

Физика тормозных систем
Джеймс Волкер младший, scR motorsports
Copyright © 2005 StopTech LLC

Замечание автора: механические системы действующие в реальном мире эффективны не на 100% и не способны изменить состояние системы мгновенно. Следовательно, уравнения и соотношения, приведенные здесь это приближенное описание таких тормозных систем наилучшим образом для понимания механизма их действия и их физических свойств. Где необходимо, приведены примеры ограничивающих условий и основных источников низкой точности, но не думайте что в таких местах приведены все возможные варианты.

Сохранение энергии

Тормозные системы существуют для преобразования энергии движения автомобиля в тепловую энергию, наиболее часто называемую теплом. Как известно из основ физики, кинетическая энергия движущегося тела определяется как:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m_v \cdot v_v^2,$$

где E – кинетическая энергия, m_v – масса (или вес) автомобиля в движении, а v_v – скорость.

В идеале, эта энергия полностью поглощается тормозной системой. Несмотря на то что это не на 100% так, для автомобиля при максимальном торможении наибольшая часть кинетической энергии преобразуется в тепловую энергию. Этот процесс описывается уравнением:

$$\frac{1}{2} \cdot m_v \cdot v_v^2 = m_b \cdot C_p \cdot \Delta T_b,$$

где m_b – масса элементов тормозной системы, которые поглощают энергию, C_p – удельная теплоемкость этих элементов и ΔT_b – повышение температуры этих компонентов.

Отметим, что для одиночных торможений тормозной диск служит главным накопителем энергии.

Из вышесказанного следует что нагрев тормозной системы прямо пропорционален массе автомобиля, но более важно что этот нагрев прямо пропорционален квадрату скорости автомобиля. Другими словами удвоение скорости теоретически вызовет четырехкратное увеличение температуры тормозов. На практике, трение качения резины, аэродинамическое сопротивление, сопротивление движению на подъем и другие механические потери также будут играть энергопоглощающую роль, а их величина это ограничивающее условие применимости соотношения приведенного выше.

Педаль тормоза.

Педаль тормоза сделана для увеличения силы ноги водителя. Из элементарной статики известно, что увеличение силы будет расти пропорционально плечу рычага педального узла:

$$F_{bp} = F_d \cdot \{L_2 \div L_1\},$$

где F_{bp} – сила, созданная педальным узлом в сборе, F_d сила, прикладываемая на площадку педали тормоза водителем, L_1 расстояние от оси рычага педали до штифта цилиндра, L_2 расстояние от оси рычага до площадки педали.

Отметим что это уравнение основано на допущении 100% механической эффективности всех компонентов педального узла. На практике, изгибание узлов и трение делают это уравнение немного неточным.

Главный тормозной цилиндр

Основная функция главного тормозного цилиндра это преобразование силы применяемой на педальный узла в гидравлическое давление тормозной жидкости. Предполагая, что жидкость несжимаема и что вся система абсолютно жесткая (не расширяется под давлением) давление создаваемое главным тормозным цилиндром будет:

$$P_{mc} = \frac{F_{bp}}{A_{mc}},$$

где P_{mc} – гидравлическое давление создаваемое главным тормозным цилиндром, A_{mc} – площадь поршня главного тормозного цилиндра.

Отметим, что уравнение предполагает 100% эффективность всех компонентов. На практике, свойства тормозной жидкости, трение сальников и нежесткость компонентов системы делают уравнение не абсолютно точным.

Тормозная жидкость, тормозные трубки и тормозные шланги.

Функция тормозной жидкости, тормозных трубок и шлангов это передавать давление от главного цилиндра сцепления к рабочим цилиндрам на колесах. Конструктивно, часть этой подсистемы должна быть изготовлена из гибкого (мягкого) материала, поскольку колеса должны двигаться относительно подрессоренных масс (каркаса автомобиля). Хотя, опять, предполагая что тормозная жидкость несжимаема и тормозные резервуары абсолютно жесткие давление, передаваемое к суппортам будет:

$$P_{cal} = P_{mc},$$

где P_{cal} – гидравлическое давление, передаваемое к рабочим тормозным цилиндрам.

Отметим, что уравнение предполагает 100% гидравлическую эффективность тормозной жидкости, тормозных трубок и шлангов. На практике, свойства жидкости и не абсолютная твердость гибких тормозных шлангов делает это уравнение не абсолютно верным.

Рабочий тормозной цилиндр, часть 1.

Основная функция рабочего тормозного цилиндра это преобразовывать гидравлическое давление в системе в механическую силу. Ещё раз предполагая, что тормозная жидкость несжимаема, а тормозные резервуары абсолютно жесткие, односторонняя механическая сила создаваемая рабочим цилиндром будет:

$$F_{cal} = P_{cal} \cdot A_{cal},$$

где F_{cal} – сила создаваемая рабочим цилиндром, а A_{cal} площадь этого цилиндра.

Отметим, что это отношение предполагает 100% гидравлическую эффективность всех компонентов суппорта в сборе. На практике, свойства тормозной жидкости, трение в сальниках и не абсолютная жесткость компонентов делает это уравнение не абсолютно точным.

Рабочий тормозной цилиндр. Часть 2.

Вторая функция рабочего тормозного цилиндра это преобразование односторонней линейной силы таким образом, чтобы создавалась сжимающая сила между двумя половинами тормозного суппорта. Независимо от конструкции суппорта, теоретически сжимающая сила будет равна удвоенной механической силе:

$$F_{clamp} = F_{cal} \cdot 2$$

где F_{clamp} – сжимающая сила создаваемая рабочим тормозным цилиндром.

Отметим, что это соотношение предполагает 100% механическую эффективность всех компонентов суппорта. На практике, не абсолютная жесткость и в случае конструкции суппорта направляющими, трение направляющих втулок делает это уравнение не 100% верным.

Тормозные колодки.

Функция тормозных колодок – создавать силу трения, которая противостоит вращению тормозных дисков. Эта сила трения соотносится со сжимающей силой следующим образом:

$$F_{friction} = F_{clamp} \cdot \mu_{bp},$$

где $F_{friction}$ – сила трения, создаваемая тормозными колодками, которая противостоит вращению тормозных дисков, а μ_{bp} – коэффициент трения между тормозными дисками и колодками.

Отметим, что это уравнение предполагает 100% механическую эффективность всех компонентов. На практике, механическая сжимаемость тормозных колодок и трение между тормозными колодками и суппортом делают это уравнение не абсолютно точным. Дополнительно, нужно отметить, что коэффициент трения между колодками и тормозными дисками это не фиксированная величина, а величина, которая меняется в зависимости от времени, температуры, давления износа и других факторов.

Тормозной диск

Тормозной диск служит основным тепловым приемником тормозной системы, кроме того его основная функция создавать обратный крутящий момент в зависимости от силы трения оказываемой тормозными колодками. Этот крутящий момент связан с силой трения тормозных колодок следующим образом:

$$T_r = F_{friction} \cdot R_{eff},$$

где T_r тормозящий крутящий момент и R_{eff} – эффективный радиус тормозного диска, измеренный от центра тормозного диска до центра рабочего тормозного цилиндра.

Поскольку ротор механически выполнен в сборе со ступицей колеса и колесом и поскольку резина предполагается абсолютно жестко закрепленной на колесе, крутящий момент всех вращающихся частей в сборе будет следующим:

$$T_t = T_w = T_r,$$

где T_t – крутящий момент на шине и T_w крутящий момент колеса в сборе.

Отметим, что это уравнение предполагает 100% эффективность всех компонентов колеса. На практике механическая гибкость и относительная подвижность между собой вращающихся частей делает это уравнение не абсолютно точным.

Шина.

Предполагая хорошее сцепление между шиной и дорогой регулирование торможения пилотом, шина будет начинать проскальзывать из-за наличия тормозного крутящего момента на колесе в сборе. Величина проскальзывания будет зависеть от свойств шины, но сила передаваемая на дорогу будет следующей:

$$F_{tire} = \frac{T_t}{R_t},$$

где F_{tire} – сила передаваемая на дорогу (предполагая что трения достаточно чтобы передать эту силу) и R_t эффективный радиус вращения нагруженной покрышки.

До этого момента наш анализ состоял из анализа одного колеса, поскольку современные автомобили имеют по одному колесу на каждый угол, в процессе

торможения участвуют 4 колеса. Исходя из этих соображений, общая тормозная сила будет равняться сумме тормозных сил на пятнах контактов:

$$F_{total} = \sum F_{tireLF,RF,LR,RR} ,$$

где F_{total} – общая тормозная сила между автомобилем и землей (предполагая соответствующее сцепление).

Торможение автомобиля

На основе законов Ньютона, если на тело действует сила, то тело будет двигаться с соответствующим ускорением. Если ускорение будет направлено против направления движения, то оно будет называться замедлением. В случае если на автомобиль воздействует тормозная сила, его замедление будет следующим:

$$a_v = \frac{F_{total}}{m_v} ,$$

где a_v – замедление автомобиля.

Кинематические уравнения автомобиля при торможении

Интегрируя замедление автомобиля по времени позволит найти скорость. Интегрируя опять скорость можно получить расстояние. Применяя эти соотношения к автомобилю движущемуся равнозамедленно, теоретически расстояние пройденное автомобилем можно найти следующим образом:

$$SD_v = \frac{v_v^2}{2 \cdot a_v} ,$$

где SD_v – расстояние до остановки автомобиля.

Отметим что это уравнение предполагает постоянное замедление с заданной скорости пока автомобиль не остановится. На практике ни замедление не может возникнуть мгновенно, ни может быть постоянного замедления до остановки автомобиля.

Определение параметров связанных со статичным распределением веса

Когда автомобиль стоит на месте или когда движется без ускорения, он имеет фиксированное распределение веса по разным колесам. Сумма весов на переднем левом и переднем правом колесах будет весом на передней оси, а сумма весов на заднем левом и заднем правом колесах будет весом на задней оси. Если этот вес известен, то распределение веса можно посчитать следующим образом:

$$D_{front} = \frac{V_f}{V_t} \cdot 100\%$$

и

$$D_{rear} = \frac{V_r}{V_t} \cdot 100\% ,$$

где D_{front} – доля веса на передней оси, D_{rear} – доля веса на задней оси, V_f – вес на передней оси, V_r – вес на задней оси V_t общий вес автомобиля.

Если статическое распределение веса известно, то продольное расположение центра тяжести может быть определено геометрически:

$$CG_{f,x} = \frac{V_r}{V_t} \cdot WB$$

и

$$CG_{r,x} = \frac{V_f}{V_t} \cdot WB ,$$

где $CG_{f,x}$ – расстояние от передней оси до центра тяжести, $CG_{r,x}$ расстояние от задней оси до центра тяжести, WB колесная база автомобиля (расстояние от передней до задней оси).

Из этих соотношений следует что:

$$CG_{f,x} + CG_{r,x} = WB$$

Когда автомобиль тормозит, нормальные силы (вес) на четырех колесах автомобиля будут меняться. Общий вес автомобиля будет оставаться постоянным, но вес на передней оси при торможении будет увеличиваться, в то время как вес на задней оси будет уменьшаться на ту же величину. Как показывает следующее уравнение, величина этого перераспределения веса будет зависеть от ускорения торможения и параметров автомобиля:

$$WT = \left(\frac{a_v}{g} \right) \cdot \left(\frac{h_{cg}}{WB} \right) \cdot V_t,$$

где WT - абсолютная величина веса перенесенного с задней оси на переднюю, g – ускорение силы тяжести, h_{cg} – высота центра тяжести автомобиля от земли.

Для расчета веса на осях при заданном торможении определенный вес будет прибавляться на переднюю ось, и этот же вес отниматься от задней оси:

$$V_{f,d} = V_f + WT$$

$$V_{r,d} = V_r - WT,$$

где $V_{f,d}$ – динамический вес при заданном замедлении на передней оси и $V_{r,d}$ – динамический вес при заданном замедлении на задней оси.

Из этих соотношений прямо следует, что при любом замедлении:

$$V_{f,d} + V_{r,d} = V_t$$

Влияние перераспределения веса на возможности резины

Поскольку на автомобилях существует динамическое перераспределение веса, способность каждой оси создавать тормозную силу меняется. При статический условиях, максимальная тормозная сила на каждой оси будет определяться следующим отношением:

$$F_{tires,f} = \mu_{peak,f} \cdot V_f$$

и

$$F_{tires,r} = \mu_{peak,r} \cdot V_r,$$

где $F_{tires,f}$ – комбинированная тормозная сила на передней оси, $F_{tires,r}$ комбинированная тормозная сила на задней оси, $\mu_{peak,f}$ – максимальный эффективный коэффициент сцепления между передними покрышками и дорогой и $\mu_{peak,r}$ – максимальный эффективный коэффициент сцепления между задними покрышками и дорогой.

В результате перераспределения веса при торможении, максимальная тормозная сила на осях преобразуется:

$$F_{tires,f} = \mu_{peak,f} \cdot V_{f,d} = \mu_{peak,f} \cdot (V_f + WT)$$

и

$$F_{tires,r} = \mu_{peak,r} \cdot V_{r,d} = \mu_{peak,r} \cdot (V_r - WT),$$

где $F_{tires,f}$ – общая замедляющая сила передних шин, $F_{tires,r}$ – общая замедляющая сила задних шин.

Как показано соотношениями выше, перераспределение веса увеличивает способность передних шин создавать тормозное усилие, и одновременно уменьшает способность создавать тормозное усилие задних шин.

Отметим, что в этом анализе предполагалось, что $\mu_{peak,f}$ и $\mu_{peak,r}$ независимы от величины замедления, хотя на практике они чувствительны к изменению нагрузок связанных с перераспределением веса. Следовательно, перераспределение веса уменьшает общую способность автомобиля тормозить на очень маленькую величину.

Расчет оптимального тормозного баланса

Для достижения оптимального тормозного баланса, или 100% эффективности торможения, отношения передних и задних тормозных сил должно быть равно отношению весов на передней и задней оси. При статических нагрузках:

$$\frac{F_{tires,f}}{V_f} = \frac{F_{tires,r}}{V_r}$$

Когда автомобиль тормозит, вес перераспределяется, и соотношение весов на передней и задней оси меняются следующим образом:

$$\frac{F_{tires,f}}{V_{f,d}} = \frac{F_{tires,r}}{V_{r,d}}$$

Из этого соотношения следует, что пока отношение передних и задних тормозных сил фиксированный параметр, основанный на механических размерах тормозных систем, отношение передних и задних вертикальных сил (веса) меняется в зависимости от замедления и геометрии автомобиля. Отсюда следует, что отношение может быть оптимизировано только для одной величины замедления и нагрузок (обычно это максимально возможное замедление, с максимальной загрузкой передней оси)