

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:

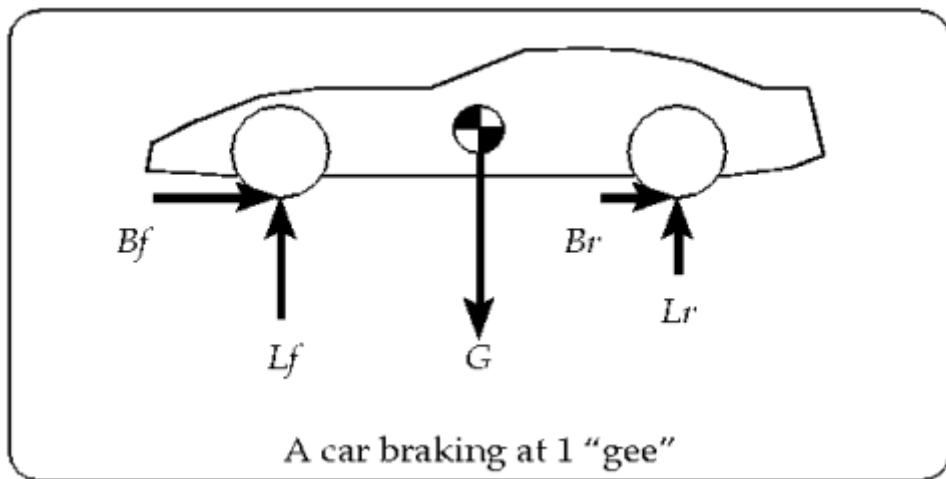
Первый закон: автомобиль при прямолинейном движении при постоянной скорости будет сохранять скорость и направление движения пока на него не подействует внешняя сила. Единственная причина по которой автомобиль не находится всегда в состоянии прямолинейного движения с постоянной скоростью это трение – 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, а 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 силам 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 силе 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 удержать 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 серьезный 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 покрышкой. 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 автокроссе. 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 переброшив 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.

Глава 3. Основные расчеты

В последних двух статьях мы узнали о двух относительно общих явлениях: перераспределении масс и сцеплении резины. В этом месяце мы обсудим некоторые основные измерения и размерности, необходимые для расчетов. В конечном итоге мы получим уравнения достаточные для компьютерного моделирования автомобиля. Уравнения должны быть получены такими, чтобы расчеты были достаточно быстрыми для компьютерной игры – симулятора. В итоге, задача этих статей - это показать, как можно построить подобную игру на обычном компьютере с использованием таких языков программирования как C или BASIC, или возможно даже на моем любимом языке LISP. Всё это сочетается с духом сборника статей PHoRS, по причине того что многие физические явления сейчас исследуются с использованием компьютеров. Разработка программ и программирование это ключевые навыки современного физика, настолько, что некоторые из нас проводят за компьютером всё своё время.

Физика – это наука измерений. Возможно вы слышали о крайне абстрактных областях физики, например таких как теория относительности и квантовая механика, в которых на первом месте стоит математика, но в наших теориях на первом месте стоят лабораторные опыты ну конечно или в нашем случае - гоночные заезды. Все математические величины должны быть измеряемыми. В гонках основными величинами являются расстояние, время и масса.

В этом месяце мы рассмотрим основные уравнения, которые позволят нам делать быстрые расчеты в уме между заездами. Очень полезно развивать навыки быстрого расчета величин, и я Вам покажу почему.

Уравнения, в которые не входит параметр, масса, называются кинематическими. Первое уравнение кинематики связывает скорость, время и расстояние. Если машина движется с постоянной скоростью или ускорением V , тогда расстояние d которое она преодолеет за время t , будет $d = Vt$. Это уравнение вводит понятие скорости и ничего более.

Давайте посмотрим на несколько небольших примеров. Как далеко будет машина отстающая на одну секунду (одну десятую, две десятых и т.д.)?

На скорости 25 км/ч за одну секунду мы передвигаемся примерно на 6,5 метров, или на полтора корпуса машины такой как Corvette последней модели. Так на скорости 50 км/ч, секунда это 3 корпуса машины, а на скорости 100 км/ч – 6 корпусов. Если в автокроссе вы отстаёте на 1 секунду (или вы настолько хорошо водите что можете обогнать остальных на столько же) вы теряете примерно 3-6 корпусов! Это рассчитывается из средней скорости в автокроссе 50-100 км/ч.

Каждый раз когда Вы ошибаетесь или Вас сносит немного в сторону просто представьте соперника обгоняющего Вас на корпус. Это одна из причин по которой автокросс это очень сложный для пилота спорт. Если Вы вылетели в одном повороте в гонке вы должны потратить несколько кругов чтобы это исправить, а чтобы победить сильных соперников в автокроссе нужно пилотировать почти идеально. Обычно побеждает тот пилот который делает меньше ошибок!

Следующее кинематическое уравнение касается ускорения. Так получается что расстояние которое преодолевает машина при постоянном ускорении составляет $D = 0,5at^2$ Как это уравнение может помочь нам при расчетах в уме? Обычно мы измеряем ускорение

в g. 1g составляет $9,8\text{м/с}^2$. Мы не должны брать километры и часы здесь. Преобразуем немного наше уравнение и получим d (метры) = $4.9a$ (g) * t^2 (секунды). Таким образом автомобиль ускоряющийся с места при 0,5g за первую секунду преодолеет около 5 метров. Не очень много! Но тем не менее скорость будет возрастать очень быстро и за вторую секунду машина преодолеет уже 20 метров.

Только чтобы доказать Вам что это реально давайте ответим на вопрос «За какое время машина проедет 402м двигаясь с ускорением 0,5g?» Мы преобразуем вышеуказанное уравнение и получим:

$$t = \sqrt{d / 4.9a}$$

И если мы в это уравнение подставим цифры то получим

$$t = \sqrt{402 / 2.45}$$

Что составляет около 13 секунд. Не такое уж и сумасшедшее время! Реальные машины не способны сохранять ускорение 0,5g на всем протяжении 402 м по причине наличия сопротивления воздуха и уменьшения крутящего момента на высших передачах. Это объясняет почему спортивные машины проезжают четверть мили за 14-15 секунд.

Более интересный результат это факт что для преодоления первых 5 метров нужна целая секунда. Отсюда следует вывод что старт очень важен в автокроссе. При чрезмерной пробуксовке, которая «крадет» ускорение Вы можете потерять целую секунду прямо на старте. Просто представьте что ваши соперники стоят на 10 метров ближе к финишу.

Для того чтобы быстро делать вычисления в уме полезно помнить несколько корней. $8^2 = 64$, $10^2 = 100$, $11^2 = 121$, $12^2 = 144$, $13^2 = 169$ и так далее. Тогда вы сможете брать корни в уме с достаточной точностью.

Наконец, давайте посмотрим как крутящий момент становится силой на колесах и превращается в итоге в ускорение. Для этого нам нужно знать что такое масса автомобиля. Любая физическая формула в которой учитывается масса называется динамической в противовес кинетическим. Давайте допустим что у нас есть Corvette который весит 1500 кг и производит 45 кгс на коленчатом вале. АКПП этой машины имеет передаточное число первой передачи 3.06. Трансмиссия это ничто иное как просто система круглых вращающихся рычагов (circular rotating levers), а передаточное отношение это коэффициент преобразования крутящего момента. Так, на выходе из трансмиссии мы будем иметь $3,06 * 45\text{кгс} = 137,7$ кгс крутящего момента.

Дифференциал это следующий «преобразователь», в случае Corvette здесь коэффициент будет составлять 3.07, передавая 422,7 кгс в центр колес (это очень большой крутящий момент!). Расстояние от центра колеса до земли около 13 дюймов или 33 сантиметра. Так максимальная сила которую двигатель может приложить к земле в направлении назад (вызывая силу отталкивания от земли действующую на автомобиль в направлении вперед, вспомните 1 главу!) на первой передаче составит $422,7\text{кгс} / 0,33\text{м} = 1281$ кгс. В состоянии покоя, автомобиль имеет распределение веса около 50/50, то есть около 725 кг нагрузки на заднюю ось. Вы должны помнить из предыдущей статьи которая касалась сцепления что резина не может передать в поперечном направлении силу много большую чем вес который действует на колесо. Колесо просто будет буксовать если вы нажмете газ до конца, прилагая к ней усилие в 1281 кгс.

Теперь мы видим почему важно нажимать на газ нежно при старте. В самые первый момент старта ваша цель сделать так чтобы двигатель создал на пятне контакта силу около 725 кг. Если вы всё сделаете правильно то шины завизжат только на очень небольшой отрезок времени. Таким образом это даст Вам 725 кг силы толкающей в направлении вперед то есть исходя из формулы $F = ma$ придаст автомобилю ускорение

около 0,5g или половины веса автомобиля. Главная причина из за которой машина будет разгоняться с ускорением только в 0,5g это половина веса на передних колесах, которая не увеличивает сцепление ведущих задних колес. Но на старте произойдет немедленный перенос части веса назад. Вспоминая 1 часть опять, можно рассчитать что после старта примерно 145 кг переместится назад и тогда вы можете передать колесам немного больше силы плавно нажимая газ. Через секунду или около того Вы можете нажать газ до упора заставляя работать двигатель на полную.

На заднеприводных автомобилях перенос веса действует так что увеличивается нагрузка на ведущую ось. На переднеприводных автомобилях перенос веса действует против ускорения и поэтому вы должны действовать с педалью газа очень аккуратно если имеете много мощности. На полноприводном автомобиле все колеса работают прилагая силу к покрытию и это теоретически лучший вариант.

Люди близкие к технике называют такие расчеты расчетам «на обратной стороне конверта» (back of the envelope) что означает что-то вроде записи уравнений и цифр на любом кусочке бумаги который попался под руку. Вы можете делать это без калькулятора или каких либо других устройств. Вы можете делать это в гараже. Такие расчеты не очень точны, но дают вам грубый результат который отличается не более чем на 10 или 20% от реальной силы или ускорения. Теперь вы тоже знаете как делать расчеты на обратной стороне конверта.

Глава 4. Центробежной силы не существует

Часто можно услышать словосочетание «центробежная сила». Это осязаемая сила которая отбрасывает наружу при прохождении поворота. Если в машине что-то останется незакрепленным этот предмет немедленно полетит направо в левом повороте и наоборот. Возможно у Вас был опыт как однажды у меня. Я забыл выкинуть пустую банку Пепси, валяющуюся под пассажирским сиденьем и во время достаточно агрессивной езды эта банка полетела через салон и вылетела через пассажирское окно в центре крутого левого поворота.

Я попытаюсь донести до Вас в этой части что центробежная сила это фикция - следствие явления впервые отмеченного более трех сотен лет назад Ньютоном, заключающегося в том что тела стремятся сохранить прямолинейное движение до тех пор пока на них не подействует сторонняя сила.

Когда Вы поворачиваете рулевое колесо, вы пытаетесь заставить передние колеса сдвинуться на дороге немного вбок, это толкает их назад согласно третьему закону Ньютона. Когда дорога толкает колесо назад это придает машине некоторое боковое ускорение. Ускорение пропорционально поперечной силе и обратно пропорционально массе автомобиля согласно второму закону Ньютона. Боковое ускорение на передних колесах заставляет автомобиль немного менять направление в сторону, то есть делает то, что вы хотите сделать поворачивая колесо. Если вы будете поворачивать и двигаться с постоянной скоростью то попадете в конце концов в то место из которого стартовали. Другими словами Вы будете двигаться по окружности. Когда вы проходите поворот Вы двигаетесь по части окружности.

Если вы ещё немного повернете рулевое колесо вы поедете по окружности с меньшим радиусом и поперечная центростремительная сила должна будет увеличиться. Если вы будете ехать по окружности с тем же радиусом, но быстрее: необходимая для этого сила опять должна будет увеличиться. Если вы попытаетесь ехать по окружности слишком быстро то будет достигнут предел сцепления, колеса начнут просто скользить не цепляясь за дорогу, и машина не будет поворачивать. Из вышесказанного мы можем увидеть что для того чтобы повернуть например направо, сила направленная направо должна действовать на автомобиль так чтобы автомобиль менял направление движения от прямолинейного. Если сила остается постоянной автомобиль будет двигаться по окружности. Относительно автомобиля сила всегда будет направлена направо. Относительно земли сила будет направлена в центр окружности. С этой точки зрения сила будет постоянна по величине, но направление будет изменяться всегда указывая на геометрический центр окружности. Эта сила называется центростремительной.

Точка зрения «на земле» более предпочтительна поскольку остальные тела с этой точки отсчета не испытывают инерционных сил. Физики называют такую точку - инерциальная система отсчета. Силы измеренные в инерциальной системе отсчета более точны чем измеренные внутри движущейся машины. Силы измеренные внутри машины будут подвергаться влиянию центростремительной силы. Внутри машины все объекты, такие как пилот и др., будут испытывать тенденцию к сохранению движения по прямой. На пилота будет действовать центростремительная сила через сиденье и ремни. Если у Вас нет хорошей боковой поддержки или ремней Вас будет сдвигать вбок и вы будете хвататься за органы управления для того чтобы на Вас действовала центростремительная сила.

Я затратил много времени для того чтобы преодолеть привычку хвататься за руль для того чтобы остаться на месте. Я выяснил что пятиточечные ремни очень помогают преодолеть эту ненужную привычку. С ними я больше не нуждался в том чтобы дополнительно фиксировать своё тело в процессе езды и я мог концентрироваться на том чтобы пилотировать плавно и быстро. В качестве результата я стал больше использовать руль и рычаг переключения скоростей для управления и для переключения скоростей, а не для того чтобы удержаться в кресле.

Силы которые испытывает водитель и другие тела в машине это центробежные силы. Термин «центробежная сила» относится к инерционной склонности тел противостоять центробежной силе и сохранять движение по прямой. Если центробежная сила будет постоянной по величине, центробежная склонность тел тоже будет постоянной. Нет такого понятия как центробежная сила, хотя это и удобная абстракция нужная для расчетов.

Давайте точно рассчитаем какое боковое ускорение необходимо для того чтобы автомобиль двигался со скоростью V по кругу с радиусом r . Мы сможем потом преобразовать ускорение в силу через второй закон Ньютона и понять как быстро мы можем двигаться по кругу до того как достигнем предела сцепления, или другими словами определим максимальную скорость прохождения поворота. Для этого, для Вас будет полезно нарисовать несколько схем «на обратной стороне конверта»

Представим очень короткий промежуток времени, намного короче секунды. Назовем его dt (d означает «дельта», эту букву математики используют чтобы обозначить очень небольшое возрастание величины). За время dt мы продвинемся вперед на расстояние dx и вбок на расстояние ds . Продольная (направленная вперед) составляющая скорости машины будет приблизительно $v = dx/dt$. В начале интервала dt машина не будет иметь поперечной скорости. В конце интервала автомобиль будет иметь поперечную скорость ds/dt . За время dt автомобиль таким образом должен изменить боковую скорость на ds/dt . Ускорение - это изменение скорости за определенный промежуток времени, поделенный на этот промежуток времени. Таким образом боковое ускорение это:

$$a = \frac{ds}{dt} \frac{1}{dx}$$

Как ds связано с радиусом окружности r ? Если мы продвинемся на часть радиуса круга f , мы должны сместиться и вбок на ту же часть dx для того чтобы остаться на окружности. Это означает что $ds = f dx$. Часть f это ничто иное как dx/r . С учетом этого мы получим отношение:

$$ds = dx \frac{dx}{r}$$

Мы можем подставить ds из этой формулы в формулу ускорения и с учетом того что $v = dx/dt$ мы получим окончательный результат:

$$a = \frac{ds}{dt} \frac{1}{dx} = \frac{dx}{dt} \frac{1}{r} = \frac{v^2}{r}$$

Это уравнение просто численно выражает то что мы написали сверху: то что ускорение (и сила) необходимая для того чтобы сохранять движение по окружности увеличивается с увеличением скорости и с уменьшением радиуса. Правда здесь следует добавить то что ускорение увеличивается на квадрат скорости. Это означает что центробежная сила действующая на ваши шины в повороте сильно зависит от скорости.

Таблица далее показывает максимальную скорость которой можно достичь в поворотах с различным радиусом и с различным ускорением. Таблица показывает отношение величин в выражении

$$3.6\sqrt{9.8a(g)r(\text{метры})}$$

которое является решением уравнения $a = v^2/r$ для скорости v . коэффициент преобразования 3.6 преобразует скорость из м/с в км/ч, а 9,8 ускорение из м/с² в единицы g. Мы рассказывали об этих коэффициентах преобразований в главе 3.

Ускорение	Радиус, метры				
g	15	30	45	60	150
0.25	22	31	38	44	69
0.5	31	44	53	62	98
0.75	38	53	65	76	120
1	44	62	76	87	138
1.25	49	69	85	98	154
1.5	53	76	93	107	169
1.75	58	82	100	115	183
2	62	87	107	123	195

Для автокросса колонки 15 и 30 метров и строка 1g нужны чаще всего. Таблица показывает что для того чтобы достигнуть боковое ускорение в 1g необходимо в повороте с радиусом 15 метров (такие повороты в автокроссе встречаются чаще всего) ехать со скоростью 44 км/ч. Для того чтобы достигнуть скорости в 49 км/ч необходимо достичь боковое ускорение в 1.25g что лежит за пределами резины применяемой в автокроссе. Разница между 44 и 49 км/ч относительно невелика, но эта разница обычно приводит от контролируемого пилотажа к развороту.

Абсолютно быстрее способ пройти поворот это быть немного за пределом в контролируемом скольжении на выходе из поворота. Для того чтобы делать это нужно направлять автомобиль так, чтобы в тот момент когда колеса начнут скользить к выходу из поворота автомобиль был направлен так чтобы оказаться на оптимальной траектории в момент «зацепления». Можно плавно добавлять газ в маневре и эффективно выходить из поворота, но вы должны это делать очень плавно. Для того чтобы научиться этому нужно потратить очень много времени. Возможно всю свою жизнь чтобы сделать этот навык идеальным. Я не представляю как можно скользить к выходу в очень длинных поворотах кроме как на коротком отрезке на выходе. Если кто нибудь знает как это сделать на всём протяжении длинного поворота (Айртон Сенна возможно?) скажите мне!

Хорошее упражнение в управлении автомобилем это двигаться по кругу отмеченному конусами или мелом и плавно увеличивать скорость пока автомобиль не начнет скользить. Если первыми начнут скользить передние колеса это называется недостаточная управляемость, если первыми начнут скользить задние колеса это называется избыточная поворачиваемость. Вы можете использовать эту информацию для настройки машины. Конечно вы это должны делать в безопасных местах, на специальных автодромах или ваших личных парковках. Полицейский с радостью оштрафует вас если поймает за этим занятием не в том месте.

Глава 5. Введение в гоночную траекторию

В этом месяце мы проанализируем лучшую траекторию прохождения поворота. «Лучшая» означает наиболее быстрая, с наивысшей средней скоростью. Мы спрашиваем «как траектория прохождения поворота может дать лучшее время?» и «какое будет время прохождения по другим траекториям внутри или снаружи поворота?» Давая ответы на эти вопросы мы собираемся ответить на вопрос «какой формы поворот должен быть для того чтобы между любыми траекториями не было разницы?» Ответ будет немного неожиданным.

Анализ представленный здесь наиболее простой который я мог провести, но всё равно он достаточно сильно усложнен. Мои расчеты прошли более чем через 30 шагов прежде чем я получил ответ. Не беспокойтесь, я не собираюсь провести Вас через всю математику. Я лишь набросаю общий вид проведенного анализа, стараясь сфокусироваться на основных принципах. Любой кто сможет прочитать анализ проведенный через 30 формул вероятно сам сможет получить те же результаты.

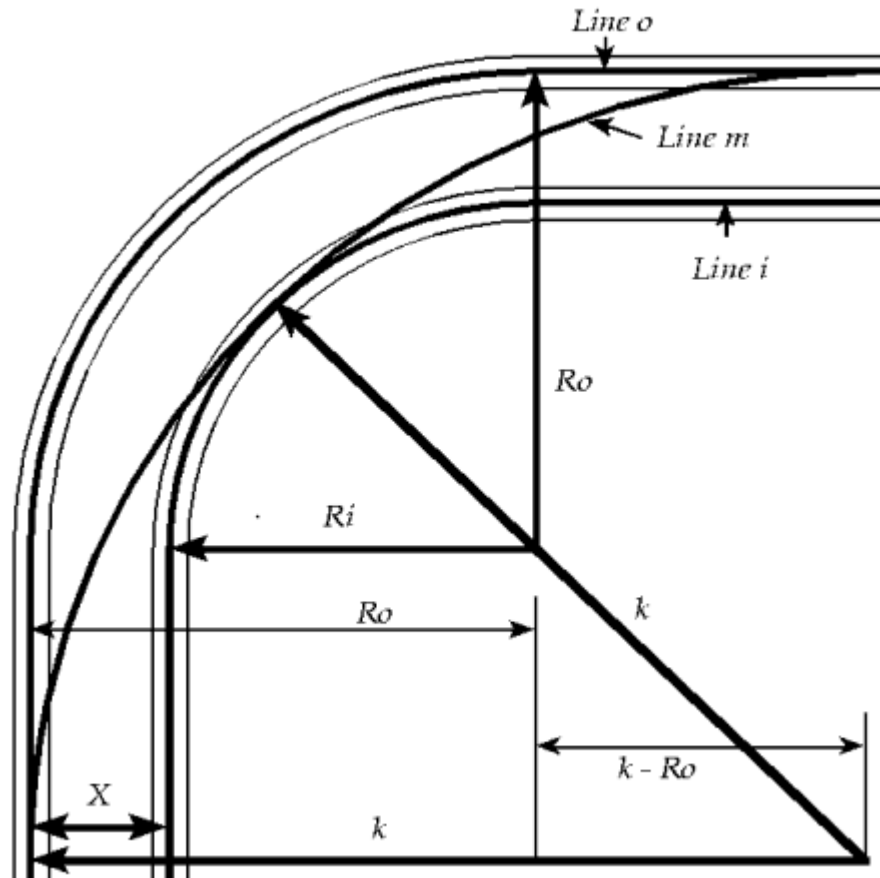
Для упрощения проведенного анализа я сделал несколько допущений. Первое: я выбрал отдельный поворот, абстрактную часть трассы. На самом деле наилучшая траектория зависит от того что находится до поворота и что находится после него. Обычно стараются получить большую скорость на выходе если за поворотом следует прямая. Вы можете не использовать оптимальный апекс если за поворотом идёт следующий поворот. Вы можете заходить по неоптимальной траектории если поворот представляет собой связку или шикану.

Обсуждая гоночные трассы можно услышать что пилоты говорят вещи наподобие «в этом повороте надо делать так, чтобы в повороте шесть оказаться на траектории хорошей для входа в поворот 10 и выхода на заднюю прямую». Другими словами они обсуждают последовательные действия во всех точках трэка. Лучшие пилоты представляют траекторию целиком для всей трассы и рассматривают траекторию трассы а не отдельных поворотов. Первоначально, при обучении, вероятно лучший способ оптимизировать траекторию это рассматривать каждый поворот в отдельности, потом переходить к комбинациям в два-три-четыре поворота и т.д.

Реальный трек не очень подходит для анализа при помощи математики. Другими словами хотя наука и может дать основные принципы и некоторые трюки, нахождение лучшей линии на практике - это искусство. Для меня это одна из наиболее интересных сторон гонок.

Другое упрощение которое я сделал это то что машина может ускоряться, тормозить или поворачивать с постоянной скоростью с резкими переходами от одного состояния к другому. Таким образом траектории которые я проанализировал состоят из отрезков разгона, торможения и поворачивания. Реальная машина может и должна делать эти действия одновременно с плавными переходами между фазами. Фактически возможно сделать точный математический анализ с более реалистичным поведением с плавными переходами, но такой анализ будет гораздо более сложным и в то же время он не будет намного более точным.

В итоге мы взяли 90 градусный правый поворот.



Этот рисунок представляет собой семейство поворотов с постоянной шириной, любым радиусом и короткими прямыми до и после поворота. Сначала мы проведем полный анализ с поворотом радиусом 25 метров и шириной 10 метров. Затем мы закончим анализ установлением времени прохождения поворотов с различными радиусом и шириной.

Давайте зададим следующие параметры

$r = 25$ м. – радиус поворота по центральной линии;

$W = 10$ м – ширина трассы

$r_o = 30$ м. - внешний радиус $r + 0.5W$

$r_i = 20$ м - внутренний радиус $r - 0.5W$

Когда мы будем проходить этот поворот мы должны оставаться на трассе, иначе мы получим большой штраф за сбитые конусы (или выскочим на гравий). Проще всего (но не так реалистично) провести анализ с траекторией центра масс автомобиля, а не с траекторией по которой проходит каждое колесо. Мы ввели понятие эффективная трасса, более узкая чем реальная, по ней мы сможем провести центр масс автомобиля

$w = 2$ м. – ширина автомобиля

$R_o = 29$ м – эффективный внешний радиус $r_o - 0.5w$

$R_i = 21$ м. – эффективный внутренний радиус $r_i + 0.5w$

$X = 8$ м - эффективная ширина трассы

Траектории на рисунке показаны линиями радиусов с метками.

Из последней части мы знаем что для постоянной величины центростремительного ускорения максимальная скорость увеличивается как квадрат радиуса. Так, если мы будем пилотировать по самому большому радиусу начинающемуся снаружи входа проходящему через центр поворота (апекс) и выходящему на внешнюю часть последующей прямой мы сможем достичь максимальной скорости в повороте. Такая траектория показана на рисунке тонким радиусом и помечена «Line m». Это упрощенное представление классической гоночной траектории в повороте. Траектория *m* касается достигает вершины (имеет апекс) в геометрическом центре круга, несмотря на то что классическая гоночная траектория имеет апекс после геометрического центра поворота – поздний апекс. Поздний апекс используется поскольку он предполагает что мы будем ускоряться из поворота и будем следовать непрерывно увеличивающемуся радиусу на выходе в противовес меньшему радиусу на входе. Но мы будем анализировать именно такую геометрически совершенную траекторию поскольку она относительно простая. На рисунке также показаны внутренняя траектория «Line i» которая начинается с внутренней части на прямой проходит по внутренней части поворота и выходит на внутреннюю часть прямой после поворота и внешняя траектория «Line O» которая начинается на наружной части прямой, в повороте следует по внешнему радиусу и выходит на внешнюю часть прямой следующей за поворотом.

Кто то может утверждать что внутренняя траектория имеет определенные преимущества перед траекторией *m*. Внутренняя траектория определенно короче чем траектория *m* и хотя по ней мы будем проходить поворот медленнее мы будем проходить меньшую дистанцию что приведет к выигрышу времени. Ещё мы можем ускоряться на коротком отрезке перед поворотом и на всем протяжении на выходе из поворота в то время как по траектории *m* мы будем двигаться с постоянной скоростью. Давайте рассчитаем сколько времени займет прохождение поворота по траектории *i* и *m*. Мы включили траекторию *o* для полноты картины, даже несмотря на то что она и медленней и длиннее чем траектория *m*.

Допустим максимальное центростремительное ускорение составляет 1.10 g, что вполне достижимо для шин применяемых в автокроссе. Скорость прохождения поворота в таком случае будет следующая:

Внутренняя траектория *i* – $V_i = 54$ км/ч

Внешняя траектория *o* – $V_o = 64$ км/ч

Оптимальная траектория *m* – $V_m = 82$ км/ч

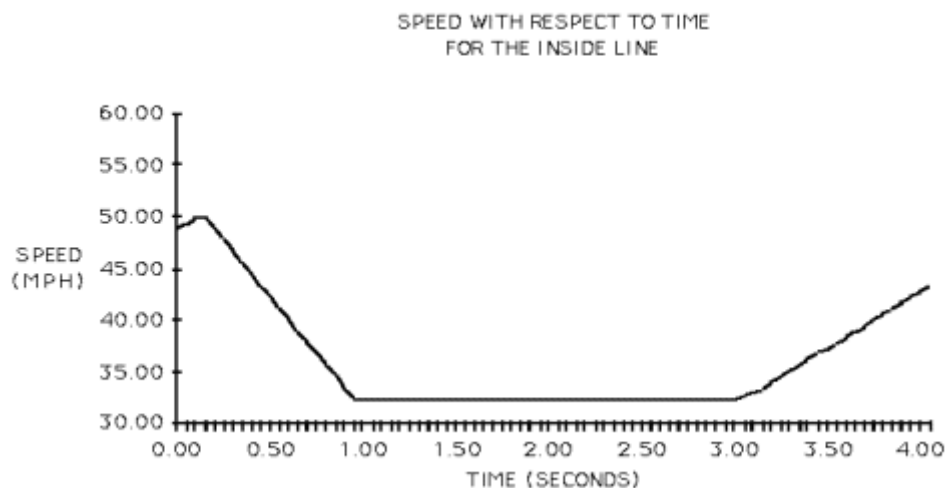
Траектория *m* целиком представляет собой равномерное движение при прохождении поворота и здесь можно легко посчитать время затраченное на преодоление отрезка трассы если знать радиус *K*. Геометрические расчеты привели к формуле:

$$K = 3.414 (R_o - 0.707 R_i) = 48 \text{ м.}$$

И время прохождения по траектории *m* составит:

$$t_m = \frac{3.6K(\pi/2)}{V} = 3.3 \text{ сек.}$$

По траектории *i* мы будем некоторое время ускоряться, затем тормозить пока не достигнем скорости 54 км/ч на которой возможно пройти поворот, ну и после прохождения поворота мы опять будем ускоряться на выходе. Давайте допустим, для того чтобы сравнение было более справедливым, что у нас есть стробоскоп в начале и конце траектории *m* и мы можем стартовать на скорости 82 км/ч, на той скорости на которой мы можем пройти поворот по траектории *m*. Давайте также допустим, что автомобиль может разогнаться с ускорением в 0,5g и тормозить с замедлением 1g. При таких допущениях траектория *i* на графике *x-t* будет выглядеть следующим образом:



Поскольку стартуем мы с ускорения мы будем ехать некоторое время быстрее чем по траектории *m*. Затем мы будем вынуждены резко тормозить до 54 км/ч (33 mph) для того чтобы войти в поворот и хотя мы и будем ускоряться на выходе мы не сможем достичь скорости 82км/ч. (51 mph) Но мы не будем принимать в расчет скорость на выходе, а только время прохождения отрезка. Используя график скорости приведенный выше мы можем рассчитать время для траектории *i*, которое составит 4.08 сек. Траектория *i* оказывается медленней на 0,9 секунды. В автокроссе такие разрывы во времени более характерны для прохождения всей дистанции, но тут анализ показал что мы можем потерять столько времени в одном простом повороте. В таком случае движение по траектории *i* не приемлемо. Кстати время прохождения по траектории *o* составит 4.24 секунды.

Что если поворот будет меньшего или большего радиуса? Следующая таблица показывает время прохождения поворота с шириной трассы $W = 10\text{м}$.

Радиус, м	10	14	18	23	27	29
t_o , с	3,99	4,06	4,15	4,24	4,35	4,38
t_i , с	3,94	3,94	4,00	4,08	4,17	4,21
t_m , с	2,64	2,83	3,01	3,18	3,34	3,39
Разница, с	1,30	1,11	1,01	0,90	0,83	0,82

Траектория *i* никогда не будет быстрее траектории *m*, хотя при увеличении радиуса разница во времени будет уменьшаться. Изменение разницы предсказуемо, поскольку повороты с бОльшим радиусом длиннее и выигрыш в скорости между траекториями *m* и *i* будет уменьшаться. Разница больше для крутых поворотов, поскольку в них ширина относительно длинны будет гораздо больше и разница в скорости будет возрастать.

А что насчет разной ширины трассы? Таблица далее показывает время прохождения поворота радиусом 22 м.

Ширина, м	3	9	15	21	27
t_o , с	2,68	4,24	5,47	6,50	7,41
t_i , с	2,62	4,08	5,32	6,45	7,51
t_m , с	2,46	3,18	3,77	4,27	4,73
Разница, с	0,16	0,90	1,55	2,18	2,79

Большая ширина трассы приведет к большей разнице во времени. Это опять предсказуемо поскольку по более широкой трассе радиус прохождения по траектории m будет большим, даже в крутых поворотах. Отметим что траектория o будет быстрее на очень широких трассах. Эта разница появляется по причине того что разница в скорости будет очень большая на широких трассах. Но наиболее важен тот факт что траектория m быстрее на 0,16 секунды даже на трассе которая шире машины всего на 1 м. Становится понятна важность выражения «используйте всю ширину трассы».

Глава 6. Скорость и мощность

Заголовок в этом месяце состоит из двух слов близких сердцу каждого гонщика. В этом месяце мы сделаем некоторые расчеты «на обратной стороне конверта» для того чтобы изучить физику скорости и мощности (принцип расчетов «на обратной стороне конверта» рассмотрен в главе 3).

Сколько мощности необходимо для того чтобы ехать с определенной скоростью? Физик может ответить «нисколько», поскольку он помнит первый закон Ньютона, который гласит: «Тело будет двигаться прямолинейно и равномерно пока на него не подействует внешняя сила». Любой знает, что для того чтобы машина ехала с постоянной скоростью нужно держать нажатой педаль газа. Нажатие на педаль газа означает, что Вы заставляете двигатель создать некоторую силу толкающую дорогу назад, тем самым вызывая ответную силу толкающую автомобиль вперед. Из автомобильного журнала мы знаем несколько цифр. Например последняя модель Corvette имеет максимальную скорость 240 км/ч и мощность 240 л.с. Это означает что если вы будете постоянно держать нажатой педаль газа до упора и использовать все 240 л.с. вы сможете разогнаться до 240 км/ч и ехать с такой скоростью постоянно. На этой машине вы сможете разогнаться до 100 км/ч примерно за 6 секунд (если не будете допускать пробуксовки), до 160 км/ч примерно за 15 секунд и до 240 км/ч примерно за минуту.

Всё это на первый взгляд противоречит первому закону Ньютона. В чём же дело? Автомобильдвигающийся прямолинейно с постоянной скоростью по дороге фактически подвергается действию ряда сторонних сил которые пытаются его замедлить. Если бы этих сил не было автомобиль двигался бы с постоянной скоростью вечно, как и предполагал Ньютон. Двигатель создает силу направленную в обратном направлении которая и уравнивает силы замедления. Когда автомобиль двигается с постоянной скоростью равнодействующая сила которая равна разгоняющие силы минус замедляющие силы будет равна нулю.

Наиболее важная внешняя замедляющая сила это сопротивление воздуха. Вторая важная сила это трение между колесами и землей, т.н. сопротивление качения. Обе эти силы называются сопротивление потому что они всегда действуют в направлении противоположном движению, куда бы автомобиль не ехал. Ещё один физический эффект который замедляет автомобиль это внутреннее трение в силовом агрегате, трансмиссии и ступичных подшипниках. Поскольку они имеют внутреннее действие они не могут замедлить автомобиль. Хотя они могут толкать колеса назад, которые в свою очередь толкают землю вперед, тем самым по 3 закону Ньютона толкая автомобиль назад и замедляя его. Внутренние силы трения направлены в обратном направлении внешним ответным силам, что заставляет автомобиль немного тормозить, вызывая замедление. Итак, Вселенная и Ньютон в порядке, всё работает как и должно работать.

Насколько велики силы сопротивления и какую роль играет мощность? Физика сопротивления воздуха это очень сложная область, которая энергично развивается в настоящее время. Большинство исследований проводится в аэрокосмической отрасли, которая технологически очень близка автомобильной отрасли, особенно когда дело касается гонок. Мы рассмотрим арифметику и составим таблицу которая будет показывать сколько мощности необходимо для поддержания постоянной скорости. Тем кого может стошнить от этой всей математики лучше всего просмотреть следующие несколько параграфов бегло.

Мы не можем получить уравнения для сопротивления воздуха в этой книге. Давайте просто взглянем на них. Мой источник это «Гидродинамика» Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица,

двух выдающихся Русских физиков. Они дали нам следующие формулы для примерных подсчетов:

$$F = \frac{1}{2} C_d A \rho v^2$$

Где:

C_d – коэффициент лобового сопротивления, коэффициент зависящий от формы автомобиля, и определяемый экспериментально;

A – поперечное сечение автомобиля, для Corvette составляет примерно $1,85\text{ м}^2$

ρ – плотность воздуха, будет рассчитана ниже

v – скорость автомобиля

Рассчитаем плотность воздуха используя методы расчета «на обратной стороне конверта». Мы знаем что воздух состоит примерно из 79% азота и 21% кислорода. Азот имеет молекулярный вес 28, кислород 32. Что такое молекулярный вес? Это масса (не вес!) 22.4 л газа. Это число просто единица измерения, вроде килограмма или метра и не имеет физического смысла. Так рассчитаем что воздух имеет средний молекулярный вес:

$$\frac{79\% \text{ из } 28 + 21\% \text{ из } 32 = 28,84 \text{ г.}}{22,4\text{ л.}} = 1,29 \text{ г / л}$$

Признаюсь для этих расчетов я использовал калькулятор, что противоречит духу расчетов «на обратной стороне конверта», можете меня казнить.

Это означает что кубический метр воздуха весит 1.3 кг, и так и есть! Воздух гораздо более тяжелый чем это кажется если не ехать с очень большой скоростью.

Заполним наше уравнение для лобового сопротивления воздуха.

$$F = \frac{1}{2} 0.3(C_d) 1.85(A) 1.29 v^2 = 0.0358 v^2$$

Рассчитаем несколько цифр. Таблица далее содержит значения силы лобового сопротивления для некоторых значений скорости

V (км/ч)	25	50	100	150	200	250
F (кг)	1,7	6,9	27,6	62,2	110,5	172,6

Из таблицы видно что сила лобового сопротивления воздуха быстро возрастает с увеличением скорости и на скорости 250 км/ч нужно будет преодолевать силу сопротивления воздуха в 170 кг. Теперь мы можем рассмотреть откуда берется мощность.

Мощность это физический термин. Он характеризует количество произведенной работы. Работа в свою очередь это результат действия силы. Работа это другой технический термин который можно рассчитать как произведение массы на перемещение. Если передвинем тело на 1 м применив силу в 1 кг то можно сказать что мы сделали работу в 1 кг*м. Если это у нас займет одну секунду то можно сказать что мощность составила 1кг*м в секунду. Лошадиная сила это 75 кгс *м/с.

Можно потратить 1 л.с. перемещая 75 кг на один метр за одну секунду или перемещая 1 кг на 75 метров за одну секунду, или перемещая 1 кг на 1 м за 0,013 секунды и т.д. Все эти действия потребуют одинакового количества мощности. 1 лошадиная сила равна 735 ваттам. Так если вы включите 8 лампочек дома, кто-то где-то разовьет мощность в одну лошадиную силу (хотя более вероятно это будет 4 или 5 л.с.) в электрическом выражении и будет поддерживать такую мощность до тех пор пока вы будете оплачивать квитанции в конце месяца.

Все эти рассуждения нужны для того чтобы определить сколько лошадиных сил потребуется для того чтобы преодолеть силу сопротивления воздуха на заданной скорости. Для этого нам надо силу сопротивления умножить на скорость и поделить на 75 (коэффициент преобразования из кгс*м/с в л.с.):

$$P = \frac{0.0358}{75} v^3$$

На основе этой формулы построим таблицу

Скорость, км/ч	50	90	110	150	200	240	320
Сила сопротивления, кг	7	22	28	62	110	159	283
Мощность, л.с.	1	7	14	35	82	141	335

Я взял 90 и 110 км/ч для того чтобы показать почему ограничение скорости экономит бензин. На скорости 90 км/ч требуется только 7 л.с. для того чтобы преодолеть силы сопротивления воздуха, в то время как на скорости 110 км/ч потребуется уже 14 л.с. Расход бензина же примерно пропорционален вырабатываемой мощности.

Гораздо более интересно для гонщиков следующее. 140 л.с. требуется для автомобиля чтобы преодолевать силу лобового сопротивления на скорости 240 км/ч. Мы знаем что наш Corvette с такой максимальной скоростью имеет мощность 240 л.с., таким образом около 100 л.с. будет расходоваться на преодоления сопротивления качения и сил внутреннего трения. Гоночные машины способные разгоняться до 320 км/ч обычно имеют мощность 650 л.с., около 350 из которых идет на преодоление сил лобового сопротивления воздуха. Вероятно возможно разогнаться до такой скорости на машине с 450-500 л.с., но такая машина должна иметь очень хорошую аэродинамику, очень низкие потери на внутреннее трение и резину с низким трением качения, которые делают с наименьшим пятном контакта, то есть не лучшим вариантом для хорошей управляемости.

Глава 7. Запас сцепления.

В этом месяце мы рассмотрим запас сцепления. Такой способ рассмотрения сцепления применим для управления машиной в различных условиях. Он может помочь принять решение при изучении стиля пилотирования, правильной траектории на трассе и выявлении проблем с управляемостью. Мы рассмотрим визуализацию запаса сцепления при помощи диаграмм и будем комбинировать их с хорошо известным инструментом визуализации кругом сцепления или как его ещё называют кругом трения. Итак, эта глава об инструментах концептуального и визуального рассмотрения физики гонок.

Для введения в понятие запас сцепления сначала мы должны представить покрывку на контакте с дорогой. Рисунок 1 показывает как может выглядеть поверхность на нижней части покрывки если смотреть сверху. Другими словами рис. 1 показывает «рентгеновское видение» пятна контакта покрывки. В оставшейся части этой главы мы будем рассматривать покрывку именно с такой точки зрения. Верх диаграммы будет указывать направление вперед, низ диаграммы соответственно будет соответствовать направлению назад.

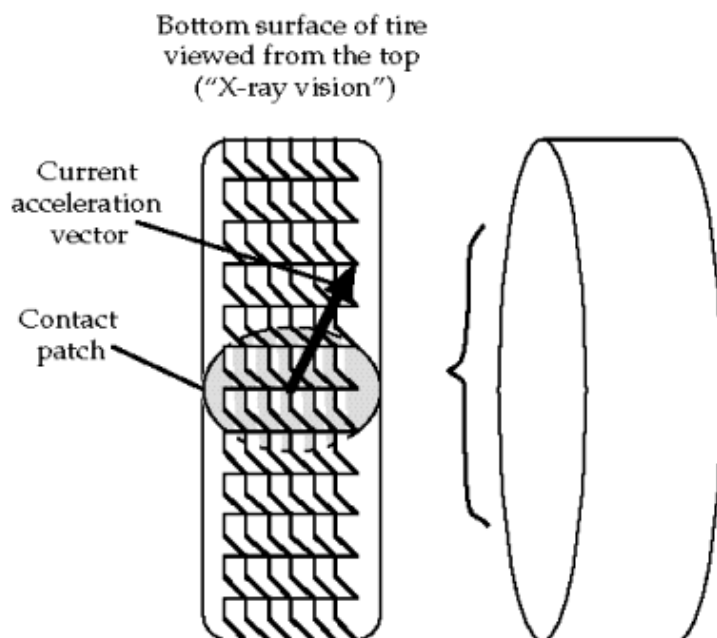


Figure 1: The bottom surface of a tire viewed from the top as though with "X ray vision."

Рис. 1 Нижняя поверхность покрывки показанная как через «рентгеновское зрение» На рисунке показан затемненный эллипс, где покрывка давит на землю. Всё взаимодействие покрывки и дороги происходит в этом эллипсе – пятне контакта. Во время вращения колеса один ряд молекул резины за другим попадает в пятно контакта, но пятно всегда более или менее сохраняет свою форму, размер и положение относительно оси вращения покрывки и автомобиля в целом. Мы можем использовать неподвижность пятна контакта для упрощения представления взаимодействия покрывки с дорогой. Это упрощение позволит нам производить примерные расчеты быстрее, проще и с хорошей погрешностью не превышающей нескольких процентов (полный математический анализ потребует рассмотрения системы координат которые вращаются вместе с колесом в то время как система координат дороги стоит на месте, а система координат машины движется. Это потребует введения множества формул для описания связей между этими системами координат, и оставшиеся несколько процентов погрешности будут стоить очень большого усложнения расчетов).

Вы помните что силы действующие от земли на покрышку заставляют автомобиль менять скорость или направление движения. На «рентгеновском снимке» силы направленные вверх будут заставлять автомобиль ускоряться, силы направленные вниз – замедляться, силы направленные вправо и влево будут заставлять автомобиль изменять направление движения. Рассмотрим ускорение. Двигатель создает крутящий момент и прикладывает его к оси. Этот момент становится силой направленной назад (вниз на диаграмме), эту сила через колесо передается на дорогу. По третьему закону Ньютона возникает ответная сила направленная противоположно, то есть вперед (вверх) и действующая на пятно контакта. Эта ответная сила и разгоняет автомобиль. Помните что надо брать в расчет только силы на колесе и игнорировать силы указывающие в обратном направлении и приложенные к земле.

Вы также помните что покрышка имеет ограниченную способность прилипать к земле. Если сила приложенная к покрышке будет слишком большая то покрышка просто начнет скользить. Максимальная сила которую покрышка может воспринять зависит от веса приложенного к ней: $F \leq \mu W$, где F – сила на покрышке, μ – коэффициент сцепления, W – вес или нагрузка на колесо.

Согласно второму закону ньютона, вес на колесе зависит от доли массы автомобиля которую это колесо должно поддерживать и ускорения силы тяжести ($9,8\text{м/с}^2$). Доля массы автомобиля которую должно поддерживать колесо это геометрический параметр, такой как колесная база или высота центра тяжести. Она также зависит от величины и направления ускорения автомобиля которые воздействуют на перераспределение веса.

Важно разделять геометрический или кинематический аспект перераспределения веса от массы автомобиля. Давайте представим две машины с одинаковой геометрией, но разной массой (весом). При торможении в $1g$ одинаковая доля веса автомобиля переместится вперед. В примере в главе 1 мы рассчитали, что это будет 20% веса, поскольку высота центра тяжести автомобиля в примере составляла 20% от колесной базы. Доля перераспределенного веса в 20% будет одинаковой и на 1,6 тонном Corvette и на 800 кг корче Corvette с трубчатым каркасом. Поскольку геометрические параметры (колесная база, высота центра тяжести итп) будут одинаковыми доля перенесенного веса будет одинаковой, а реальная величина перенесенного веса в кг будет различаться.

Отделяя кинематику от массы мы получим для веса уравнение $W=f(a)mg$ где $f(a)$ это доля веса на колесе с учетом перераспределения масс, m – масса автомобиля и g – ускорение свободного падения.

И наконец, согласно второму закону ньютона ускорение колеса под воздействием силы F будет $a = F/f(a)m$. Мы можем объединить эти выражения для того чтобы получить нужный вывод.

$$a = \frac{F}{f(a)m} \leq a_{\max} \quad a_{\max} = \frac{\mu W}{f(a)m} = \frac{\mu f(a)mg}{f(a)m} = \mu g$$

Максимальное ускорение которое может развить колесо будет μg , и это постоянная величина которая не зависит от массы автомобиля! Максимальная сила передаваемая колесом будет зависеть от текущего веса на этом колесе, но максимально возможное ускорение от веса зависеть не будет. Если резина может обеспечить ускорение в $1g$ до того как начнет буксовать то это будет справедливо как для легкой так и для тяжелой машины. Кроме того максимальное ускорение в $1g$ будет доступно как на загруженном так и на разгруженном колесе. Мы отметили это в главе 2, но вышеприведенный анализ, надеюсь, дал лучшее понимание этого вопроса. Отметим что a_{\max} будет постоянной только в первом приближении поскольку μ будет немного меняться в зависимости от веса на колесе, но это явление «второго порядка» и оно будет рассмотрено в дальнейших главах.

Итак, при приблизительных расчетах мы можем рассматривать максимально доступное ускорение резины независимо от перераспределения веса. Резина даст столько G сколько сможет. Это основа для понятия «запас сцепления». Что вы будете делать с этим запасом это ваше дело. Если у вас стоит резина которая может дать 1g вы можете использовать её для разгона, торможения, поворотов или различных комбинаций этих действий, но вы не сможете использовать больше сцепления чем есть у вас в запасе поскольку при достижении максимально возможного ускорения резина начнет скользить. Продольная составляющая (вперед-назад) запаса сцепления измеряется разгоном и торможением а поперечная составляющая (вправо-влево) измеряется ускорением поворота. Продольная составляющая ускорения, назовем её a_y складывается с поперечной составляющей a_x не простым сложением а по теореме Пифагора.

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$$

С этой формулой не очень удобно иметь дело, гораздо удобней для наглядного представления запаса сцепления использовать круговую диаграмму сцепления. На рис. 2 изображен круг. Он имеет ту же ориентировку что и схема «рентгеновского видения» пятна контакта колеса в рис. 1, то есть верх - это направление вперед, право - это направление вправо. Круговая граница представляет собой предел запаса сцепления, а каждая конкретная точка внутри круга показывает как вы расходуете свой запас. Точка у самого верха представляет собой чистое ускорение, точка внизу будет представлять чистое торможение. Точка у правой границы без поперечного компонента будет представлять собой чистое боковое ускорение. Другие точки представляют собой комбинации поворотов, торможения и разгона.

Особая прелесть такого представления состоит в том что эффект переноса веса здесь исключен, поэтому круг никак не изменится при изменении нагрузки на колесо.

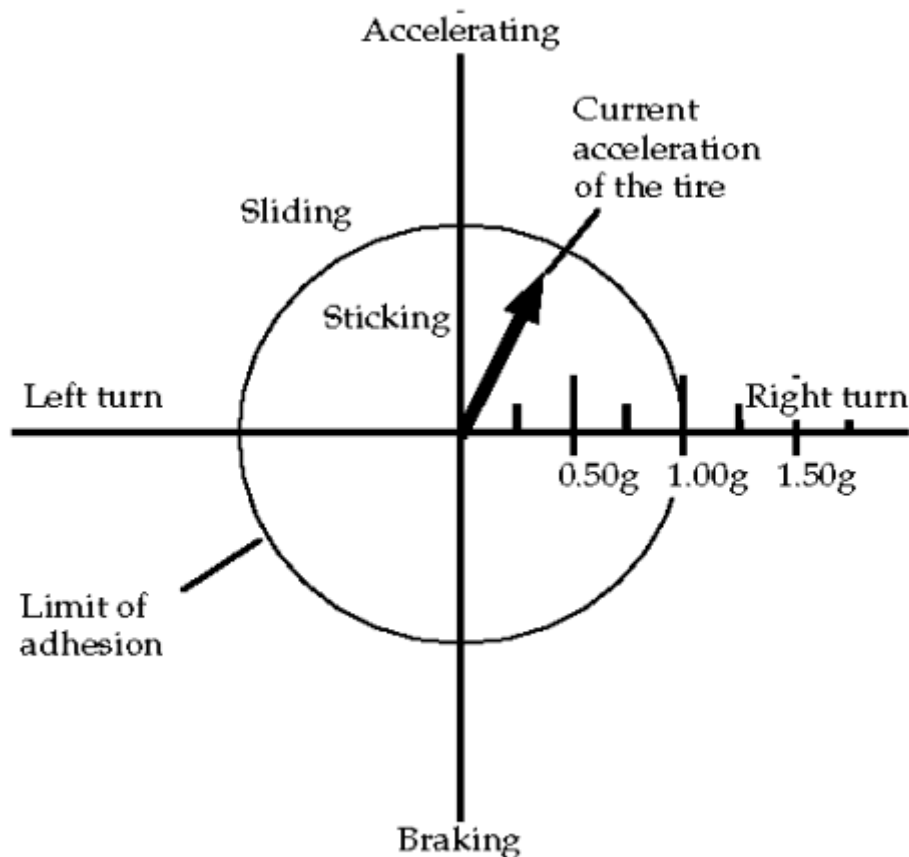


Figure 2: The Circle of Traction

Рис. 2 Круговая диаграмма сцепления

В гонке, мы, естественно, стараемся расходовать запас так чтобы оказываться близко к пределу. При повседневной езде мы пытаемся держаться внутри круга так чтобы нам было доступен ещё сцепление на непредвиденные ситуации.

Я должен выделить что круговая диаграмма запаса сцепления только примерно представляет реальное положение дел. Этого достаточно чтобы сделать компьютерную симуляцию которая будет выглядеть очень правдоподобно. Как упоминалось изменение нагрузки на колеса даст небольшие изменения сцепных свойств резины. Характеристики машины тоже вносят некоторые изменения. Представим автомобиль с с плохой (скользкой) резиной сзади и хорошей (цепкой) резиной спереди. Такая машина будет иметь избыточную поворачиваемость и её запас сцепления не будет выглядеть как круг. На рис. 3 показано как будет выглядеть запас сцепления для всей машины целиком (до этого мы обсуждали отдельное колесо). На рис. 3 большой круг соответствует передним колесам с хорошей резиной, а маленький круг задним колесам с плохой резиной. При ускорении на задних колесах будет увеличиваться сцепление по причине переноса веса назад, при торможении сцепление будет увеличиваться спереди. Совмещенный график запаса сцепления будет выглядеть как яйцо сплюснутое сверху вниз и вытянутое в поперечном направлении. При торможении будет доступно больше сцепления в повороте чем при ускорении поскольку здесь будут работать передние хорошие колеса.

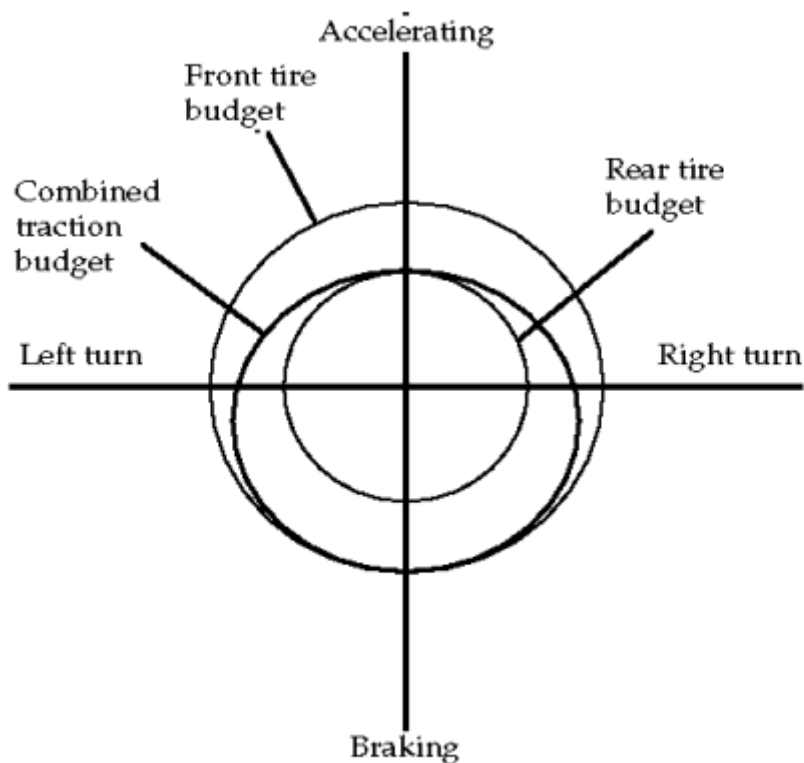


Figure 3: A traction budget diagram for a poorly handling car.

Рис 3. График запаса сцепления для машины с плохой управляемостью.

Запас сцепления это многогранный и простой способ анализа и визуализации поведения машины. Этот метод можно применять при развитии навыков пилота, рассматривать траекторию по трассе и выявлять проблемы с управляемостью.