

Анализ основного свойства дифференциалов как фактора динамических качеств колёсных машин

Ю.Г. Горшков, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ; С.В. Золотых, к.т.н., ЧОУ ДО «Золотерра»

Разнообразие типов самоблокирующихся дифференциалов, применяемых в автотракторостроении наряду с обычными, указывает на необходимость совершенствования системы их оценок.

Основным свойством дифференциалов колёсных машин, исходя из их назначения, следует считать способность обеспечивать раздельное качение ведущих колёс при движении на повороте, по неровной дороге и при неодинаковых радиусах колёс. Это свойство дифференциалов изучено недостаточно.

Среди самоблокирующихся дифференциалов широкое распространение получили дифференциалы с повышенным внутренним трением и двухсторонние муфты свободного хода [1, 2]. Их способность значительно перераспределять тяговые усилия по ведущим колёсам, с одной стороны, повышает проходимость машины, с другой — приводит в ряде случаев к нарушению раздельного качения ведущих колёс [3, 4].

Момент внутреннего трения дифференциала способен играть заметную роль даже в обычных шестеренчатых дифференциалах, имеющих наибо-

лее низкий коэффициент внутреннего трения. Это подтверждают исследования характера буксования ведущих колёс нескольких десятков автомобилей ЗиЛ-4331, имеющих тип шин с различной степенью изношенности протектора, при интенсивном трогании автомобилей с места на укатанной снежной дороге. При небольшой разнице в условиях сцепления ведущих колёс с дорогой автомобили с изношенным протектором шин имели при интенсивном трогании с места пробуксовывание одним колесом, а автомобили с развитыми грунтозацепами шин (типа «Вездеход») в тех же условиях — пробуксовывание обоими ведущими колёсами.

Испытаниями двухсторонних муфт свободного хода в ведущих мостах автомобиля ЗиЛ-130 и ЗиЛ-4331, проведенными в ЧГАУ (ЧИМЭСХ, ЮУрГАУ) [5, 6], установлено, что при движении автомобилей по снегу, пахоте, песку и другим мягким грунтам отключения одной из полуосей на неровной дороге и при поворотах автомобиля не происходит. Работа автомобиля с двухсторонними муфтами свободного хода в этих условиях не отличается от работы бездифференциального автомобиля.

Отсутствие раздельного качения ведущих колёс при движении машины по неровной дороге и на

поворотах способствует повышению сопротивления передвижению, увеличению износа шин, ухудшению управляемости, увеличению расхода топлива и снижению устойчивости машины к боковому заносу.

Оценку основного свойства наиболее распространённых типов дифференциалов целесообразно проводить в сравнении с самоблокирующимся шестеренчатым дифференциалом. Распределение подведённого момента к ведущим колёсам различными дифференциалами зависит от величины момента внутреннего трения дифференциала:

$$M_r = \xi \cdot M_o, \quad (1)$$

где ξ – коэффициент внутреннего трения в дифференциале;

M_o – момент, подведённый к корпусу дифференциала.

Момент внутреннего трения в дифференциале при раздельных перемещениях колес может быть определён следующим образом:

$$M_r = M_1 - M_2, \quad (2)$$

где M_1 – крутящий момент на отстающем колесе;

M_2 – крутящий момент на забегающем колесе.

При прямолинейном движении колёсной машины по ровной дороге, пренебрегая сопротивлением воздуха, можно записать:

$$M_1 = M_2 = \frac{1}{2} \cdot M_o = \frac{1}{2} \cdot r_k \cdot \psi \cdot G, \quad (3)$$

где ψ – коэффициент дорожного сопротивления движению машины;

G – полный вес машины;

r_k – радиус качения ведущего колеса.

Каждое из ведущих колёс в этом случае имеет запас момента по сцеплению ведущих колёс с дорогой:

$$\Delta M = \frac{1}{2} \cdot (G_{сц} \cdot \varphi \cdot r_k - M_o), \quad (4)$$

где $G_{сц}$ – сцепной вес колёсной машины;

φ – коэффициент сцепления ведущих колес с дорогой.

При движении машины с разными угловыми скоростями ведущих колёс (например, на повороте) в результате неравномерного распределения дифференциалом крутящего момента отстающее ведущее колесо получает увеличение крутящего момента, а забегающее – его уменьшение на величину:

$$\frac{1}{2} \cdot M_r = \frac{1}{2} \cdot \xi \cdot M_o = \frac{1}{2} \cdot \xi \cdot G \cdot \psi \cdot r_k. \quad (5)$$

Неравномерное распределение крутящего момента по ведущим колёсам приводит к возникновению циркулирующей паразитной мощности через дифференциал, полуоси, ведущие колеса и полотно дороги (рис. 1). Величина этой мощности прямо пропорциональна разности угловых скоростей и крутящих моментов ведущих колёс [1–6].

В зависимости от условий движения ограничение циркулирующей паразитной мощности возможно либо за счёт проскальзывания в диф-

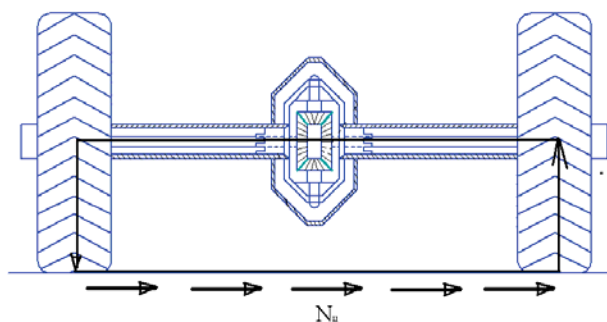


Рис. 1 – Принципиальная схема циркуляции паразитной мощности при движении автомобиля

ференциале, как механизме с двумя степенями свободы, либо за счёт проскальзывания одного из ведущих колёс относительно дороги.

Определим условия работы ведущего моста для каждого из указанных случаев.

Работа дифференциала определяется соотношением между внутренним моментом трения дифференциала и моментами сцепления ведущих колёс с дорогой. Если приращение тягового усилия на внутреннем колесе, например при повороте машины, оказывается больше, чем запас силы сцепления этого колеса с дорогой, то геометрическое несоответствие ведущих колёс компенсируется не за счёт работы дифференциала, а за счёт пробуксовывания внутреннего ведущего колеса, имеющего всегда больший подведённый крутящий момент.

В общем случае можно утверждать, что если при одинаковом сцеплении каждого из ведущих колёс с дорогой хотя бы одно из них начинает пробуксовывать относительно дороги, то дифференциал независимо от типа выключается из работы, а ведущая ось имитирует работу неразрезной оси, при которой отсутствует раздельное качение ведущих колес.

Материал и методы исследования. Условие самовыключения дифференциала из работы может быть представлено выражением, соответствующим исчерпыванию запаса тяги по сцеплению с дорогой на отстающем ведущем колесе, получившим приращение крутящего момента:

$$\frac{1}{2} \cdot \varphi \cdot G_{сц} \cdot r_k - \frac{1}{2} \cdot M_o \leq \frac{1}{2} \cdot M_o \cdot \xi. \quad (6)$$

Подставив в уравнение вместо M_o его выражение из формулы (1), получим:

$$\frac{\psi}{\varphi} \geq \frac{\gamma}{1 + \xi}, \quad (7)$$

где γ – коэффициент загрузки ведущих колес весом автомобиля; $\gamma = \frac{G_{сц}}{G}$.

Формула (7) характеризует внешние условия работы машины, выраженные через отношение коэффициентов дорожного сопротивления к коэффициенту сцепления колёс с дорогой, при которых дифференциал самовыключается, а ведущий мост работает так же, как при заблокированных полуосях.

Выражение

$$\frac{\Psi}{\phi} = \frac{\gamma}{1+\xi} \quad (8)$$

характеризует момент качественного изменения свойств дифференциала, зависящего от условий движения колёсной машины, когда дифференциал утрачивает вторую степень свободы и, следовательно, перестает быть дифференциалом. В правой части формулы все величины постоянные. Назовём их отношением коэффициентом блокировки. Для каждого типа дифференциала коэффициент блокировки K_ϕ имеет вполне определённое значение, так как $K_\phi = \frac{\gamma}{1+\xi} = const$.

Коэффициент внутреннего трения дифференциала может быть найден из выражения:

$$\xi = \frac{K_\phi - 1}{K_\phi + 1}, \quad (9)$$

где $K_\phi = \frac{M_1}{M_2}$ – коэффициент перераспределения

дифференциалом крутящего момента, равный отношению моментов на ведущих колёсах – от большего к меньшему.

Физический смысл коэффициента блокировки K_ϕ можно представить следующим образом. Если на каком-то участке пути при движении машины отношение $\frac{\Psi}{\phi}$ изменяется равномерно в пределах от нуля до единицы, то K_ϕ выражает в этом случае долю пути, которую автомобиль проходит, сохраняя раздельное качение колёс. Оставшаяся часть пути преодолевается машиной при отсутствии раздельного качения колёс.

Значения коэффициентов блокировки K_ϕ для некоторых типов дифференциалов автомобиля ЗИЛ-4331 приведены в таблице 1.

Для двухсторонних муфт свободного хода в расчётах из сопоставления формул (7) и (8) условно принят коэффициент $\xi = 1$. Из выражения (7) видно, что чем меньше коэффициент внутреннего трения дифференциала, тем больше величина отношения $\frac{\Psi}{\phi}$, до которой дифференциал способен обеспечивать раздельное качение ведущих колёс.

2. Значения коэффициентов f и ϕ и отношения $\frac{f}{\phi}$ для некоторых типов несущих поверхностей

1. Значения коэффициентов блокировки K_ϕ для некоторых типов дифференциалов автомобиля ЗИЛ-4331

| Тип дифференциала | Коэффициент блокировки дифференциала K_ϕ для автомобиля ЗИЛ-4331 | |
|-------------------------------------|---|-----------|
| | с грузом | без груза |
| Шестеренчатый простой | 0,68 | 0,50 |
| Шестеренчатый самоблокирующийся | 0,68 | 0,50 |
| Кулачковый ($K_p=6$) | 0,425 | 0,32 |
| Червячный ($K_p=9$) | 0,39 | 0,29 |
| Двухсторонняя муфта свободного хода | 0,35 | 0,26 |

Условия движения колёсной машины, при которых блокировка дифференциала является желательной, могут быть определены по формуле (7), если считать, что в отдельном случае $\xi = 0$. Тогда

$$\frac{\Psi}{\phi} \geq \gamma \quad (10)$$

или при неодинаковом сцеплении ведущих колёс с дорогой

$$\frac{\Psi}{\phi_{\min}} \geq \gamma. \quad (11)$$

По таблице 1 видно, что врез с требованиями, предъявляемыми к идеальному дифференциалу, применяемые в настоящее время самоблокирующиеся дифференциалы при равном сцеплении колёс с дорогой в диапазоне условий, определяемых выражением:

$$\frac{\gamma}{1+\xi} \leq \frac{\Psi}{\phi} \leq \gamma, \quad (12)$$

могут допускать работу, не обеспечивающую раздельного качения ведущих колёс.

Результаты исследования. Для того чтобы с помощью выведенного критерия оценки основного свойства дифференциала – коэффициента блокировки – можно было бы судить о работе дифференциала в различных условиях движения, представим последнее выражение отношением $\frac{f}{\phi}$.

Если машина движется по горизонтальному пути, то коэффициент качения и коэффициент дорожного сопротивления равны и соответственно равны их отношения:

| Состояние дороги | Коэффициент качения f | Коэффициент сцепления ϕ | | Отношение $\frac{f}{\phi}$ | |
|--------------------------------------|-------------------------|------------------------------|---------|----------------------------|-----------|
| | | поверхность | | поверхность | |
| | | сухая | мокрая | сухая | мокрая |
| Асфальт | 0,02 | 0,7 | 0,304 | 0,03 | 0,05–0,07 |
| Укатанная дорога на глинистом грунте | 0,03 | 0,8 | 0,3–0,4 | 0,04 | 0,07–0,1 |
| То же на песчаном грунте | 0,04 | 0,07 | 0,4 | 0,06 | 0,1 |
| Влажный скошенный луг | 0,08 | – | 0,07 | – | 0,11 |
| Укатанная дорога на черноземе | 0,05 | 0,6 | 0,3–0,4 | 0,08 | 0,12–0,17 |
| Влажная снежная дорога | 0,03 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 0,3 |
| Слежавшаяся пахота | 0,12 | 0,5 | 0,3–0,4 | 0,24 | 0,3–0,4 |
| Влажный песок | 0,16 | – | 0,4 | – | 0,4 |
| Свежевспаханное поле | 0,18 | 0,4 | 0,3 | 0,45 | 0,6 |
| Сухой песок | 0,2 | 0,3 | – | 0,67 | – |



Рис. 2 – Преодоление труднопроходимого участка грузовым автомобилем, оснащенным межколёсным дифференциалом

$$\frac{\Psi}{\phi} = \frac{f}{\phi} \quad (13)$$

Значения этого отношения, подсчитанные для различных условий движения автомобиля, приведены в таблице 2.

Если коэффициент блокировки K_b меньше отношения $\frac{\Psi}{\phi}$ (табл. 1), то это означает, что в данных условиях движения дифференциал постоянно блокирован.

Таким образом, для любого дифференциала определение способности обеспечения раздельного качения ведущих колёс в тех или иных условиях движения колёсной машины сводится к сопоставлению соответствующих значений K_b (табл. 1, формула 7) и отношения $\frac{f}{\phi}$ (табл. 2).

Выводы. Приведённые критерии оценки основного свойства дифференциала (формулы 7–13) показывают, что получившие наибольшее применение кулачковый, червячный дифференциалы и двухсторонние муфты свободного хода при движении автомобиля по снегу, по пашне, по песку не обеспечивают раздельного качения ведущих колёс, что в условиях сельского хозяйства представляет определённые проблемы для эксплуатируемых машин.

В горной местности, где крутые подъёмы часто сочетаются с поворотами, в результате существенного увеличения коэффициента ξ на твёрдых сухих

дорогах нарушение раздельного качения ведущих колёс возможно. Использование колёсных машин с указанными дифференциалами в качестве тягачей также приводит к резкому увеличению сил внешнего сопротивления и одновременно к относительному уменьшению сцепного веса и, следовательно, уменьшению K_b , что способно вызывать частые и длительные нежелательные выключения дифференциала.

Наиболее высокие эксплуатационные качества могут быть получены от шестеренчатых самоблокирующихся дифференциалов, имеющих самый низкий коэффициент внутреннего трения. Эти механизмы за счёт устройства для их полной автоматической блокировки способны обеспечивать наиболее высокую реализацию сцепных свойств ведущих колёс (рис. 2).

Выведенный нами критерий $\frac{\Psi}{\phi} = \frac{\gamma}{1+\xi}$ позволяет аналитически оценивать способности различных типов дифференциалов в обеспечении раздельного качения ведущих колёс и тем самым устранить один из пробелов в системе этих оценок и избежать односторонности при оценке различных способов блокировки дифференциалов, что должно способствовать прогрессу в развитии конструкций последних.

Экспериментальная проверка изложенных выше теоретических исследований может лежать в основе специально разработанной методики.

Литература

1. Горшков Ю.Г. Повышение эффективности функционирования системы «дифференциал – пневматический колёсный движитель – несущая поверхность» мобильных машин сельскохозяйственного назначения: дис. ... докт. техн. наук. Челябинск, 1999.
2. Горшков Ю.Г. Влияние дифференциала на управляемость и устойчивость автомобиля // Вестник Челябинского агроинженерного университета. 1994. Т. 5.
3. Шульгин Л.М. Блокировка дифференциала ограничителем угловых ускорений // Совершенствование конструкций машин и пути увеличения их долговечности. Челябинск, 1965.
4. Козлов С.С. Выбор конструктивных параметров стабилизации прямолинейного движения автомобиля с учётом дифференциала повышенного трения // Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров: сб. матер. междунар. науч.-технич. конф. М.: Изд-во МГТУ «МАМИ», 2012. С. 159–164.
5. Бабков В.Ф., Бируля А., Сиденко В.М. Проходимость колёсных машин по грунту. М.: Автотрансиздат, 1959.
6. Крестовников Г.А. Исследование механизмов блокировки и самоблокирующихся дифференциалов // Проблемы повышения проходимости колёсных машин: сб. стат. АН СССР. М., 1964.