на землю. Низкий автомобиль с низко расположенным ЦТ управляется лучше и реагирует быстрее, поскольку перераспределение веса не так сильно влияет на него как на высокую машину.

Оставшаяся часть этой статьи объясняет как инерция и силы сцепления влияют на появление перераспределения веса по законам Ньютона. Статья начинается с простых уравнений, с помощью которых можно посчитать перераспределения веса любой машины зная только её колесную базу, высоту центра тяжести, распределение веса по осям и колею. Эти цифры обычно приводятся в рекламных буклетах и большинстве обзоров автомобилей.

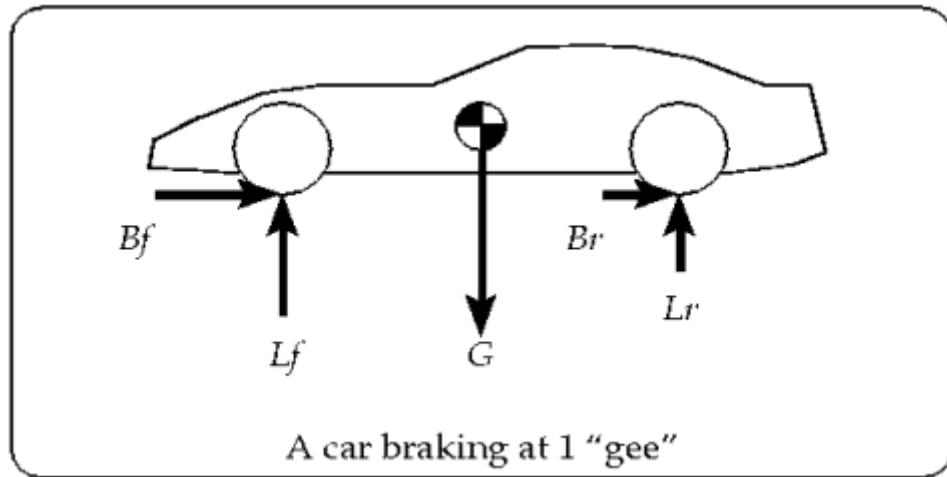
Большая часть из Вас помнит законы Ньютона из школьного курса физики. Это фундаментальные законы, которые применимы ко всем большим телам во вселенной, например, таким как автомобили. В контексте гонок они выглядят так:

Первый закон: автомобиль при прямолинейном движении при постоянной скорости будет сохранять скорость и направление движения пока на него не подействует внешняя сила. Единственная причина по которой автомобиль не находится всегда в состоянии прямолинейного движения с постоянной скоростью это трение – внешняя сила замедляющая автомобиль. Трение есть во взаимодействии шин с дорогой и воздуха с машиной. Свойство машины сохранять прямолинейно движение называется инерция машины и это свойство «привязано» к центру тяжести автомобиля.

Второй закон: Когда на автомобиль воздействует сила, то изменение движения пропорционально силе разделенной на массу автомобиля. Этот закон записывается формулой $F = ma$, где F – сила, m – масса, a – ускорение или изменение движения автомобиля. Большая сила вызывает более быстрое изменение движения, и более тяжелая машина будет реагировать медленнее при приложении силы. Второй закон ньютона объясняет, почему быстрые автомобили мощные, но легкие. Большая величина F и малая величина m позволяют изменять движение автомобиля (a) быстрее.

Третий закон: Любая сила, действующая на автомобиль, например земля, вызывает обратную силу равную по величине, но направленную противоположно. Когда Вы нажимаете тормоз, вы заставляете колеса толкать землю вперед, в это же время земля толкает автомобиль назад, а поскольку колеса закреплены на автомобиле земля толкает автомобиль в противоположном направлении останавливая его.

Давайте продолжим анализировать торможение. Перераспределение веса при ускорении и поворотах это примерно тоже самое. Мы не будем брать в учет такие тонкости как подвеска и деформация колес. Эти вещи очень важны, но вторичны. На рисунке показан автомобиль и силы, действующие при торможении в $1g$. $1g$ означает, что тормозная сила равна весу автомобиля.



На этом рисунке, черно-белый кружок в центре это ЦТ. G это сила тяжести которая давит автомобиль к центру земли. Это и есть вес автомобиля (вес это другое слово для обозначения силы тяжести). Законы природы, объясненные Альбертом Эйнштейном, таковы что гравитационные силы, такие как инерция, действуют на объект через его ЦТ. Этот факт может быть рассмотрен более подробно, но это объяснение уведет нас слишком далеко от темы перераспределения веса.

L_f это подъемная сила действующая от земли на передние колеса, а L_r это подъемная сила действующая на задние колеса. Эти подъемные силы вполне реальны и действуют так же, как подъемная сила удерживающая самолеты в воздухе. Эти силы держат автомобиль на поверхности земли и не позволяют ему провалиться сквозь землю.

Часто мы не замечаем того что земля действует на объекты, поскольку это слишком обычное явление, но это ключевое явления в динамике автомобиля. Это важно по следующей причине: величина этой силы определяет свойство резины цепляться, а дисбаланс между передней и задней подъемными силами вызывает недостаточную или избыточную поворачиваемость. Рисунок показывает только силы действующие на автомобиль, но там нет сил действующих на Землю и её центр тяжести. Третий закон ньютона указывает на то, что эти силы равны по величине и направлены противоположно, но мы сконцентрируемся на том, как земля и гравитация влияют на автомобиль.

Если автомобиль стоит или движется по инерции, а его распределение веса по осям составляет 50%-50%, тогда L_f по величине будет равна L_r . Сумма $L_f + L_r$ всегда будет равна G – весу автомобиля. Почему? По первому закону Ньютона. Движение автомобиля не изменяется в вертикальном направлении, по крайней мере, до тех пор, пока он не начнет взлетать, поэтому общая сумма всех сил в вертикальном направлении будет равняться нулю. G будет направлена вниз, в противовес L_f и L_r , направленным вверх.

Торможение вызовет увеличение L_f относительно L_r , «зад станет легче» как часто говорят пилоты. Рассмотрим тормозные силы спереди и сзади - B_f и B_r на рисунке. Они толкают шины назад, которые в свою очередь толкают колеса, которые в свою очередь толкают элементы подвески, которые в свою очередь толкают назад всю оставшуюся часть автомобиля, замедляя его. Эти тормозные силы действуют на автомобиль на уровне земли,

в то время как инерция старается сохранить движение вперед на уровне ЦТ. Таким образом, тормозные силы создают крутящий момент в ЦТ. Представьте, что Вы выдергиваете скатерть из под стоящих на столе чашек и канделябра. Эти объекты будут наклоняться или даже вращаться вокруг собственной оси, это будет проявлено больше для длинных вещей и будет зависеть от того насколько сильно вы будете дергать скатерть. Склонность к вращению автомобиля при торможении физически идентична.

Тормозной крутящий момент действует на автомобиль сходно с тем, как если надавить сверху на переднюю часть автомобиля. До тех пор пока автомобиль не соприкасается с землей только передними колесами, некоторые другие силы противодействуют этому явлению по первому закону Ньютона. Это не может быть сила G , поскольку она направлена из ЦТ. Только подъемные силы могут создавать силу противодействия и единственное решение этой проблемы это увеличение L_f по отношению к L_r . Буквально: земля при торможении толкает сильнее передние шины вверх, удерживая автомобиль от переворота вперед.

Но насколько L_f превышает L_r ? Тормозной крутящий момент пропорционален тормозным силами и высоте ЦТ. Для примера возьмем высоту ЦТ равной 50 см. Противовесный тормозному крутящий момент пропорционален L_f умноженной на половину колесной базы (при распределении веса между осями 50-50) минус L_r умноженной на половину колесной базы (на то время пока L_r помогает тормозным силам перевернуть автомобиль).

L_f выполняет много функций: она должна противостоять крутящему моменту, тормозным силам и подъемным силам на задней оси. Давайте возьмем колесную базу равную 2.5 м. Пока мы тормозим с усилием в $1g$, тормозные силы будут равны весу G , допустим 1500 кг. Всё вышесказанное суммируется в следующих уравнениях:

$$1500 \text{ кг} * 0.5 \text{ м.} = L_f * 1.25 \text{ м.} - L_r * 1.25 \text{ м.}$$
$$L_f + L_r = 1500 \text{ кг. (это верно всегда)}$$

При небольшом преобразовании мы можем посчитать следующее:

$$L_f = 750 + (1500 / 5) = 1050 \text{ кг.; } L_r = 750 - (1500 / 5) = 450 \text{ кг}$$

Таким образом, при торможении в $1g$ наш экспериментальный автомобиль получит дополнительных 300 кг нагрузки на передние шины, которые переместятся с задних колес. Делая подобный анализ с более обобщенным автомобилем с высотой ЦТ h , колесной базой w , весом G , распределением веса d (выраженной в доле веса на передней оси) и тормозной силой B , мы можем получить следующее:

$$L_f = dG + Bh / w, L_r = (1 - d)G - Bh / w;$$

Эти уравнения могут быть использованы для подсчета распределения веса при ускорении при представлении силы ускорения как обратной силы торможения. Если вы хотите выяснить силу ускорения полученную скажем от G -сенсора, просто умножьте её на вес автомобиля (второй закон Ньютона). Перераспределение веса в поворотах может быть проанализировано тем же способом, только в этом случае колесная база заменяется на колею, которая всегда равна 50% (не принимая во внимание вес водителя). Те из вас кто имеет инженерную или научную склонность могут получить эти уравнения самостоятельно. Уравнения для автомобиля одновременно поворачивающего и тормозящего гораздо более сложны и для получения требуют некоторых математических приемов.

Теперь Вы знаете, как происходит перераспределение веса. Следующая тема, которая приходит мне в голову это физика сцепления шин, которая объясняет, как перераспределение веса может привести к появлению избыточной или недостаточной поворачиваемости.

Часть 2. Сохранение сцепления резины с дорогой

В статье за прошлый месяц, мы объяснили физику перераспределения веса. Мы объяснили, почему торможение перемещает вес вперед, ускорение перемещает вес назад, а в поворотах вес перемещается в сторону противоположную повороту. Перемещение веса это побочный эффект вызванный тем, что резина старается удерживать автомобиль от скольжения в виражах. Мы установили, что торможение в 1g на нашей экспериментальной полутонной машине вызовет перемещение 300 килограмм веса с задней оси на переднюю. Объяснения были даны в строгом соответствии с фундаментальными законами Ньютона.

В этом месяце, мы изучим, что заставляет резину цепляться за дорогу и что заставляет её скользить. Мы установим, как Вы можете заставить резину скользить, оказывая на неё слишком большое усилие или путем перераспределения момента при помощи газа, тормоза или рулевого управления. Это справедливо и наоборот, вы можете перевести скольжение, в сцепление обратно, уменьшая усилие или перераспределяя вес. Остальная часть статьи объясняет всё это при помощи физики.

Эти знания в паре с хорошим умением перераспределять вес, могут помочь пилоту предсказать свои действия, чтобы не совершать ошибок, если же Вы совершили ошибку, то эти знания помогут вам её исправить и в целом управлять автомобилем сообразно ситуации на десять десятых. Тацио Нуволари, один из величайших гонщиков мира, говорил, что в любое время за рулем он знал вес на каждом колесе с точностью до нескольких килограммов. Например, во время езды он знал, как нагрузки изменятся, если он отпустит педаль газа или если он повернет руль ещё немного. Его знание физики гонок позволило ему делать точные движения, точно подходящие каждой ситуации и возможно делало его лучше, чем его соперники. Ну и конечно, у него был очень быстрый ум и феноменальные рефлексy.

Я собираюсь попросить Вас сделать некоторые физические эксперименты со мной для того чтобы установить сцепление резины. Вы действительно можете проделать это или только это представить. Сначала, открутите одно колесо от Вашей машины. Если вы серьёзный автоспортсмен, у Вас вероятно есть несколько износившихся комплектов в гараже.

Вы можете делать эти эксперименты и с тяжелой коробкой, или другим предметом, который удобней чем шина, но цифры, которые вы получите, нельзя будет применить для шин, хотя принципы измерения и те же.

Взвесьте себя с колесом и без него на бытовых весах. Разница между этими измерениями это вес колеса вместе с крышкой. В моем случае, он составил 23 кг. (он бы был намного меньше если бы у меня были колеса Jongbloed за 3000\$! Спонсоры читают?). Теперь поставьте колесо на землю или стол и толкайте его рукой, пока оно не сдвинется. Толкайте нижнюю часть колеса, чтобы оно не падало.

Вопрос насколько сильно нужно толкнуть колесо, чтобы оно начало скользить? Это можно установить, поместив между рукой и колесом бытовые весы. Такой способ не даст очень точных результатов, но даст результаты достаточные для грубых расчетов. В моем случае на бетонной дорожке перед моим домом я получил значение в 38,5 кг силы. На линолеуме на кухне я получил около 27,2 кг. Что эти цифры значат?

Они означают, что на бетоне моя резина дает мне $38,5/23 = 1,7$ g боковой устойчивости до скольжения, а в гонках по линолеуму (гм!) у меня будет только 1,2 g. Мы только что изучили физику сцепления своими голыми руками. Тот факт, что резина сопротивляется скольжению до определенного предела, называется явлением сцепления. Если бы вы могли посмотреть на взаимодействие резины и дорожного покрытия через микроскоп, вы бы увидели множество соприкосновений между длинными сжатыми, перекрученными, согнутыми молекулами резины и молекулами бетона, это и вызывает эффект сцепления. Разработчики резины при детальном исследовании изучают резину на этом уровне.

Я был сильно удивлен тем, что у меня есть возможность проходить повороты с 1.7g в автоспорте. Перед тем как провести этот эксперимент, я ожидал получить цифру менее 1g. Эту невероятную цифру в 1.7g точно невозможно получить в реальных условиях, но она

является доказательством невероятных достижений в разработке шин в наши дни. Тридцать лет назад инженеры считали что для резины невозможно получить величину в 1g. Это привело к разным выводам и, например, предполагалось, что дрегстеры не смогут развить скорость быстрее 320 км/ч на дистанции в четверть мили: они говорили, что можно достичь $\sqrt{2ax} = 319,55$ км/ч если двигаться с ускорением 1g все 402 метра дистанции. В наши дни в дрег рейсинге, из соображений безопасности, пытаются сохранять скорость машин ниже 480 км/ч, а топ-фюел драгстеры сейчас стартуют с ускорением более 3g.

Для второго эксперимента, попытайтесь измерить ваше колесо с дополнительным грузом. Я использовал пару гантель перебросив их привязанными на веревке через центр колеса. Это дало мне общий вес в 40,8 кг. Для того чтобы сдвинуть колесо на бетоне теперь мне потребовалось 68 кг. Те же 1.7g.

Мы установили фундаментальный закон сцепления: сила необходимая для скольжения шины пропорциональна весу поддерживаемому колесом. Когда ваше колесо стоит на машине, вы не можете сдвинуть машину, по той простой причине, что давите недостаточно сильно.

Сила необходимая для скольжения шины называется предел сцепления шины. Этот закон в математической форме выглядит так:

$$F \leq \mu W$$

Где F – сила с которой резина сопротивляется скольжению, μ – коэффициент трения или коэффициент сцепления, и W - это вес вертикальной нагрузки на пятно контакта. F и W имеют размерность силы (не забываем что вес - это сила тяжести), а μ - это просто число, коэффициент пропорциональности. Это уравнение показывает, что боковые силы приложенные к шине могут противодействовать скольжению, пока они меньше или равны μW . Таким образом μW это максимально возможная сила при которой обеспечивается сцепление. Часто говорят, что можно добиться определенного бокового ускорения. Мы можем преобразовать силу сцепления в ускорение в g её делением на W, то есть на вес машины. Таким образом, μ измеряется в g.

Коэффициент сцепления если быть точным не константа. В реальных условиях многие факторы могут привести к уменьшению коэффициента сцепления хорошей резины до величины примерно в 1.1g. Это могут быть деформации шины, работа подвески, температура, давление в покрышке и т.п. Тем не менее, закон пропорциональности работает и в этом случае. Теперь Вы знаете, что в повороте, при торможении или ускорении на пределе, предел сцепления резины может быть превышен из-за перераспределения веса и разгрузки колеса. Что может привести к переходу покрышки от сцепления к скольжению.

В действительности, переход от сцепления к скольжению на современной хорошей резине плавный. Когда говорят о предсказуемой резине, подразумевают, что покрышка срывается в скольжение плавно, при увеличении нагрузки, давая пилоту возможность скорректировать свои действия. Старые, жесткие покрышки, в общем, дают меньше предсказуемости, чем новые мягкие. Низкопрофильная резина менее предсказуема, чем резина с высоким профилем. Слики также менее предсказуемы, чем обычная резина. Но это очень большие обобщения и каждая резина должна рассматриваться индивидуально. Некоторые покрышки настолько непредсказуемы, что срываются в скольжение без каких-либо предупреждений, что может привести пилота к развороту на трассе. Предсказуемая резина гораздо удобней для вождения и позволяет получить гораздо больше удовольствия на трассе.

Вождение, чувствуя задним местом («Driving by the seat of your pants») означает чувствительность к малейшим изменениям в боковых перегрузках, торможении и ускорении, что дает знать о том, что одно или более колес находятся на пределе сцепления. Вы можете

почувствовать эти изменения буквально задним местом, но также можете почувствовать изменения и на руле или услышать их по изменению звука издаваемого резиной. В общем, резина пищит (squeak), когда приближается к пределу, визжит (squeal) на пределе и пронзительно визжит (squall) за пределом. Я считаю, что звук резины очень информативен и всегда мне помогает за рулем.

Итак, для того чтобы всегда держать ваши покрышки в сцеплении с дорогой необходимо помнить что ускорение приводит к уменьшению предела сцепления передних колес, и увеличению предела сцепления задних колес и наоборот, при торможении наблюдается обратный эффект. В поворотах же больше сцепления появляется на внешних колесах, а на внутренних предел сцепления снижается. Эти явления появляются вследствие воздействия на сцепления фактора перераспределения веса автомобиля. В заключении, плавное управление автомобилем позволяет сохранять сцепление резины с дорогой в нужное время. Это одно из основных правил при управлении автомобилем, хотя это конечно легче сказать, чем делать. В следующих статьях мы используем полученную информацию для расшифровки понятий недостаточной и избыточной поворачиваемости и настроек машины.