

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОММУТИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ КЛАПАНОМ ОТБОРА ПРОБ ВЫПУСКНЫХ ГАЗОВ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Запропонована процедура аналізу перехідних процесів в каскаді управління електромагнітним клапаном для відбору проб випускних газів двигуна внутрішнього згорання, що базується на класичному методі, отримані аналітичні вирази для струмів і напруг на основних елементах каскаду, що дозволяють визначити оптимальні по швидкодії та надійності значення параметрів цих елементів.

Предложена процедура анализа переходных процессов в каскаде управления электромагнитным клапаном для отбора проб выпускных газов двигателя внутреннего сгорания, базирующаяся на классическом методе, получены аналитические выражения для токов и напряжений на основных элементах каскада, позволяющие определить оптимальные по быстрдействию и надежности значения параметров этих элементов.

Постановка проблемы. Для диагностирования работы двигателей внутреннего сгорания в ряде случаев отбирают с помощью специальных электромагнитных клапанов пробы их отработавших газов на определенных этапах рабочего процесса, при этом время открытия и закрытия клапана должно быть как можно меньшим по сравнению с продолжительностью открытого состояния клапана. Как известно, время открытия клапана можно сократить за счет увеличения электромагнитной силы, то есть увеличения тока в обмотке электромагнита, а время закрытия клапана можно уменьшить путем увеличения силы его возвратной пружины. Однако увеличение тока в обмотке электромагнита сопровождается ростом перенапряжения при его выключении, что снижает надежность работы устройства. Введение же демпфирующих цепочек, снижающих указанные перенапряжения, приводит к росту времени закрытия клапана, ухудшая быстрдействие устройства. Таким образом, возникает задача достижения компромисса между надежностью и быстрдействием электромагнитного клапана и оптимизации параметров элементов устройства управления электромагнитом. Анализ литературы [1, 2] показывает, что в системах диагностики и управления двигателями внутреннего сгорания коммутация электромагнитов осуществляется с помощью транзисторов, предельные параметры которых существенно превышают реально существующие напряжения и токи в конкретном устройстве, полученные экспериментально. Теоретических анализ переходных процессов, как правило, не выполняется.

Цель статьи – теоретически выполнить анализ переходных процессов в устройстве управления электромагнитным клапаном и найти параметры основных элементов этого устройства, обеспечивающих наиболее благоприятное их протекание.

В последние годы наибольшее распространение для управления электромагнитными клапанами двигателей внутреннего сгорания (ДВС) получили электронные системы, выходной каскад которых выполняется по схеме, показанной на рис. 1.

Питающее напряжение U подается на схему от бортовой сети силовой установки (например, аккумулятора), а импульсы управления U_y подаются между базой и эмиттером транзистора VT от специального

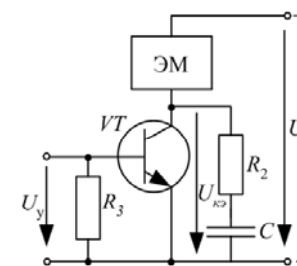


Рис. 1. Схема выходного каскада электронной системы управления электромагнитным клапаном отбора проб отработавших газов ДВС

вычислительного устройства, выполненного в современных системах на микропроцессоре (МК) [2].

МК синхронно с вращением коленчатого вала ДВС в каждом его обороте (если ДВС двухтактный) или вдвое реже (если ДВС четырехтактный) вырабатывает импульсы U_y , длительность которых определяет продолжительность t_n импульсов тока в катушке электромагнита (ЭМ) и время открытого состояния клапана для отбора проб отработавших газов (ОГ) ДВС. Величина t_n зависит от моментов отпирания и запираания VT , причем ток в катушке ЭМ при этом изменяется не мгновенно, а с некоторой скоростью, согласно законам коммутации [3]. Исчезающий при запираании VT магнитный поток ЭМ создает электродвижущую силу самоиндукции, вследствие чего могут появиться опасные для коммутирующего элемента перенапряжения. Для их снижения применяют демпфирующие резистивно-емкостные цепи R_2C , которые, однако, могут отрицательно повлиять на быстрдействие ЭМ. В связи с этим возникает необходимость исследования и оптимизации параметров демпфирующей цепи, которая защитила бы VT от пробоя и существенно не повлияла бы на процесс отбора проб ОГ.

Упрощенная схема замещения выходного каскада приведена на рис. 2.

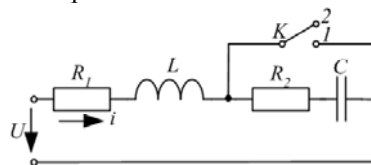


Рис. 2. Упрощенная схема замещения выходного каскада

Элементы R_1 и L – соответственно активное сопротивление и индуктивность ЭМ, K – ключ, имитирующий VT .

При анализе процессов в схеме будем пренебрегать межвитковой паразитной емкостью катушки ЭМ и считать транзистор идеальным ключом, что близко к действительности при правильном его выборе. В случае отпирания VT , что соответствует замыканию K , к цепи R_1L прикладывается постоянное U_1 и процессы в ней описываются следующим уравнением [3].

$$L \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 = U,$$

решение которого, как известно, записывается в виде

$$i_1 = \frac{U}{R_1} \left(1 - e^{-t_n/\tau_1} \right) = \frac{U}{R_1} \gamma, \quad (1)$$

где i_1 – мгновенное значение тока в цепи при первом положении K ; t – время; τ_1 – постоянная времени,

$$\tau_1 = L_1/R_1; \quad \gamma = 1 - e^{-t_n/\tau_1}.$$

Из (1) видно, что максимальное значение тока в катушке ЭМ имеет место по окончании импульса, с ростом длительности t_n которого указанное значение увеличивается.

При запираии VT , происходящем по окончании упомянутого импульса, ЭМ отключается и отбор пробы ОГ прекращается вследствие закрытия клапана. Этому случаю на рис. 2 соответствует переход ключа из первого положения во второе, то есть его размыкание. Теперь для послекоммутационной цепи дифференциальное уравнение имеет вид:

$$L \frac{di_2}{dt} + (R_1 + R_2) i_2 + U_c = U, \quad (2)$$

где i_2 – мгновенное значение тока в цепи при втором положении K ; U_c – мгновенное значение напряжения на емкости C_2 . Согласно первому и второму законам коммутации [3] можно записать

$$\frac{di_2}{dt} \Big|_{t=0} = \frac{U - U_c(-0) - (R_1 + R_2) \cdot i_2(+0)}{L}, \quad (3)$$

где $U_c(-0)$ – напряжение на емкости в момент, непосредственно предшествующий коммутации; $i_2(+0)$ – ток цепи в первый момент после коммутации, когда ключ находится во втором положении.

В данном случае $U_c(-0) = 0$, поскольку перед размыканием K конденсатор должен быть разряжен для нормальной работы выходного каскада системы. Также, с учетом (1) и первого закона коммутации

$$i_2(+0) = \frac{U}{R_1} \gamma, \quad (4)$$

в связи с чем соотношение (3) представим в виде

$$\frac{di_2}{dt} \Big|_{t=0} = \frac{U}{L} \cdot \left[1 - \gamma \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \right] = \frac{U}{L} B. \quad (5)$$

Решение уравнения (2) в общем случае записывается следующим образом [3]

$$i_2 = A_1 e^{K_1 t} + A_2 e^{K_2 t}, \quad (6)$$

где A_1 и A_2 – произвольные постоянные интегрирования; $K_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$ – корни характеристического уравнения цепи; $\delta = \frac{R_1 + R_2}{2L}$ – показатель затухания;

$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ – круговая частота собственных незатухающих колебаний цепи.

Найдя скорость изменения тока для момента коммутации $t = 0$ (размыкание ключа) из (6) и приравняв ее правой части соотношения (5), запишем

$$A_1 K_1 + A_2 K_2 = \frac{U}{L} B. \quad (7)$$

Кроме того, из соотношения (6) для $t = 0$ имеем

$$i_2(0) = A_1 + A_2,$$

с учетом (4) получим

$$A_1 + A_2 = \frac{U}{R_1} \gamma. \quad (8)$$

Выражения (8) и (7) образуют систему, решения которой представляются в виде:

$$A_1 = -\frac{U \left(\frac{K_2}{R_1} \gamma - \frac{B}{L} \right)}{K_1 - K_2}, \quad A_2 = -\frac{U \left(\frac{K_1}{R_1} \gamma - \frac{B}{L} \right)}{K_1 - K_2}. \quad (9)$$

Следовательно, закон тока ЭМ во времени

$$i_2 = -\frac{U}{K_1 - K_2} \left[\left(\frac{K_2}{R_1} \gamma - \frac{B}{L} \right) e^{K_1 t} - \left(\frac{K_1}{R_1} \gamma - \frac{B}{L} \right) e^{K_2 t} \right]. \quad (10)$$

Взаимосвязь между током и напряжением на конденсаторе известна [3].

$$U_c = \frac{1}{C} \int i_2 dt.$$

Приняв во внимание (9), (10) после соответствующих преобразований получим

$$U_c = \frac{U}{CK_1 K_2 (K_2 - K_1)} \left[K_2 \left(\frac{K_2}{R_1} \gamma - \frac{B}{L} \right) e^{K_1 t} - K_2 \left(\frac{K_2}{R_1} \gamma - \frac{B}{L} \right) - K_1 \left(\frac{K_1}{R_1} \gamma - \frac{B}{L} \right) e^{K_2 t} + K_1 \left(\frac{K_1}{R_1} \gamma - \frac{B}{L} \right) \right]. \quad (11)$$

Для обеспечения высокого быстродействия ЭМ параметры цепи необходимо выбрать такими, чтобы можно было получить как можно большую скорость изменения тока и напряжения на ее элементах, что достигается только при колебательном переходном процессе. В этом случае корни характеристического уравнения комплексно-сопряженные [3].

$$K_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = -\delta \pm j\omega'_0 = \omega_0 e^{\pm j \left(\frac{\pi}{2} + \beta \right)}, \quad (12)$$

где ω_0^2 – круговая частота собственных затухающих колебаний цепи; $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица;

$\beta = \arctg \frac{\delta}{\omega'_0}$ – коэффициент фазы.

Приняв во внимание (12) и следующие формулы

$$K_2 - K_1 = -2j\omega'_0; \quad K_1 K_2 = \omega_0^2; \quad \sin 2\beta = (R_1 + R_2) C \omega_0^2; \\ \omega_0 L = \sqrt{\frac{L}{C}}; \quad \omega_0^2 L = \frac{1}{C}; \quad e^{j \left(\omega'_0 t - \frac{\pi}{2} - \beta \right)} - e^{-j \left(\omega'_0 t - \frac{\pi}{2} - \beta \right)} = \\ = 2j \sin \left(\omega'_0 t - \frac{\pi}{2} - \beta \right); \quad B = 1 - \gamma \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right),$$

выражения (10) и (11) для колебательного переходного процесса после соответствующих преобразований запишем в виде

$$i_2 = \frac{Ue^{-\delta t}}{LR_1\omega'_0} \cdot \left\{ \gamma \sqrt{\frac{L}{C}} \sin\left(\omega'_0 t + \frac{\pi}{2} - \beta\right) + [R_1 - \gamma(R_1 + R_2)] \sin \omega'_0 t \right\}, \quad (13)$$

$$U_c = \frac{U}{R_1\omega'_0} \cdot \left\{ \frac{\gamma}{C} [e^{-\delta t} \sin(\omega'_0 t - 2\beta) + \sin 2\beta] - [R_1 - \gamma(R_1 + R_2)] \cdot \left[\frac{e^{-\delta t}}{\sqrt{LC}} \sin\left(\omega'_0 t + \frac{\pi}{2} - \beta\right) - \omega'_0 \right] \right\}. \quad (14)$$

Весьма важной является величина напряжения $U_{кэ}$ между коллектором и эмиттером VT при его записании, то есть при переходе K из первого положения во второе. Согласно второму закону Кирхгофа с учетом (13) и (14) запишем

$$U_{кэ} = R_2 i_2 + U_c = \frac{R_2 U e^{-\delta t}}{R_1 L \omega'_0} \cdot \left\{ \gamma \sqrt{\frac{L}{C}} \sin\left(\omega'_0 t + \frac{\pi}{2} - \beta\right) + [R_1 - \gamma(R_1 + R_2)] \cdot \sin \omega'_0 t \right\} + \frac{U}{R_1 \omega'_0} \cdot \left\{ \frac{\gamma}{C} [e^{-\delta t} \sin(\omega'_0 t - 2\beta) + \sin 2\beta] - [R_1 - \gamma(R_1 + R_2)] \cdot \left[\frac{e^{-\delta t}}{\sqrt{LC}} \sin\left(\omega'_0 t + \frac{\pi}{2} - \beta\right) - \omega'_0 \right] \right\}. \quad (15)$$

Из полученного соотношения следует, что с ростом γ , имеющей место при увеличении длительности импульса тока в ЭМ, равно как и при вырастании R_2 , напряжение $U_{кэ}$ увеличивается. Снижение $U_{кэ}$ наблюдается при увеличении емкости C демпфирующего конденсатора. Однако эта емкость и R_2 влияют на частоту собственных затухающих колебаний цепи

$$\omega'_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R_1 + R_2}{2L}\right)^2},$$

и с их ростом ω'_0 падает, вызывая увеличение соответствующих множителей в (15) и, тем самым, несколько ослабляя эффект ограничения $U_{кэ}$ демпфирующей цепочкой. С другой стороны, рост R_2 сопровождается увеличением δ и повышением скорости затухания переходного процесса. Отметим, что если тяговое усилие ЭМ значительно превышает затяжку его возвратной пружины, то с ростом C момент отпускания ЭМ может наступать с ощутимым запаздыванием вследствие возросшей продолжительности полуволны затухающего процесса и сдвига момента наступления равновесия механической и электромагнитной сил.

Вышеизложенное, а также конкретные значения U , L , R_1 в реальной системе необходимо учитывать при выборе VT и параметров демпфирующей цепочки. В качестве VT выбирают транзистор типа КТ898А, КТ8232А2, а величины R_2 и C лежат в пределах соответственно десятков Ом и единиц микро Фарад. Для нормальной работы выходного каскада (рис. 1) необходимо, чтобы переходной процесс в цепи окончился к моменту начала следующего импульса отбора пробы ОГ. Если считать, что переходной процесс практически полностью затухает за время

$$t \geq 3/\delta,$$

то нетрудно показать, что в случае двухтактного ДВС должно выполняться соотношение

$$\frac{10}{L}(R_1 + R_2) \geq n,$$

а в случае четырехтактного

$$\frac{20}{L}(R_1 + R_2) \geq n,$$

где n – частота вращения коленчатого вала ДВС, выраженная в об/мин.

Следовательно, при выборе параметров демпфирующей цепочки необходимо учитывать еще и диапазон скоростных режимов ДВС.

ВЫВОДЫ

Вышеприведенная методика позволяет получить максимальное быстродействие электромагнита при его включении за счет реализации колебательного переходного процесса и определить параметры демпфирующей цепочки, ограничивающей перенапряжение на транзисторе и, тем самым, повышающей надежность устройства. Благодаря высокому быстродействию повышается точность реализации моментов включения и отключения электромагнитного клапана, отбирающего пробы выпускных газов ДВС, и улучшается качество диагностирования двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ходасевич А.Г., Ходасевич Т.И. Справочник по устройству и ремонту электронных приборов автомобилей. – М.: Антелком, 2004. – 244 с.
2. Тюнин Н.А., Родин А.В. Электроника в автомобиле. – М.: Солон-пресс, 2012. – 128 с.
3. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. В 2-х т. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 536 с.

REFERENCES: 1. Khodasevich A.G., Khodasevich T.I. *Spravochnik po ustroystvu i remontu elektronnykh priborov avtomobilei* [Reference book on the device and repair of electronic devices of cars]. Moscow, Antelcom Publ., 2004. 244 p. 2. Tyunin N.A., Rodin A.V. *Elektronika v avtomobile* [Electronics in the car]. Moscow, Solon-press Publ., 2012. – 128 p. 3. Neumann L.R., Demirchyan K.S. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. V 2-kh t.* [Theoretical bases of electrical engineering. In 2 vols.]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1981. 536 p.

Поступила (received) 28.05.2014

Лавриненко Ольга Валериевна, преподаватель-стажер, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", 61002, Харьков, ул. Фрунзе 21, тел./phone +38 057 7076961, e-mail: lavrinenko_olya@mail.ru

*O.V. Lavrinenko
National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine*

Research on transients and choice of optimum parameters of switching elements for an electromagnetic valve control for combustion engine exhaust sampling.

The article introduces a classical-method-based analysis procedure for transients in the control cascade of an electromagnetic valve for combustion engine exhaust sampling. Analytical expressions for currents and voltage on the cascade basic elements are obtained to allow specifying the optimal parameters of these elements in terms of speed and reliability.

Key words – combustion engine exhaust, electromagnetic valve, oscillatory transitional process.