

### Выводы

Проведенные исследования свидетельствуют о возможности и целесообразности использования энергоаккумулирующих веществ в качестве альтернативного топлива для тепловых, в частности для газотурбинных двигателей.

Целесообразно применять мелкодисперсные порошкообразные ЭАВ, главным образом, сплавы кремния и алюминия. Желательно с минимальным количеством железа.

Перспективными представляются дальнейшие исследования горения ЭАВ в среде перегретого водяного пара.

### Литература

1. Варшавский И.Л. Энергоаккумулирующие вещества и их использование. – Киев: Наукова думка, 1980. – 240 с.
2. Grönert H. Verminderte Umweltbelastung mit Aluminium als regenerierbaren Energieträger. Fösilbefeuerte Kraftwerke// Brennst.-Wärme-Kraft. – 1988,- 41, № 7-8, S. 364-369.
3. Weber R. Prototyp-Brenner Heitzt mit Aluminium als Energiequelle. – VDI Nachrichten, 1991, № 2, - S.19.
4. Синярев Г.Б., Слынько Л.Е., Трусков Б.Г. Принципы и метод определения параметров равновесного состояния. – Тр. МВТУ, 1978, № 268, С. 4-21.
5. Трусков Б.Г. Термодинамический метод анализа высокотемпературных состояний и процессов и его практическая реализация. – М.: МВТУ.-1984.

### **Моделирование процессов управления продольным движением автомобиля с помощью аналитических автоматов**

к.т.н., проф. Лепешкин А.В., Катанаев Н.К., Драгунов С.С.  
МГТУ «МАМИ»

Описание движения автомобиля может рассматриваться как в детерминированной, так и в вероятностной постановке. Если предполагается, что автомобиль является детерминированным объектом, то в условиях отсутствия возмущающих воздействий от внешней среды, его состояние должно полностью определяться поступающим на его вход заданием. В качестве задания может выступать скорость движения, траектория движения, либо другие формы движения с дополнительными критериями качества. Для достижения цели к объекту включается управляющее устройство, с помощью которого формируется управляющее воздействие. Управляющее устройство в совокупности с автомобилем образует систему управления.

Методология построения устройства управления обсуждалась неоднократно. Одним из теоретических направлений является описание управляющего устройства как оператора с обратной передаточной функцией объекта управления. Оно имеет весомое математическое обоснование, и его суть сводится к следующему. Пусть объект управления имеет передаточную функцию  $W_0(s)$  вида

$$W_0(s) = \frac{D_e(s)}{D_0(s)}, \quad (1)$$

где:  $D_e(s)$  – оператор по входу  $e$ ;

$D_0(s)$  – собственный оператор объекта управления;

$S = d/dt$  – оператор Лапласа (алгебраизированный оператор дифференцирования).

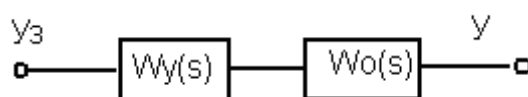
Надлежит определить передаточную функцию  $W_y(s)$  устройства управления из предположения, что оно абсолютно точно отследит заданную  $y_3$  траекторию (действительная траектория  $y$  должна быть равна заданной  $y_3$ ). В этом случае в соответствии с алгоритмической схемой (рис. 1) можно записать

$$y = W_y(s) * W_3(s) * y_3 \quad (2)$$

Условие ( $y_3 = y$ ) может быть выполнено лишь в том случае, когда произведение пере-

даточных функций системы будет равно 1, т.е.

$$W_y(s) * W_o(s) = 1 \quad (3)$$



**Рис. 1. Алгоритмическая схема преобразования входной координаты  $y_3$  в выходную  $y$ .**

Следовательно, передаточная функция устройства управления должна быть обратной по отношению к передаточной функции объекта управления

$$W_y(s) = \frac{1}{W_o(s)} = \frac{D_o(s)}{D_s(s)} \quad (4)$$

Практическая реализация такого устройства для управления автомобилем, описываемого дифференциальным уравнением высокого порядка, имеет ряд принципиально непреодолимых трудностей, которые сводятся к следующему.

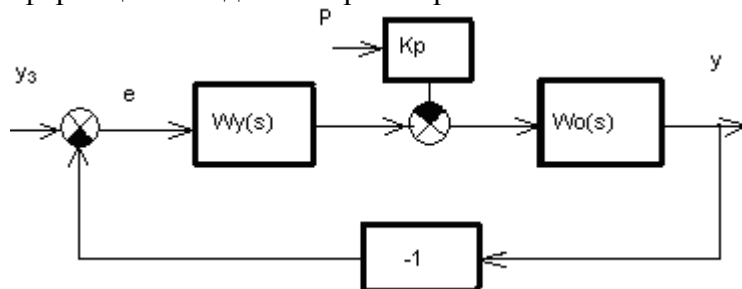
При точной реализации заданной координаты на устройство управления возлагается задача  $n$ -кратного ( $n$  – порядок описания объекта) дифференцирования входного сигнала с последующим преобразованием сигналов в соответствии с передаточной функцией  $W_y(s)$ . Многократное дифференцирование входного сигнала может привести к недопустимому возрастанию влияния случайных помех, а также к недопустимо большим изменениям как самого управляющего воздействия, так и его производных. Поэтому равенство ( $y_3 = y$ ) точно выполнить реально никогда невозможно. Таким образом, рассмотренная структура системы управления, по крайней мере, боковым движением автомобиля оказывается непригодной, поскольку в самом объекте обычно существуют источники случайных возмущений, да и на сам объект действуют внешние случайные возмущения. К тому же математическая модель объекта всегда известна лишь с некоторой степенью приближения, а следовательно, и управляющее устройство, вычисленное по неточным операторам объекта, не будет оптимальным. Все это приводит к тому, что объект становится вероятностным и возникает необходимость в постоянном контроле координат в процессе его движения.

Предположим, что ставится задача слежения за заданной траекторией  $y_3$  движения объекта управления с передаточной функцией (1) и устройства управления с передаточной функцией  $W_y(s)$

$$W_y(s) = \frac{D_n(s)}{D_y(s)}, \quad (5)$$

где:  $D_n(s)$  – оператор входа устройства управления.

Система слежения определяет отклонение  $e$  действительной траектории  $y$  от заданной  $y_3$ , (т.е.  $e = y_3 - y$ ) и сводит его к минимуму. В этом случае система должна быть замкнута отрицательной обратной связью (см. рис. 2). В общем случае управляющее устройство должно получать информацию о заданной траектории  $y_3$  и о внешних возмущениях  $P$ .



**Рис. 2. Алгоритмическая схема замкнутой системы слежения.**

Учитывая (1) и (5), в соответствии с алгоритмической схемой (рис. 2) можно записать

$$y = [(y_3 - y) * W_y(s) - k_p * P] * W_o(s) * y_3, \quad (6)$$

После ряда преобразований получим уравнение движения объекта

$$y = y_3 W_Y(s) - P W_P(s), \quad (7)$$

где:  $W_Y(s) = [D_n(s) * D_e(s)] / D_Y(s)$  – передаточная функция по задающему входу  $y_3$ ;

$W_P(s) = k_p * D_e(s) / D_Y(s)$  – передаточная функция по нагрузке  $P$ ;

$D_Y(s) = [D_y(s) * D_0(s) - D_n(s) * D_e(s)]$  – собственный оператор системы.

Описание (7) удобно для реализации режима слежения за нормированной траекторией движения транспортного средства (например, городской ездовой цикл). Управляемость и топливная экономичность объекта будут зависеть от его характеристик, заложенных в (1).

Система управления продольным движением автомобиля может строиться с использованием аналитических автоматов на базе фундаментальных исследований Красовского Н.Н. и Летова А.М. [1, 2, 5, 6, 7].

Для того чтобы выявить структуру управления продольным движением, рассмотрим сначала особенности объекта, движущегося прямолинейно с переменной скоростью. В простейшем варианте в качестве исходного описания примем уравнение сил, действующих на автомобиль при прямолинейном движении

$$P_k = P_w + P_f + P_a + P_j, \quad (8)$$

где:  $P_k$  – суммарная окружная сила, действующая на ведущих колесах;

$P_w$  и  $P_f$  – силы сопротивления движению соответственно воздуха и при качении эластичного колеса;

$P_a$  – внешние силы, действующие на автомобиль;

$P_j$  – сила инерции автомобиля.

После раскрытия составляющих выражения (8) и линеаризации нелинейных зависимостей уравнение объекта управления примет вид

$$G_a \frac{dV}{dt} = \frac{M_e i \eta}{r_\partial} u - \frac{\partial P_w}{\partial V} dV - P_{w_0} + P_a - P_f, \quad (9)$$

где:  $G(a)$  – масса автомобиля;

$V$  – скорость продольного движения автомобиля;

$M_e$  – эффективный момент двигателя;

$i$  – общее передаточное число трансмиссии;

$\eta$  – КПД трансмиссии;

$r_\partial$  – динамический радиус колеса;

$\partial P_w / \partial V$  – частная производная функции в точке разложения;

$P_{w_0}$  – значение функции в точке разложения;

$u$  – управление, которое может принимать в режиме разгона значение +1, торможения –1.

Запишем (9) в операторной форме

$$D(s)V = K_u u + K_p P_a, \quad (10)$$

где:  $D(S) = Ts + I$  – собственный оператор объекта управления;

$T = G_a K_p$  – постоянная времени объекта управления;

$$K_p = \frac{1}{\frac{\partial P_w}{\partial V}}; K_u = K_p \left( \frac{M_e i \eta}{r_{\partial}} - P_{w_0} - P_f \right).$$

Из (10) выразим скорость  $V$  движения автомобиля

$$V = W_a(s)(K_u u + K_p P_a), \quad (11)$$

где:  $W_a(s) = \frac{1}{Ts+1} = W_{uV}(s)$  - передаточная функция объекта управления или передаточная функция преобразования сигнала управления  $u$  в скорость  $V$  движения автомобиля.

В разомкнутой системе управления продольным движением при  $P_a = 0$  действительное значение продольной скорости  $V$  может быть найдено из выражения:

$$V = W_{V_3u}(s)W_a(s)V_3, \quad (12)$$

где:  $W_{V_3u}(s)$  - передаточная функция устройства управления.

При точной отработке значений заданной скорости  $V_3 = V$ .

Тогда из (12) следует:

$$W_{V_3u}(s) = \frac{1}{W_a(s)} = Ts + 1 \quad (13)$$

В случае, когда управление ведется не по скорости продольного движения, а по самой координате  $x$ , учитывая, что  $V = \frac{dx}{dt}$ , передаточная функция объекта управления примет вид:

$$W_a(s) = W_{uV}(s) = \frac{1}{(Ts+1)s}. \quad (14)$$

Построение такой разомкнутой системы управления не вызывает особых затруднений, если в системе отсутствуют ограничения.

Оценка меры качества управления задается критерием оптимальности, который зависит от многих факторов, определяемых назначением и технико-экономическими условиями работы системы. Оптимальное управление ориентировано, прежде всего, на достижение показателей, связанных с протеканием процессов управления во времени и с соответствующими им точностными оценками, сравнением энергозатрат на управление и так далее. Общая форма критерия оптимальности имеет вид интегрального функционала, зависящего от функции управления

$$J(\bar{u}) = \int_{t_0}^{t_k} f_0(\bar{x}, \bar{u}, t) = \text{extr}, u \in U \quad (15)$$

где:  $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  - вектор фазовых координат;

$\bar{u} = (u_1, u_2, \dots, u_n)$  - вектор управления;

$t_0, t_k$  - время начала и конца управления;

$U$  - допустимая область возможных изменений вектора управления.

Задача синтеза оптимальной системы сводится к нахождению структуры и параметров оптимального управляющего устройства по известной информации об объекте управления, входных воздействиях и координатах системы. Управление должно быть таким, чтобы достигался экстремум выбранного критерия оптимальности (15).

Сформируем автомат слежения за продольным движением автомобиля. Запишем уравнение (11) продольного движения автомобиля совместно с силовой частью регулятора как

стационарную систему без внешних возмущений ( $P_a = 0$ ) в форме

$$\frac{dV}{dt} = a_1 V + m_1 y, \quad (16)$$

где:  $a_1 = -1/T$ ;  $m_1 = k_u/T$ ;  $y = f(u)$ ;  $u$  - управление.

Требуется найти уравнение преобразовательной части системы (закон регулирования), при котором бы обращался в минимум функционал, представляющий собой оценку желаемого качества системы. На вектор управления накладываются ограничения.

$$J = \int_{t_0}^{t_k} (\alpha_1 V^2 + \alpha_0 y^2) dt, \quad (17)$$

$$y = f(u), \quad |y| \leq c. \quad (18)$$

Уравнение динамического программирования в частных производных Р.Беллмана для решаемой задачи запишется в виде

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 V^2 + \alpha_0 f^2 + (a_1 V + m_1 f) \frac{d\psi}{dV} &= 0; \\ (2\alpha_0 f + m_1 \frac{\partial \psi}{\partial V}) \frac{\partial f}{\partial u} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Из последнего уравнения системы (19) имеем

$$2\alpha_0 f + m_1 \frac{\partial \psi}{\partial V} = 0; \quad \frac{\partial f}{\partial u} = 0. \quad (20)$$

Совместное решение первых уравнений систем (19) и (20) позволяет получить

$$m_1 \alpha_0 f^2 + 2a_1 \alpha_0 V f - \alpha_1 m_1 V^2 = 0, \quad (21)$$

решение которого имеет вид

$$f = -kV, \quad (22)$$

где:  $k = \alpha_0 a_1 \pm \sqrt{(\alpha_0^2 a_1^2 + \alpha_0 \alpha_1 m_1^2)}$ .

Второе выражение системы (19) дает константу  $c$ . Тогда искомый закон регулирования можно представить следующим образом

$$f = \begin{cases} -c & \text{при } V \geq b \\ -kV & \text{при } |V| < b \\ +c & \text{при } V \leq -b \end{cases} \quad y = V, \quad b = \frac{c}{k}. \quad (23)$$

Проведенное аналитическое конструирование регуляторной части системы управления продольным движением автомобиля позволяет завершить построение системы управления лишь на нижнем иерархическом уровне. В основу построения этой части системы положены функции цели, отражающие свойства минимального отклонения действительной траектории движения от заданной. Эти свойства являются фундаментальными, без которых невыполнимо выполнение системой технологического процесса. Однако на систему, кроме указанных, могут быть наложены более жесткие ограничения, связанные с решением и других задач, например экономических.

Реализация экономических функций цели возможна лишь при построении модели энергетической установки с описанием характеристик топливной экономичности двигателя. В этом случае в функционал должны быть заложены целевые функции с экономическими характеристиками объекта управления.

Динамика продольного движения автомобиля во многом определяется внешними и частичными скоростными характеристиками двигателя, представляющими собой зависимость эффективной мощности и крутящего момента от скорости вращения вала двигателя при различных положениях дроссельной заслонки. По отношению к автомобилю двигатель

является исполнительным приводом, благодаря которому осуществляется управление продольным движением. Поэтому идентификация управляемого продольного движения автомобиля немислима без достоверного математического описания функций двигателя.

Чаще всего при исследовании движения автомобиля крутящий момент условно считают постоянным. Для некоторых упрощенных задач такая постановка правомерна, но при изучении управляемого продольного движения такой подход может привести к грубым ошибкам. Набором же экспериментально определенных скоростных характеристик всю область возможных управлений представить чрезвычайно трудно.

В теории двигателя и автомобиля [3,4] можно найти различные варианты формализации характеристик двигателя, начиная от кусочно-линейной аппроксимации и кончая разложением функции в степенные ряды Тейлора и Маклорена, а также представлением функции полиномами различной степени сложности.

Реализация всех перечисленных методов для внешних скоростных характеристик не представляет особого труда. Эту процедуру можно провести с любой степенью адекватности результатам экспериментальных исследований. Однако трансформировать математические выражения на случай частичных характеристик трудно, так как наблюдается существенная деформация максимумов кривых эффективной мощности и крутящего момента относительно скорости вращения вала двигателя. Проявляется нелинейность характеристик в зависимости от степени открытия дроссельной заслонки  $\beta_d$ , а также сказываются и другие явления.

Основной особенностью подготовки этих описаний является формальный подход к воспроизведению характеристик, не учитывающий условий протекания физических процессов в двигателе.

Подготовка математического описания скоростных характеристик должна быть основана на обобщении известных теоретических исследований в этой области. Эффективная мощность двигателя формируется как результат вычитания мощности механических потерь из индикаторной мощности. Отметим также, что механические потери преимущественно связываются со скоростью вращения вала двигателя. Действительно, если проанализировать составляющие механических потерь, то можно констатировать, что механические потери, в основном, зависят от коэффициента демпфирования и скорости вращения вала двигателя.

Проблема повышения топливной экономичности автомобиля является одной из актуальных в автомобилестроении. Вопросы по ее решению весьма многогранны и, в основном, связаны с мероприятиями по совершенствованию конструкций двигателя и автомобиля, по улучшению характеристик шин, с процессами оптимизации управляемого продольного и бокового движений автомобиля и так далее. Однако в этих вопросах есть ряд общих связей, позволяющих построить общую структуру модели системы, дающей возможность достаточно простым путем решить целый ряд важных задач. С этой целью необходимо выявить и формализовать взаимосвязи параметров управляемого движения автомобиля с характеристиками его экономичности.

Аналитические системы управления дают возможность исследовать особенности управляемого продольного движения автомобиля с различными целевыми функциями (включая и экономические) в нормированных условиях движения. В частности, расчетные исследования топливной экономичности автомобиля планируется провести по программе городского ездового цикла на следующем этапе системных исследований.

Таким образом, приведенные материалы по построению структуры управляемого движения автомобиля дают возможность использовать системные методы исследования управляемости транспортных средств с экономическими критериями качества при соответствующих доработках характеристик энергетических установок.

### Литература

1. Красовский Н.Н. К теории оптимального регулирования. – Автоматика и телемеханика, 1958, 18, с. 1005 – 1016.
2. Красовский Н.Н., Летов А.М. Теория аналитического конструирования регуляторов. Автоматика и телемеханика, 1962, 23, с. 649 – 656.

3. Крутов В.И. Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 1979. – 615с.
4. Ленин И.М., Костров А.В., Малашкин О.М., Райков И.Я., Самоль Г.И. Автомобильные и тракторные двигатели. Ч.1. Теория двигателей и систем их топливоподачи. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1976. – 368с.
5. Летов А.М. Аналитическое конструирование регуляторов. – “Автомат. и телемех.” Т. XX1, № 4,5,6,1960, Т. XX11 № 4, 1961, Т. XX111, № 11, 1962. с. 433 – 434, 561 – 568, 661 – 665.
6. Летов А.М. Устойчивость нелинейных регулируемых систем. – М.: Физматгиз, 1962. – 484с.
7. Летов А.М. Динамика полета и управление. – Наука, М.,1969. – 324с.

### **Расчёт колебаний силового агрегата автомобиля путем оптимизации параметров его опор**

к.т.н., проф. Ломакин В.В., Нгуен Гуй Чыонг  
МГТУ «МАМИ»

Силовой агрегат и трансмиссия автомобиля состоят из значительного количества частей: двигатель, маховые массы, соединяющиеся через редукторы валами, муфтами и другими элементами с различной угловой жесткостью. Эти конструктивные элементы в совокупности образуют колебательные системы с рассредоточенными массами, поэтому силовой агрегат является одним из сильных источников колебаний в автомобиле.

Одним из основных способов понижения интенсивности колебаний двигателя и уменьшения нагрузок, передаваемых от силового агрегата на шасси автомобиля, является правильный выбор параметров опор силового агрегата. Упругая опора позволяет уменьшить уровень колебаний автомобиля и уровень шумов, возникающих в кузове при работе двигателя.

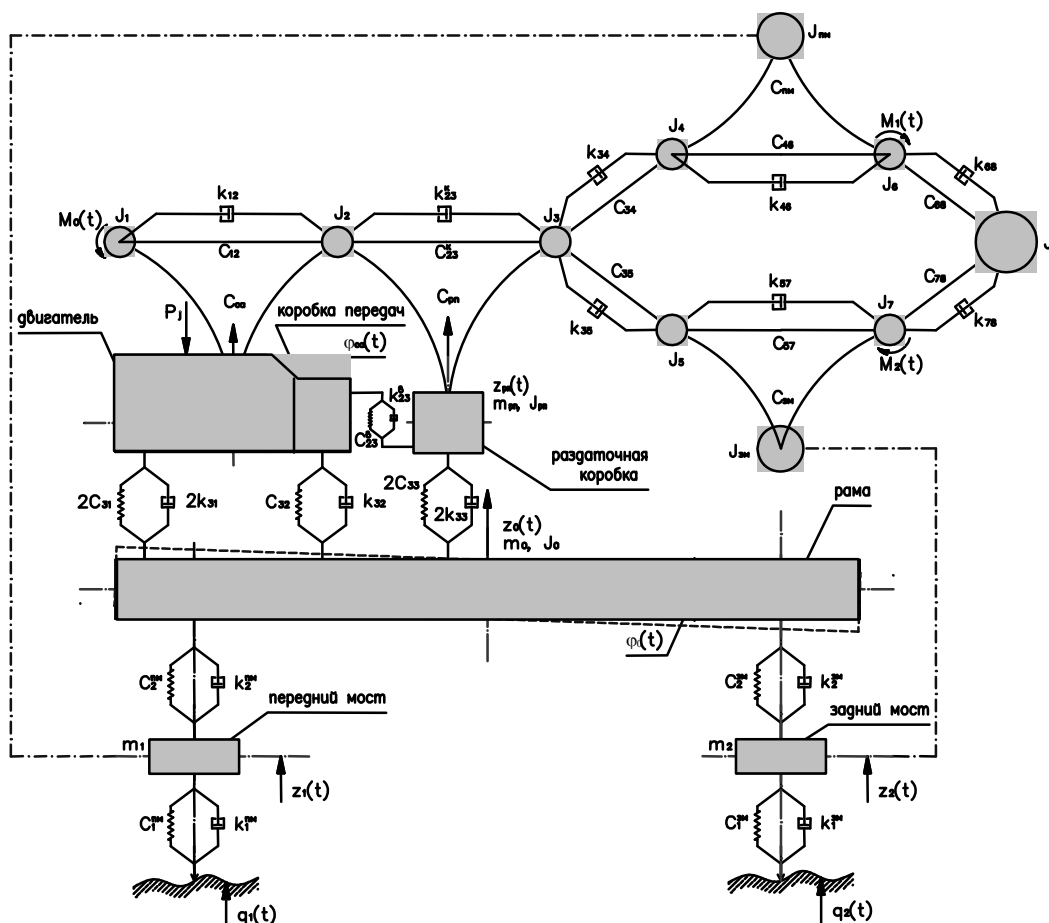


Рис. 1. Динамическая модель для расчёта колебаний силового агрегата автомобиля.