

При этом они обладают невысокой стоимостью (порядка нескольких долл. США). В силу сказанного построение необходимых СЭП не вызывает заметных сложностей [4].

При подобном построении схемы не только оптимизируются срок службы и характеристики систем ЭО АТ, но и продлевается срок службы аккумуляторной батареи. Действительно, уже не нужно идти на компромисс между оптимальными напряжениями бортовой сети и систем ЭО, поскольку их величины оказываются практически не связанными друг с другом. По этой причине возможно построение более точных регуляторов напряжения, которые поддерживают напряжение бортовой сети в пределах $13,9 \pm 0,1$ В, что, как отмечается в [2], продлевает срок службы аккумуляторных батарей.

Преимущества предложенного подхода к построению схем бортового электрооборудования очевидны:

- оптимизируются режимы работы систем бортового электрооборудования;
- увеличивается срок службы комплектующих элементов электрооборудования;
- увеличивается срок службы аккумуляторных батарей.

Отметим [4], что возможно построение как повышающих, так и понижающих напряжения бортовой сети преобразователей, что расширяет возможности регулирования напряжений систем бортового электрооборудования.

Литература

1. Ют В.Е. Электрооборудование автомобилей. - М.: Транспорт, 1989. - 287 с.
2. Чижков Ю.П., Акимов С.В.. Электрооборудование автомобилей: Учебник для ВУЗов. - М.: Издательство «За рулем», 1999. - 384 с.
3. Электрооборудование автомобилей: Справочник/ Акимов А.В., Акимов О.А., Акимов С.В. и др.; Под. Ред. Чижкова Ю.П. - М.: Транспорт, 1993. - 223 с.
4. Интегральные микросхемы. Микросхемы для импульсных источников питания и их применение. - М.: Додека, 2000. - 608 с.

Методы проектирования и расчета микропроцессорных систем управления транспортными двигателями

д.т.н., проф. Ерохов В.И., Макарова М.П.
МГТУ «МАМИ»

Электронные системы управления современными бензиновыми двигателями имеют ряд бесспорных и доказанных преимуществ. Сущность многих технических решений производителями не раскрывается и строго охраняется служебными секретами. Создание решений электронных систем управления осуществляют преимущественно путем механического воспроизведения известных аналогов. Теоретические исследования показали, что известные программы топливоподачи и воспламенения рабочей смеси не обеспечивают учет всего многообразия факторов, влияющих на работу двигателя в каждый момент времени [4]. По этой причине происходит рассогласование действующих программ с оптимальными, учитывающими максимальную экономичность, техническое состояние и режимы его работы. Применение жесткого программного управления, определяемого конструкцией, не позволяет добиться максимальной эффективности эксплуатационных показателей. Нерешенными остаются вопросы эффективного воспламенения бедных горючих смесей.

Целью работы является разработка методов проектирования и расчета систем управления процессами топливоподачи и воспламенения двигателя с искровым зажиганием. Научный и экспериментальный задел МГТУ «МАМИ» данного направления представлен работами [1–3].

В существующих и разрабатываемых микропроцессорных системах управления ДВС используют совокупность подпрограмм коррекции по различным параметрам (Токр, Тожд, и др.) Определяющими параметрами работы двигателя являются быстро изменяющиеся процессы наполнения его цилиндров.

При частоте вращения коленчатого вала n совершается $2in$ хода поршней ДВС. Из них только в $2in-1$ ходе 4-тактного двигателя совершается наполнение цилиндров свежим заря-

дом или любой другой одноименный такт (сжатие, рабочий ход, выпуск ОГ). Переходя к обратной величине, находим период повторения одноименных тактов. Период следования цикловых подач топлива может быть определен по формуле.

$$\Delta t_{nc} = \frac{60 \cdot \tau_m}{n \cdot i_{z\phi} \cdot j_{кв}}, \quad (1)$$

где: Δt_{nc} – период повторения одноименных тактов (следования цикловых подач), мс;

τ_m – коэффициент тактности двигателя;

n – частота вращения КВ;

$i_{z\phi}$ – число групп форсунок;

$j_{кв}$ – кратность впрыскивания, количество групп, работающих одновременно.

Кратность впрыскивания представляет собой количество единичных впрысков одной форсункой за один оборот КВ двигателя. Кратность впрыскивания ($j_{кв}$) и число групп форсунок ($i_{z\phi}$) выбирают на стадии проектирования.

В четырехтактном двигателе ($j_k = 2, n = 800 \dots 6000 \text{ мин}^{-1}$) период повторения одноименных тактов составляет (0,0375...0,005) с. Период повторения одноименных тактов характеризуется дискретностью, представляющей собой переменную величину. Кратность изменения величины Δt_{nc} при работе двигателя во всем диапазоне частоты вращения КВ может быть представлена зависимостью

$$v = \Delta t_{n_{\max}} / \Delta t_{n_{\min}} = n_{\max} / n_{\min}. \quad (2)$$

Для случая (2) дискретность системы топливоподачи составляет $v = 6000/800 = 7,5$

Транспортный двигатель представляет собой импульсный тепловой источник энергии автоколебательного типа с переменной дискретностью протекания рабочих процессов. Наполнение цилиндра свежим зарядом представляет быстро протекающий процесс. В работу двигателя для управления его процессами можно вмешиваться в периоды наполнения цилиндров свежим зарядом, начинающиеся в определенный момент времени ($t_{вп}$) и длящиеся в 4-тактном ДВС до половины оборота КВ двигателя.

$$t_{en} = k \cdot \Delta t_{nc}, \quad (3)$$

где: Δt_{nc} – продолжительность периода следования;

k – номер такта $k = 0, 1, 2, \dots, n$ в 4-тактном двигателе на каждый его такт отводится половина оборота КВ.

Для двигателя с частотой вращения КВ в диапазоне $n = 800 \dots 6000 \text{ мин}^{-1}$ продолжительность одного такта составляет $\Delta t = 0,15 \dots 0,02 \text{ с}$.

Выработка микропроцессорной системой сигнала управления минимальной продолжительностью составляет не более продолжительности одного такта рабочего цикла.

Продолжительность выработки команды управления микропроцессорной системы не может превышать продолжительности одного такта

$$\Delta t_{\min} = (60 \cdot \tau_m / i_{z\phi} \cdot n_{\max}) \text{ с}. \quad (4)$$

Полученная зависимость является основным критерием выбора элементной базы микропроцессорной системы управления. Для организации работы системы управления необходимо иметь синхронизирующий сигнал, например о прохождении поршнем 1-го цилиндра ДВС точки, соответствующей началу такта сжатия.

Так как на каждый такт в 4-тактных двигателях отводится половина оборота вращения КВ двигателя, то продолжительность одного такта в зависимости от скоростного режима можно оценить зависимостью

$$\Delta t = (180 / n) \text{ с}. \quad (5)$$

Для ДВС с частотой вращения $(800 \dots 6000) \text{ мин}^{-1}$ $\Delta t = 0,225 \dots 0,03 \text{ с}$. Показатели экономичности и токсичности двигателя определяются конструкцией двигателя. При фиксированных конструктивных параметрах они зависят от управляющих воздействий и режима работы. К ним относятся эффективный крутящий момент на валу (M_e) (среднее эффективное давление p_e), частота вращения вала двигателя (n), положение дроссельной заслонки (φ), состав горючей смеси (α), угол опережения зажигания (θ) и др.

Два основополагающих параметра M_e и n являются независимыми переменными (координатами поля режимов работы). Их численные значения, с одной стороны, определяются управлением оператором, а с другой – нагрузкой на двигатель, которая складывается из двух частей: инерционной и активной.

Управление дроссельной заслонкой (Ψ) осуществляет оператор (водитель), руководствуясь условиями обстановки и требуемой скоростью движения. На этом основании M_e , n и Ψ , φ можно отнести к независимым переменным аргументам управлений. Другие параметры (α, φ, p_k) можно отнести к компонентам соответствующих вектору функций управлений.

Система построения алгоритма управления транспортным двигателем заключается в поиске вектора функций управлений по критериям наименьшего расхода топлива и ограниченного выброса ВВ.

$$U(\alpha, \varphi, r) = U[\alpha(M_e, n), \varphi(M_e, n), r(M_e, n)] \quad (6)$$

Для решения оптимизационной задачи необходимо найти численное значение вектора функций управления вида (4) или более сложных (с подстановкой в правую часть уравнения других влияющих факторов) по критериям минимального расхода топлива, максимальной мощности ДВС и минимальным выбросом вредных веществ с ОГ.

В матрице для каждой точки режима работы вычисляют удельный эффективный расход топлива и удельные объемные или массовые выбросы видов вредных веществ для множества допустимых управлений: α и угла опережения зажигания (θ). В дальнейшем определяют минимум S_e в плоскости $\alpha, \varphi(p_k, \theta)$, используя ограничения на допустимую токсичность ОГ. Результатом анализа системы является численная оценка компонентов вектор-функций управления $U(\alpha, \varphi, r)$ для одного режима работы ДВС.

Оптимальные $U(\alpha, \varphi)$ для второго, третьего и др. режимов работы ДВС вычисляются аналогично. Результат решения задачи оптимизации представлен в виде таблицы-матрицы управления: составом смеси (α_{ij}), давлением наддува (p_{kij}) и углом опережения зажигания (φ_{ij}) углом опережения начала впрыскивания топлива θ_{ij} . Индексы при управлениях ij указывают на режим работы по M_e $i = 1, 2, \dots, n$ и частоте вращения КВ $j = 1, 2, \dots, m$.

Для охвата всего многообразия режимов работы, исключая пуск и прогрев ДВС, поле режимов покрывают прямоугольной сеткой, для узлов которой и отыскиваются оптимальные управления рабочими процессами. Вектор функций управления определяется тем точнее, чем плотнее используемая прямоугольная сетка режимов.

В результате расчета и эксперимента получены матрицы управлений рабочими процессами при номинальных значениях медленно меняющихся факторов, т.е. базовые матрицы. Требуемые параметры управления между узлами системы управления определяют с использованием линейной и квадратичной интерполяции.

Для обеспечения оптимальности управлений в этих случаях чаще всего используют корректирующие алгоритмы и созданные на их основе специальные подпрограммы коррекции управлений. Основу микропроцессорной системы зажигания бензиновых ДВС составляют оптимальные параметры системы зажигания. Величина угла опережения зажигания может быть определена по формуле

$$\varphi_{ij} = \varphi_{ij}^{\sigma} + \sum_{k=i}^i \Delta \varphi_k, \quad (7)$$

где: φ_{ij}^σ - базовое значение угла опережения зажигания, соответствующее ij - режиму работы ДВС;

$$\Delta\varphi_k - \text{к } \varphi_{ij}^\sigma, \text{ обусловленная отклонением каждого медленно меняющегося фактора } T_k \text{ от номинального } T_{\text{кн}} \text{ значения;}$$

$$\Delta\varphi_k = \mu_k(T_k - T_{\text{кн}}), \quad (8)$$

где μ_k - коэффициент пропорциональности.

Алгоритм управления основной исполнительской частью (электромагнитной форсункой) однозначно связан с динамикой электромагнитной части форсунки и влияет на продолжительность циклового впрыскивания $t_{\text{вц}}$ и соответственно на цикловую объёмную дозу впрыскивания $Q_{\text{вц}}$. Для обеспечения соответствующей дозы $Q_{\text{вц}}$ при разных режимах длительность и форма электрического управляющего импульса будет зависеть от характеристик переходных процессов в ЭМФ.

$$t_{\text{имп}} = t_{\text{вц}} + t_{\text{пто}} - t_{\text{птз}}, \quad (9)$$

где: $t_{\text{имп}}$ - длительность электрического управляющего импульса;

$t_{\text{вц}}$ - продолжительность циклового впрыскивания;

$t_{\text{пто}}$ - длительность переходного процесса открывания ЭМФ;

$t_{\text{птз}}$ - длительность переходного процесса закрытия ЭМФ;

Цикловая объёмная доза впрыскивания $Q_{\text{вц}}$ может быть представлена зависимостью

$$Q_{\text{вц}} = q_c \cdot t_{\text{вц}}, \quad (10)$$

где q_c - статическая производительность ЭМФ.

Алгоритм управления микропроцессорной системой двигателя зависит от тяговой и механической характеристик ЭМФ. Тяговая характеристика представляет зависимость электромагнитного усилия F_δ от перемещения δ якоря, т. е. $F_\delta = f(\delta)$. Механической характеристикой является зависимость противодействующих сил F_m , создаваемых пружинами и силой тяжести, от перемещения якоря, т. е. $F_m = \psi(\delta)$.

Система управления ЭМФ обеспечивает открытие отверстия для прохода топлива за 0,6 мс и закрытие - 0,2 мс и позволяет работать с частотой 250 Гц.

Ток, проходящий через обмотку ЭМФ, после ее срабатывания изменяется по экспоненциальному закону, что приводит к нечеткому отпусканию клапана во времени и к недостаточно точному дозированию топлива. Магнитный поток из-за наличия индуктивности катушки достигает максимума через некоторое время после приложения напряжения к обмотке электромагнита. На частотах 500 Гц и выше время срабатывания, и время отпускания электромагнита не зависят от продолжительности импульса тока в обмотке, и являются неуправляемыми временными параметрами, и определяются конструктивными параметрами ЭМФ.

Частота следования сигналов зависит от частоты вращения КВ двигателя, числа цилиндров и числа катушек зажигания.

Частота следования импульсов на ЭМФ может быть представлена зависимостью

$$f_\phi = \frac{n_{\text{кв}} \cdot z_u}{30\tau_m \cdot i_k}. \quad (11)$$

При работе двигателя ЭБУ получает управляющую информацию от функциональных датчиков. В дальнейшем из ПЗУ выбирается соответствующее значение длительности импульса впрыскивания. В случае отличия одной или нескольких входных переменных от дискретных значений «базовой поверхности» производится интерполяция.

Основным элементом ЭБУ входного каскада является измеритель временных интервалов τ_u между импульсами, считываемыми с ДПКВ. Принимаем некоторый известный момент времени $t_{\text{ни}}$ за начало измеряемого интервала, а момент $t_{\text{ки}}$ - за конец измеряемого ин-

тервала. Тогда момент времени $t_{ки}$ задается некоторой характерной точкой сигнального импульса, который описывается известной функцией $s(t)$.

Закономерность изменения управляющих сигналов в системе подачи двигателя с электронным управлением приведена на рис. 1.

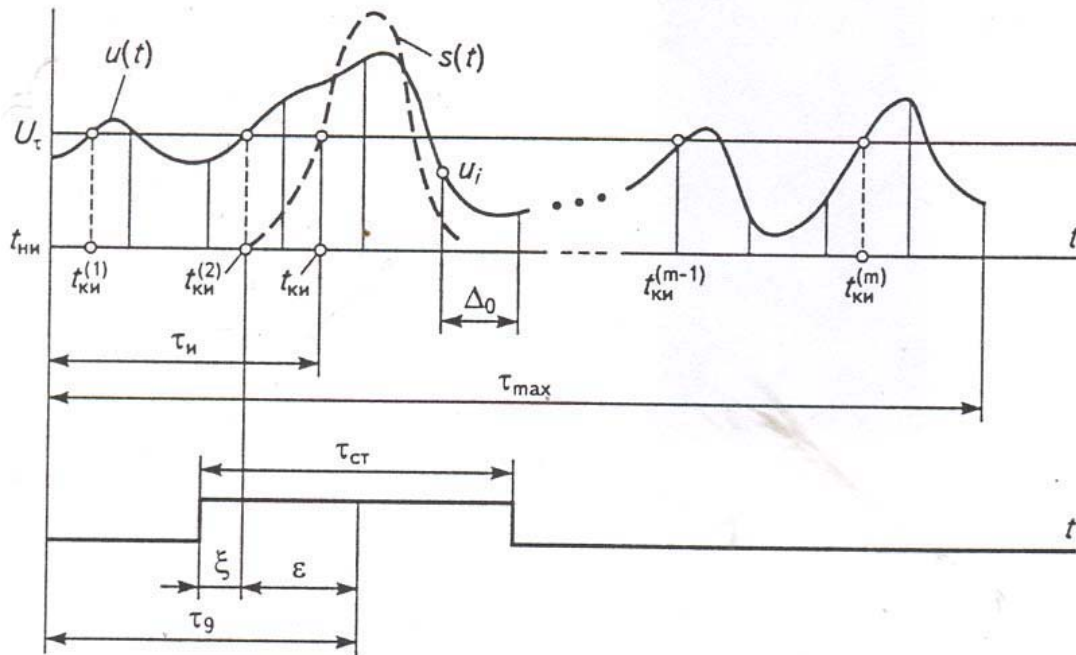


Рис. 1. Характер изменения управляющих сигналов в системе дозирования бензинового двигателя.

Момент $t_{ки}$ соответствует точке пересечения уровня U_τ фронтом импульса (показан штриховой линией). При отсутствии помех эта точка определяется однозначно в виде

$$t_{ки} = S^{-1}(U_\tau), \quad (12)$$

где: $S^{-1}(U_\tau)$ - обозначает функцию обратную $S(t)$.

При наличии помех с выхода ДПКВ поступает смесь сигнала и помех

$$u(t) = s(t) + n(t). \quad (13)$$

Причем обратная функция $u^{-1}(U_\tau)$ оказывается многозадачной.

В результате анализа уравнение (13) имеет множество решений $t_{к.и.}^{(j)}, j = 1, 2, \dots, m$.

$$u(t_{к.и.}) = U_\tau. \quad (13)$$

В задачу измерительного устройства входит выбор истинной точки $t_{к.и.}^*$ (точка $t_{к.и.}^{(2)}$ из множества точек $t_{к.и.}^{(j)}$ на основе статистического анализа совокупности выборочных данных $\{u_i = u(i\Delta_0)\}$, принятых за время наблюдения. Этот выбор также может сопровождаться ошибками (например, выбор $t_{к.и.}^{(1)}$ вместо $t_{к.и.}^{(2)}$, т.е. могут появляться аномальные ошибки, связанные с помехами от различных систем и устройств автомобиля, а также условиями его эксплуатации. В отличие от "нормальных" ошибок, обусловленных небольшими отклонениями точки отсчета в окрестности истинного значения $t_{к.и.}$, обусловленного конструктивными параметрами ДПКВ и задающего диска.

При небольшой интенсивности помех количество точек $t_{к.и.}^{(j)}$, удовлетворяющих уравнению (11), на интервале измерения τ_{max} невелико, и устранение аномальных ошибок осуществляется программным путем. Для этого блок управления осуществляет статистический анализ выборочных данных $\{u_i\}$ в окрестности всех «подозрительных» точек $t_{к.и.}^{(j)}$ по следующе-

му критерию

В качестве истинного значения $t_{к.и.}^*$ выбирается такое значение $t_{к.и.}^{(j)}$, имеющее минимальную величину разброса в принятом программируемом диапазоне.

По мере возрастания интенсивности помех увеличивается количество “подозрительных” точек $t_{к.и.}^{(j)}$, а следовательно, объем вычислительных затрат, необходимых для выполнения статистического анализа, связанного с устранением аномальных ошибок. Если $\tau_{max} = 2$ мс (что соответствует неудовлетворительной работе ДПКВ) и вероятность превышения шумом порогового уровня U_{τ} равняется 0,05 при интервале корреляции шумовых выбросов 1 мкс, то среднее количество «подозрительных» точек на интервале τ_{max} будет равным 100.

Это значит, что в 100 раз возрастает объем массива входных данных, который необходим для программного осуществления всех операций, связанных с выделением полезного сигнала в процессе измерения. Соответственно в 100 раз возрастает требуемый объем ОЗУ и продолжительность вычислений. Такое увеличение вычислительных затрат неприемлемо.

Поэтому в программе управления впрыскиванием газового топлива вводится условие ограничения массива ошибок считывания (не более 100). Если превышен допустимый предел, то выдается сигнал на контроллер управления двигателем, выставляется соответствующий код ошибки, загорается лампа “Chek engine”.

Структурная схема мультивибратора (генератора импульсов), являющегося одним из основных компонентов ЭБУ, и принцип его работы показаны на рис. 2.

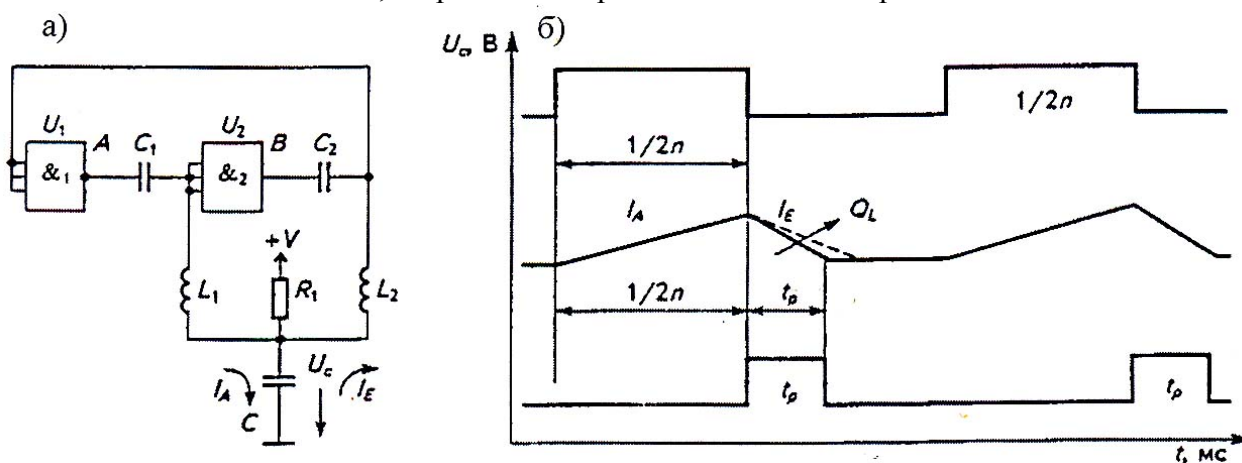


Рис. 2. Принципиальная схема генератора импульсов:
а – электрическая схема; б – функциональная схема

При включении питания через резистор R_1 начинает заряжаться конденсатор C . По мере увеличения напряжения на C логические элементы переходят в неустойчивое состояние. Начинается колебательный процесс, частота которого определяется параметрами последовательных контуров C_1L_1 и C_2L_2 . В установившемся режиме при $C_1 = C_2$ и $L_1 = L_2$ напряжение питания на « C » соответствует половине напряжения питания и на выходах U_1 и U_2 .

Входные элементы U_1 и U_2 содержат защитные диоды, которые шунтируют LC контур, поэтому необходимо соединить входы U_1 и U_2 с LC контурами через резисторы сопротивлением (10...100) К.

При включении питания через резистор R_1 начинается заряжаться конденсатор C по мере увеличения напряжения на « C » логические элементы переходят в неустойчивое состояние, начинается колебательный процесс, частота которого определяется параметрами последовательных контуров C_1L_1 и C_2L_2 . В установившемся режиме при C_1L_1 и C_2L_2 напряжение на C соответствует половине напряжения питания и на выходах U_1 и U_2 присутствует меандр. Если же параметры частотозадающих элементов изменятся, то изменится и скважность сигнала. Входы элементов U_1 и U_2 содержат защитные диоды, которые шунтируют LC контур, поэтому рекомендуется соединять входы U_1 и U_2 с LC контурами через резисторы сопротивлением (10...100) К.

Действие мультивибратора, управляющего делением, показано на рис. 2. б. Генерация базовой продолжительности впрыскивания производится в специальной группе цепей в ЭБУ мультивибратором управления делением. Хролирующая емкость мультивибратора заряжается постоянным током I_A в течение времени $1/2n$. За это время емкость зарядится до напряжения $U_s \sim I_A/2n$. Разряд емкости осуществляется также постоянным током I_E . Время разряда t_p , определяющее длительность импульса, формируемого управляющим мультивибратором, может быть определено из выражения $I_A/2n = t_p I_E$, откуда

$$t_p = (1/2n)(I_A / I_E) \quad (15)$$

При таком способе формирования импульса его длительность оказывается обратно пропорциональной частоте вращения, т.е. фактически здесь реализуется операция деления. Разрядный ток I_E должен быть связан с расходом воздуха соотношением

$$t_p = k_1(Q_L)/(n) \quad (16)$$

Полученная величина необходима для построения электронного блока. Коэффициент k_1 выбирается из условия, что длительность t_p примерно равна половине длительности импульса, управляющего работой ЭМФ.

В период между двумя последовательными разрядами конденсатор с блока управления заряжается постоянным током I_A . Вследствие этого напряжение конденсатора U_c в конце зарядки пропорционально продолжительности зарядки, т.е. обратно пропорционально частоте вращения КВ. После этого конденсатор разряжается постоянным током I_E , причем величина разрядного тока зависит от количества воздуха Q_L , засасываемого в единицу времени. Поскольку продолжительность разряда определяет время t_p переключения мультивибратора, в итоге время t_p пропорционально количеству воздуха, поступающего за один ход поршня. Ждущий мультивибратор корректирует длительность импульса, определяемую соотношением

$$t_{\text{умн}} = R * C * \ln 2 \approx 0,7R * C \quad (17)$$

где: R – сопротивление базовых резисторов, Ом; C – ёмкость конденсаторов, мф.

Короткий импульс на входе запускает мультивибратор своим нарастающим фронтом. Соответствующий импульс на выходе Q имеет длительность $0,7 RC$.

Частота колебаний мультивибратора зависит от ёмкости конденсатора и сопротивления базовых резисторов. Длительность импульса $t_{\text{умн}}$ будет во столько раз меньше пауз t_n , во сколько раз уменьшилась ёмкость конденсатора по сравнению с его прежней ёмкостью.

Выводы

Разработан критерий элементной базы микропроцессорной системы управления. Объяснен механизм формирования импульса и разработаны предпосылки выбора генератора импульсов. Исследования подтвердили пропорциональную зависимость следования импульсов на форсунку от частоты вращения КВ двигателя.

Сформулированы теоретические предпосылки для проектирования и расчёта микропроцессорных систем управления транспортных двигателей с принудительным воспламенением.

Литература

1. Ерохов В.И. Системы впрыска легковых автомобилей. М., Транспорт, 2002 г. – 10,5 п.л.
2. Ерохов В.И. Техническое обслуживание, диагностика и ремонт систем впрыска АСТ, 15,5 п.л., 2003 г.
3. Ерохов В.И. Системы впрыскивания бензиновых двигателей. Учебник для Вузов . 2007 г. – Горячая линия. – 365 с.
4. Черняк Б.Я. Автоматическое регулирование и управление процессами двигателей внутреннего сгорания, ч. III. МАДИ, М. – 1994.
5. Александров А.Г. и др. Справочник по теории автоматизированного управления. М: Наука – 1987.