УДК 621.43:62-531.9 (575.2) (04)

ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ С АВТОМАТИЧЕСКИМ РЕГУЛЯТОРОМ ВТОРОГО ПОРЯДКА

А.П. Муслимов – акад. ИА КР, докт. техн. наук, профессор,

В.И. Глазунов – канд. техн. наук, доцент,

Д.В. Глазунов – канд. техн. наук

Приведена автоматическая система стабилизации мощности коленчатого вала двигателя, а также рассмотрены результаты ее исследования при условии применения автоматического регулятора второго порядка.

Ключевые слова: автоматическая система стабилизации; автоматический регулятор второго порядка.

Величина мощности автомобильного двигателя изменяется вследствие изменения количества и качества рабочей смеси в цилиндрах двигателя, числа оборотов коленчатого вала двигателя и других параметров. В тяговой динамике автомобиля мощность двигателя считают функцией только частоты вращения коленчатого вала, подразумевая, что дроссельная заслонка открыта полностью в карбюраторном двигателе, или положение рейки топливного насоса соответствует максимальной подаче топлива в дизеле, также считается, что остальные факторы имеют оптимальные значения. При таких условиях в основу расчетов можно положить внешнюю скоростную характеристику двигателя.

На самом деле, в условиях эксплуатации и особенно в условиях высокогорья на изменение (уменьшение) эффективной мощности двигателя влияет гораздо больше факторов, связанных с понижением барометрического давления.

Для анализа зависимости эффективной мощности N_e и эффективного крутящего момента M_e от частоты вращения коленчатого вала, т.е. $N_e=f(n_e)$ и $M_e=f(n_e)$ предпочтительно использовать реальную скоростную характеристику двигателя, полученную при его стендовых испытаниях. При отсутствии таких экспериментальных данных обычно используют эмпирические зависимости, позволяющие по известным координатам одной точки скоростной характеристики (например, по N_{max} и n_N) воспроизвести всю кривую мощности [1].

В настоящее время перед автомобилестроением стоит актуальная задача создания высокоточных автоматических систем, регулирующих состав смеси при изменении температуры в двигателе, отвечающих самым высоким требованиям, главными из которых являются высокое быстродействие, точность системы регулирования, а также обеспечение ее устойчивой работы в широком диапазоне.

В работах [2, 3] приведено исследование системы стабилизации мощности двигателя автомобиля, оснащенного идеальным регулятором и инерционным регулятором рабочей смеси, имеющим небольшую массу подвижного элемента по сравнению с силой вязкого трения. Однако на практике масса подвижного элемента является значительной и при разработке автоматических систем стабилизации ее надо учитывать наряду с силой вязкого трения при составлении дифференциального уравнения регулятора смеси.

В [2, 3] представлена блок-схема автоматической системы стабилизации мощности двигателя автомобиля, работа данной автоматической системы и уравнение двигателя автомобиля.

Уравнение объекта – двигателя – имеет вид:

$$T\frac{d\Delta N}{dt} + \Delta N = K_{\partial}\Delta Q + f(t), \tag{1}$$

где T – постоянная времени двигателя; ΔN и ΔQ – соответственно приращение мощности и смеси; K_{∂} – коэффициент усиления двигателя; $f(t)$ – изменение мощности под действием внешнего возмущающего воздействия.

Дифференциальное уравнение регулятора смеси с учетом вышесказанного будет иметь вид:

$$m\frac{d^2\Delta Q}{dt^2}+v\frac{d\Delta Q}{dt}+C\Delta Q=-K_Э\Delta N, \qquad (2)$$

где m – масса подвижного элемента регулятора; v – коэффициент вязкого трения; C – коэффициент жесткости чувствительного элемента; $K_Э$ – общий коэффициент усиления элементов регулятора.

Разделим каждый член уравнения (2) на C – коэффициент жесткости чувствительного элемента и введем следующие обозначения:

$$T_к=\sqrt{\frac{m}{C}};\ T_д=\frac{v}{C};\ K_{рег}=\frac{K_э}{C},$$

тогда уравнение регулятора смеси примет вид:

$$T_к{}^2\frac{d^2\Delta Q}{dt^2}+T_д\frac{d\Delta Q}{dt}+\Delta Q=-K_{рег}\Delta N. \qquad (3)$$

Для получения общего дифференциального уравнения, описывающего процесс стабилизации мощностей двигателя автомобиля, уравнения (1) и (3) необходимо решать совместно.

Из уравнения (1) найдем значение величины ΔQ и продифференцируем ее дважды по времени:

$$\Delta Q=\frac{T}{K_д}\frac{d\Delta N}{dt}+\frac{1}{K_д}\Delta N-\frac{1}{K_д}f(t),$$

$$\frac{d\Delta Q}{dt}=\frac{T}{K_д}\frac{d^2\Delta N}{dt}+\frac{1}{K_д}\frac{d\Delta N}{dt}-\frac{1}{K_д}\frac{df(t)}{dt},$$

$$\frac{d^2\Delta Q}{dt^2}=\frac{T}{K_д}\frac{d^3\Delta N}{dt^3}+\frac{1}{K_д}\frac{d^2\Delta N}{dt^2}-\frac{1}{K_д}\frac{d^2f(t)}{dt^2}.$$

Подставив все это в уравнение (3) и после соответствующих преобразований получим уравнение динамики системы регулирования:

$$TT_k{}^2\frac{d^3\Delta N}{dt^3}+(TT_д+T_k{}^2)\frac{d^2\Delta N}{dt^2}+$$

$$+(T+T_д)\frac{d\Delta N}{dt}+(1+K_дK_{рег})\Delta N=$$

$$=T_k{}^2\frac{d^2f(t)}{dt^2}+T_д\frac{df(t)}{dt}+f(t). \qquad (4)$$

Характеристическое уравнение для него будет уравнением третьей степени:

$$TT_к{}^2p^3+(TT_д+T_к{}^2)p^2+(T+T_д)p+(1+K_дK_{рег})=0. \qquad (5)$$

Оно имеет три корня P_1, P_2, P_3.

При положительных коэффициентах уравнения возможны три варианта:

а) все три корня – вещественные и отрицательные:

$$P_1=-\frac{1}{T_a};\quad P_2=-\frac{1}{T_в};\quad P_3=-\frac{1}{T_c}; \qquad (6)$$

б) один корень вещественный и отрицательный, а два – комплексные с отрицательной вещественной частью:

$$P_1=-\frac{1}{T_a};\ P_{2,3}=-\frac{1}{T_в}\pm j\omega; \qquad (7)$$

в) один корень вещественный и отрицательный, а два – комплексные с положительной вещественной частью:

$$P_1=-\frac{1}{T_a};\ P_{2,3}=\frac{1}{T_в}\pm j\omega. \qquad (8)$$

Существуют формулы для вычисления корней уравнения третьей степени (справочник по математике), откуда можно вывести сложные зависимости T_a, T_b, T_c, w от параметров системы T, $T_K{}^2$, $T_д$, $K_д$, $K_{рег}$.

Оценим возможные процессы регулирования качественно.

Решение переходного процесса в случае (6) будет суммой трех экспонент

$$\Delta N_{пер}=C_1e^{-\frac{t}{Ta}}+C_2e^{-\frac{t}{T_в}}+C_2e^{-\frac{t}{Tc}}, \qquad (9)$$

в случае (7) – суммой экспоненты и затухающей синусоиды:

$$\Delta N_{пер}=C_1e^{-\frac{t}{Ta}}+C_2e^{-\frac{t}{T_в}}\sin(\omega t+C_3), \qquad (10)$$

в случае (8) – суммой экспоненты и расходящейся синусоиды:

$$\Delta N_{пер}=C_1e^{-\frac{t}{Ta}}+C_2e^{\frac{t}{T_в}}\sin(\omega t+C_3). \qquad (11)$$

Произвольные постоянные C_1, C_2, C_3 определяются во всех случаях из начальных условий, в качестве которых задаются значения:

$$\Delta N_{пер};\ \frac{d\Delta N_{пер}}{dt};\ \text{при } t=0.$$

В случае (9) переходной процесс будет иметь вид (рис. 1).

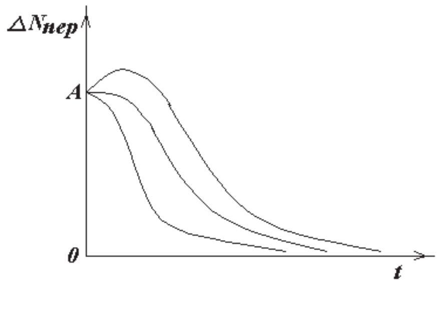

Рис. 1. Переходной процесс для случая (9).

В случае (10) переходные процессы имеют вид (рис. 2).

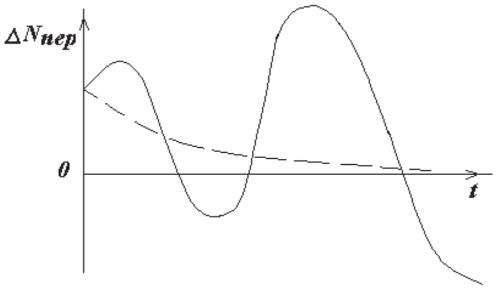

Рис. 2. Переходные процессы для случая (10).

Для случая (11) переходной процесс оказывается колебательным расходящимся (рис. 3), т.е. система является неустойчивой.

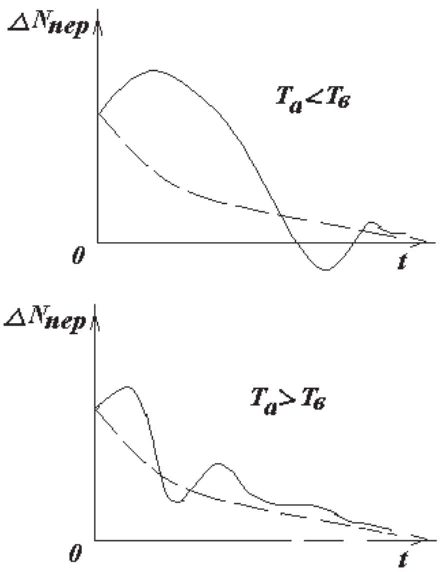

Рис. 3. Переходной процесс для случая (11).

Следует отметить принципиальную особенность разработанной системы стабилизации – при всех положительных коэффициентах дифференциального уравнения (4) возможна неустойчивость системы.

При проектировании регулятора смеси (выборе его параметров) надо вначале обеспечить устойчивость системы, а потом уже добиваться желаемого качества переходного процесса и малости статической ошибки.

Статическая ошибка как частное решение уравнения (4) при $f(t)=f_0$, будет

$$\Delta N_{cm} = \frac{f_0}{1 + K_\partial K_{рег}}. \tag{12}$$

С точки зрения статической ошибки нужно добиваться как можно большего коэффициента усиления регулятора, но при этом должна обеспечиваться устойчивость системы во всем диапазоне ее работы.

Критерий устойчивости любой системы третьего порядка, как известно, формулируется следующим образом.

Пусть левая часть дифференциального уравнения имеет вид:

$$a_0 \frac{d^3 \Delta N}{dt^3} + a_1 \frac{d^2 \Delta N}{dt^2} + a_2 \frac{d\Delta N}{dt} + a_3 \Delta N, \tag{13}$$

вид правой части для устойчивости не играет особой роли.

Для устойчивой системы необходимо и достаточно:

1) чтобы коэффициенты были положительными

$$a_0>0,\ a_1>0,\ a_2>0,\ a_3>0; \tag{14}$$

2) чтобы произведение средних коэффициентов было больше, чем произведение крайних коэффициентов

$a_1\, a_2 > a_0\, a_3$.

Для нашего случая

$a_0=TT_к^2$; $a_2=T+T_д$;

$$a_1=TT_\partial+T_к^2;\quad a_3=1+K_\partial K_{рег}. \tag{15}$$

Первое условие устойчивости обеспечивается правильным присоединением регулятора к объекту, т.е. необходимо в левой части уравнения (4) обеспечить положительность $(1+K_\partial K_{рег})$.

Второе условие устойчивости выразится согласно (15)

$(TT_\partial=T_к^2)(T+T_\partial) \succ TT_к^2(1+K_\partial K_{рег})$,

откуда

$$K_{рег} \prec \left(\frac{1}{T} + \frac{T+T_\partial}{T_k^2}\right)\frac{T_\partial}{K_\partial}. \tag{16}$$

Это и есть ограничения, накладываемые динамикой процесса регулирования на увеличение $K_{рег}$.

На основании формулы (16) на плоскости параметров с осями координат T_∂/T_K и $K_\partial K_{рег}$ можно построить границу, до которой данная система регулирования будет работать устойчиво.

Эта граница устойчивости получится, если вместо неравенства (16) поставить равенство, т.е.

$$K_\partial K_{рег} = \left(\frac{T_к}{T} + \frac{T}{T_k}\right)\frac{T_\partial}{T_к} + \left(\frac{T_\partial}{T_к}\right)^2. \tag{17}$$

Считая $T_к/T$ заданным числом, поскольку в него входят конкретные параметры системы, построим кривую зависимости $K_д K_{рег}$ от $T_д/T_к$ (рис. 4).

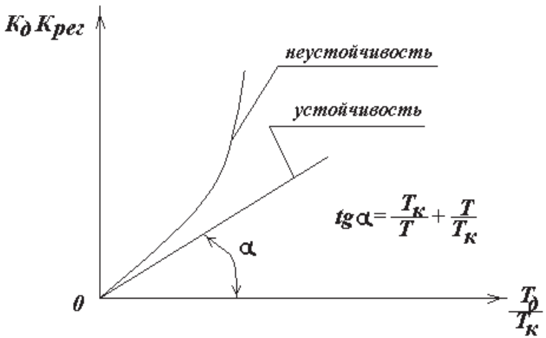

Рис. 4. График, определяющий границы устойчивости системы.

Выводы:

1. Динамические процессы реальной системы автоматической стабилизации мощности двигателя автомобиля описываются дифференциальным уравнением третьего порядка.

2. Результаты исследований, приведенные в статье в виде формул, позволяют путем варьирования значений массово-геометрических и режимных параметров сделать систему качественной – обеспечить малые значения длительности переходных процессов при ее устойчивой работе на заданном диапазоне режимов.

3. Разработанную автоматическую систему регулирования мощностей двигателя автомобиля рекомендуется применять в автотранспортных средствах для улучшения их эксплуатационных характеристик.

Литература

1. *Солодовников В.В.* Основы автоматического регулирования. – М.: Геодезия, 1998.
2. *Муслимов А.П., Глазунов Д.В.* Исследование автоматической системы регулирования мощности двигателя с идеальным регулятором // Вестник КРСУ. – 2006. – №1.
3. *Муслимов А.П., Глазунов Д.В.* Исследование автоматической системы регулирования мощности двигателя с инерционным регулятором // Известия НАН КР. – 2006. – №1.