

применением биологических топлив в бензиновых двигателях с искровым зажиганием. Предварительные результаты исследований подготавливаются к опубликованию в последующих сборниках «Известия МГТУ «МАМИ»».

Литература

1. Фомин В.М., Апельинский Д.В., Каменев В.Ф. Генерирование водородосодержащего газа на борту транспортного средства // Известия МГТУ «МАМИ». – 2013. № 1 (15). – Т.1. – С. 204-212.
2. Фомин В.М. Эффективное применение водородных энергоресурсов в структуре энергообеспечения АПК// Тракторы и сельхозмашины. – 2014. №6. – С. 3-7.
3. Фомин В.М., Рами Атраш. Совершенствование показателей работы тракторного дизеля на смесевом биодизельном топливе// Тракторы и сельхозмашины. - 2013. № 5. – С. 5-10.

УДК 629.003.13

Идентификация продольного движения автомобиля в режиме выбега

д.т.н. проф. Катанаев Н.Т., к.т.н. проф. Лепешкин А.В., Колбасов А.Ф.
Университет машиностроения
(495) 223-05-23, доб. 1426, lep@mami.ru

Аннотация. В работе представлены результаты моделирования прямолинейного движения автомобиля и приведен обзор ряда существующих моделей. Анализ проводился с целью получения аналитической информации о балансе эффективных сил и сил сопротивления движению объекта в режиме свободного выбега. Получение достоверного математического описания необходимо при разработке модели человеко-машинной системы «автомобиль-среда-водитель», а также при исследовании влияния различных факторов на эксплуатационные характеристики объекта управления.

Ключевые слова: автомобиль, эксперимент, идентификация, продольное движение, силы сопротивления, методы моделирования, адекватность моделей.

Модели различного рода движущихся объектов являются одними из самых эффективных и распространенных видов инструментов совершенствования систем управления и динамических характеристик при решении задач взаимной адаптации систем «человек-машина», массовым представителем которой является система «автомобиль-среда-водитель» [2]. Разработка математического описания объекта управления такой системы включает постановку целого ряда как лабораторных, так и полевых экспериментальных исследований.

Такие параметры автомобиля как масса, линейные размеры, коэффициент сцепления колес с дорогой и многие другие, как правило, определяются по известным методикам. Однако некоторые из параметров и характеристик определяются достаточно сложным путем в силу влияния большого числа различного рода факторов. Например, силы сопротивления движению автомобиля включают постоянную составляющую, не зависящую от скорости движения; составляющую, связанную со скоростью движения и аэродинамическую составляющую, зависящую от квадрата скорости движения автомобиля. Безусловно, перечень других факторов достаточно широк (ветер, наклон дороги, температура, гололед и т.д.) и их влияние, как правило, в процессе испытаний стараются свести до минимума.

В ряде случаев для определения только аэродинамической составляющей проводятся дорогостоящие и затратные по времени эксперименты с использованием аэродинамической трубы. Теоретические основы аэродинамики автомобиля, как в отечественной практике, так

и за рубежом находятся еще на стадии становления. Расчетные методики по определению аэродинамической составляющей формируются преимущественно по результатам трубных испытаний масштабных моделей.

В работе [1], например, исследователи вели поиск оптимальной обтекаемой формы кузова легкового автомобиля. Снижение величины аэродинамического сопротивления связывалось с габаритными размерами моделей легковых автомобилей. Были подвергнуты испытаниям: модель К с профильным сечением тождественным автомобилю ВАЗ-2108; деревянная модель К-15 той же формы, но с углом наклона задней части крыши $\beta = 15^\circ$; модель ПШ с профильным сечением тождественным форме автомобиля ВАЗ-21099. В результате были определены величины коэффициента лобового сопротивления воздуха C_x для масштабных упрощенных вышеперечисленных моделей легковых автомобилей в зависимости от изменения коэффициента размаха λ (ширина модели/длина модели).

Идентификация математической модели осуществлялась в классе полиномиальных функций третьего порядка вида:

$$C_x = A + B\lambda + D\lambda^2 + E\lambda^3. \quad (1)$$

Некоторые из полученных результатов в обработанном виде представлены на рисунке 1.

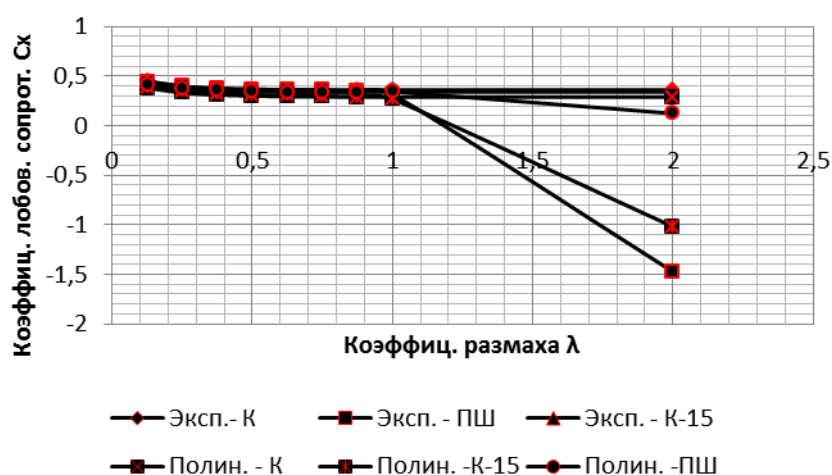


Рисунок 1. Зависимость коэффициента лобового сопротивления воздуха C_x для масштабных упрощенных моделей легковых автомобилей от изменения коэффициента размаха λ .

Из рисунка 1 видно, что в работе [1] с помощью полиномов третьего порядка («полин.» на рисунке 1) автору удалось с высоким коэффициентом корреляции идентифицировать процесс в диапазоне проведенных экспериментальных исследований ($0,1 < \lambda < 1$). Однако проведенные нами исследования показали, что за пределами этого диапазона теоретические полиномиальные кривые уходили в сторону нереальных значений C_x как по абсолютной величине, так и по знаку (см. рисунок 1).

Основная причина получающихся расходящихся процессов аппроксимации полиномами заключается в том, что их структура никак не согласуется с физикой процессов, которые протекают в реальной системе.

Так описание продольного движения автомобиля в режиме выбега должно включать параметры инерционных характеристик автомобиля и характеристик сопротивления движению. Структура составляющих сил при продольном движении автомобиля (рисунок 2) в мгновенной точке А включает: эффективную силу F_a , затрачиваемую на преодоление силы F_w сопротивления воздуха, силу F_d пропорциональную скорости автомобиля V_a и постоянную составляющую F_0 , представляющую собой силу сопротивления качению колес.

Уравнение продольной динамики автомобиля может быть представлено суммой этих сил:

$$F = F_0 + F_d + F_w. \quad (2)$$

Учитывая, что сила инерции F автомобиля выступает как эффективная сила при свободном выбеге и определяется массой G автомобиля и ускорением dV/dt , а составляющие правой части выражения (2) могут быть представлены функциями скорости в соответствующей степени, получим:

$$G \frac{dV}{dt} = a_0 + a_1V + a_2V^2, \quad (3)$$

где: $G = (M + I_1/r_1 + I_2/r_2)$ – приведенная масса автомобиля; r – приведенный радиус колеса.

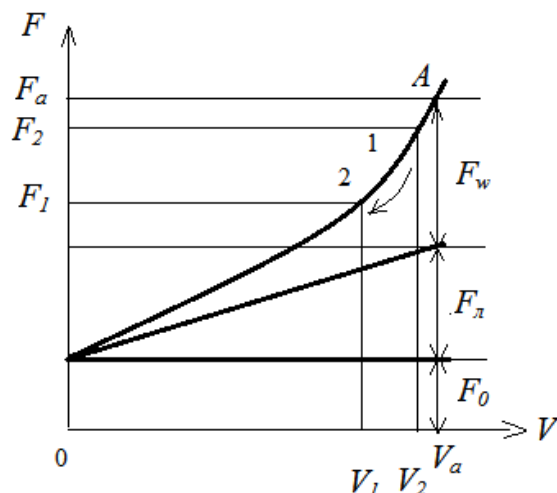


Рисунок 2. Структура составляющих сил при продольном движении автомобиля

Искомые коэффициенты составляющих сил уравнения (3) связаны соответственно: с силой F_0 сопротивлением качения колес – a_0 (считается постоянной величиной); с силой $F_л$ сопротивления движению тел в вязких средах, которая принимается прямо пропорционально скорости движения и зависит от коэффициента сопротивления a_1 и с аэродинамической силой F_w сопротивления движению автомобиля, зависящей от коэффициента сопротивления воздуха (коэффициент – a_2), площади поперечного сечения автомобиля и квадрата скорости движения в воздушной среде.

Модель продольного движения автомобиля в режиме выбега можно представить дифференциальным уравнением:

$$\frac{dV}{dt} = b_0 + b_1V + b_2V^2, \quad (4)$$

где: $b_0 = a_0/G$; $b_1 = a_1/G$; $b_2 = a_2/G$.

Определению подлежат коэффициенты b_0 , b_1 и b_2 , например, методом регрессионного анализа, для чего в процессе выбега автомобиля в дискретные моменты времени (t_1, t_2, \dots, t_n) необходимо получить конкретные значения скорости выбега (V_1, V_2, \dots, V_n) .

Идентификация модели связана с выбором структуры выравнивающей функции типа полинома (4) и с составлением функционала $U(b)$:

$$U(b) = \sum_{i=1}^n [u_i - b_0 - b_1V_i - b_2V_i^2]^2 \rightarrow \min, \quad u_i = dV_i/dt \quad (5)$$

Для определения искомых коэффициентов b_0 , b_1 и b_2 может быть использован экспериментально-аналитический метод наименьших квадратов.

Методом регрессионного анализа искомые параметры модели продольного движения автомобиля в режиме выбега были определены, например, в работе [3], но следует отметить высокую чувствительность результатов к погрешностям измерения экспериментальных характеристик. К тому же для повышения достоверности результатов необходимо было выпол-

нить большое количество экспериментальных исследований и провести большой объем подготовительных и вычислительных операций.

Эффективность решения задачи определения коэффициентов b_0 , b_1 и b_2 можно в существенной мере повысить путем разделения эксперимента на отдельные этапы с использованием метода, ориентированного на поочередную выборку результатов эксперимента для системы уравнений, участвующих в процессе идентификации модели.

Разделение эксперимента на отдельные этапы сводится к тому, что b_0 , входящий в перечень искомых коэффициентов, может быть найден при определении постоянной составляющей F_0 уравнения (2). Для чего необходимо измерить силу, достаточную вывести автомобиль из состояния покоя. Тогда неизвестными остаются лишь два параметра: b_1 и b_2 , определение которых может быть построено на базе аналитического метода с использованием характеристик, полученных в процессе испытаний автомобиля в режиме выбега.

По этому методу для двух последовательно полученных в результате заезда значений характеристики (см. рисунок 2) можно в соответствии с выражением (3) записать систему уравнений:

$$F_1 = a_0 + a_1 V_1 + a_2 V_1^2, \quad (6.1)$$

$$F_2 = a_0 + a_1 V_2 + a_2 V_2^2. \quad (6.2)$$

После ряда преобразований для каждого шага выражения для определения коэффициентов a_1 и a_2 примут вид:

$$a_1 = \frac{G \left(\frac{dV_2}{dt} V_1^2 - \frac{dV_1}{dt} V_2^2 \right) + a_0 (V_2^2 - V_1^2)}{V_1 V_2 (V_1 - V_2)}; \quad (7)$$

$$a_2 = \frac{G \left(\frac{dV_2}{dt} V_1 - \frac{dV_1}{dt} V_2 \right) + a_0 (V_2 - V_1)}{V_1 V_2 (V_2 - V_1)}. \quad (8)$$

Определение искомых коэффициентов математического описания динамики продольного движения автомобиля может быть осуществлено по результатам испытаний автомобиля в режиме свободного выбега. Однако в процессе эксперимента под воздействием внешних и внутренних факторов обычно наблюдается значительный разброс регистрируемых параметров, о чем свидетельствуют результаты испытаний по выбегу, например, автомобиля Ford Focus II 2.0 MT (рисунок 3).

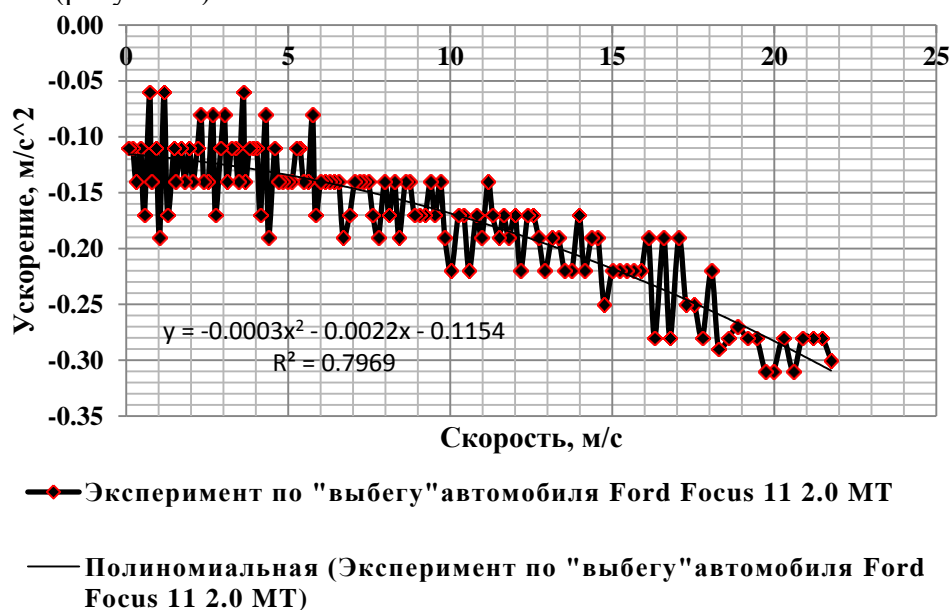


Рисунок 3. Результаты исследований автомобиля Ford Focus II 2.0 MT в режиме свободного выбега

Все это в существенной мере усложняет процедуру предварительной обработки полученных данных. Сложность возникает в силу того, что искомые параметры определяются по полученным результатам на каждом шаге регистрации данных, которые могут изменяться случайным образом и в достаточно широком диапазоне. Среднеквадратическое отклонение результатов испытаний от значений, полученных по уравнению регрессии, представленному на рисунке 3, оказалось достаточно большим и составляет величину, равную $0,0262 \text{ м/с}^2$, поэтому приходится проводить предварительное «выглаживание» результатов испытаний, а это в существенной мере влияет на эффективность данного метода.

Этот процесс «выглаживания» может быть выполнен поразному.

Например, при использовании полинома четвертой степени в виде:

$$y = -5E - 06x^4 + 0,0002x^3 - 0,0034x - 0,135$$

можно получить достаточно высокую точность аппроксимации ($R^2 = 0,7986$), но процесс при этом будет идентифицирован лишь формально.

Известно, что повышение степени полинома позволяет добиваться большего приближения к результатам эксперимента. Однако при формальном выборе класса функций и уровня их сложности необходимо учитывать ряд важных моментов. Отметим лишь некоторые из них.

Формально выбранное описание хорошо ложится на результаты испытаний только в диапазоне изменения параметров проведенного эксперимента. В этом можно было убедиться по результатам исследований, представленных на рисунке 1. За пределами этого диапазона гарантированность высокого уровня адекватности такого описания реальному процессу объективно снижается, поскольку сама адекватность уже предполагает близость формального описания исследуемому процессу.

Рассмотрим метод определения параметров продольного движения автомобиля, построенный на подборе уравнения регрессии, отражающего физику процесса движения. В основу структуры такого выражения положим уравнение динамики (4).

Модель продольного движения автомобиля дает возможность решать целый ряд задач, среди которых задачи, связанные с балансом сил сопротивления на различных скоростях движения с учетом влияния различных внешних факторов на скоростные характеристики. Решение такой задачи построим на базе модели продольного движения автомобиля, представленной уравнением (4).

На рисунке 3 представлены результаты идентификации автомобиля Ford Focus II 2.0 MT в режиме свободного «выбега» полиномом вида:

$$y = 0,0003x^2 - 0,0022x - 0,1154,$$

который дает точность аппроксимации $R^2 = 0,7969$ (несколько ниже, чем при аппроксимации полиномом четвертой степени).

Свяжем коэффициенты уравнения (4) с коэффициентами регрессии этого полинома второй степени.

При $G=1500 \text{ кг}$; $a_0=173,1 \text{ Н}$; $a_1=3.3 \text{ кг/с}$; $a_2=0.45 \text{ кг/м}$ уравнение продольной динамики принимает вид:

$$\frac{dV}{dt} = -0,1154 - 0,0022V - 0,0003V^2. \quad (9)$$

Сравним между собой результаты решения уравнения (9) в двух диапазонах изменения скорости продольного движения (рисунок 5): $0 < V \leq 10 \text{ м/с}$ и $30 < V \leq 45 \text{ м/с}$.

Наличие коробки перемены передач в автомобиле дает возможность варьировать передаваемый от двигателя момент к ведущему колесу, меняя при этом скорость движения автомобиля в соответствии с меняющейся тангенциальной силой на колесе. Это, в первую очередь, отражается на степени воздействия тех или иных факторов в различных диапазонах изменения скорости.

При сравнительно малых скоростях движения $0 < V \leq 5 \text{ м/с}$ (рисунок 5) аэродинамиче-

ская сила и сила сопротивления движению колес, линейно зависящая от V , близки к нулю и практически не влияют на динамику продольного движения автомобиля. В этом диапазоне падение скорости в режиме свободного выбега происходит преимущественно за счет силы сопротивления качению колес.

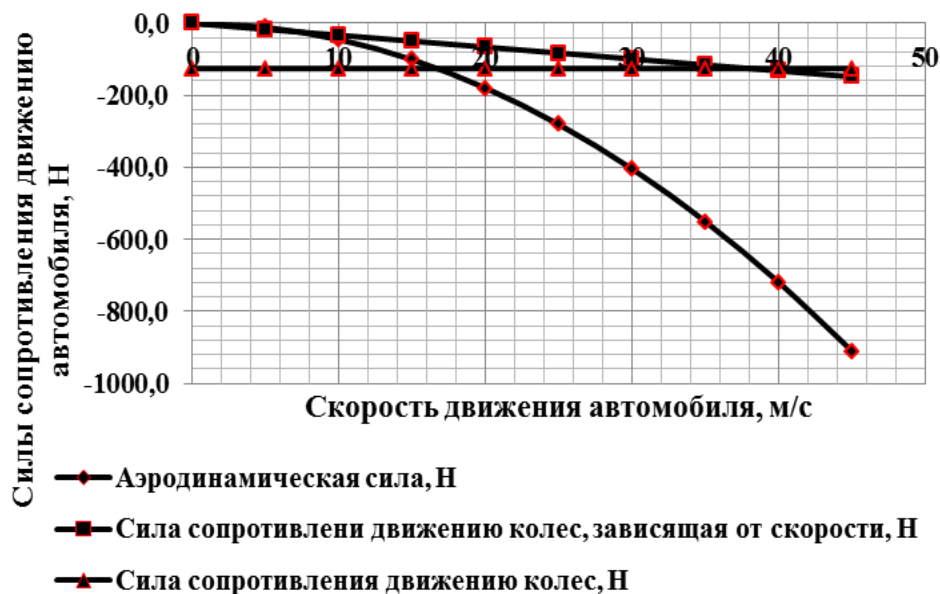


Рисунок 5. Силы сопротивления движению автомобиля Ford Focus II 2.0 MT в режиме свободного “выбега”

На более высоких скоростях движения аэродинамическая составляющая сил сопротивления становится доминирующей. Например, при скоростях $30 < V \leq 45$ м/с (рисунок 5) она становится в несколько раз больше двух других сил.

Вывод

1. Поскольку внешние факторы по разному влияют на различные составляющие сил сопротивления движению автомобиля, целесообразно комплекс исследований связывать не только со скоростью движения автомобиля, но и с номером включенной передачи. В этом случае достигается более высокая чувствительность параметров продольного движения автомобиля к изменениям различных факторов на объект управления.
2. При выборе уравнения регрессии для корреляционной модели исследуемого объекта необходимо исходить из адекватности выбранного класса функций физическому процессу, происходящему в самом объекте. Модель, полученная при случайном выборе класса функций, за пределами расчетного диапазона варьирования параметров может дать значительную ошибку, что недопустимо в процедурах, связанных с прогнозированием.

Литература

1. Жамалов Р.Р. Оценка составляющих аэродинамического сопротивления легкового автомобиля на основе эксперимента с моделями переменных габаритов в аэродинамической трубе. Автореф. дисс. на соис. уч. степ. к.т.н., М. 2015, 22 с.
2. Катанаев Н.Т. Анализ и синтез человеко-машинной системы «Автомобиль-средоводитель». Дисс. на соискание д.т.н., М. 1990, 395 с.
3. Катанаев Н.К. Параметрическая идентификация продольного движения автомобиля. Известия МГТУ «МАМИ». Научный рецензируемый журнал. – М., МГТУ «МАМИ». №1(5), 2008, с. 34-39.