

нов Сибири: материалы IX (XXXI) Всероссийской научно-технической конференции. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – С 84.

7. Большанин, Г. А. Применение операционной системы «MATLAB» для расчета параметров электрической энергии трехфазной линии электропередачи четырехпроводного исполнения. / Г. А. Большанин, Л. Ю. Большанина, Е.Г. Марьясова – Труды Братского государственного университета: Сер.: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири: в 2 т. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – Т.2. – С 73-79.

8. Большанина, Л. Ю. Расчет параметров трехфазной четырехпроводной линии элект-

тропередачи (FOUR-WIRE v. 1.00) (Программа для ЭВМ). / Л. Ю. Большанина, Г. А. Большанин, Е.Г. Марьясова – № 2010615868 от 8.09.2010.

9. Марьясова, Е.Г. Расчет параметров неоднородной трехфазной трехпроводной линии электропередачи (Non-uniform v. 1.00): Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010615868 / Е.Г. Марьясова, Г.А. Большанин, Л.Ю. Большанина. – 2010614162, Заявл. 13.07.10; Рег. 08.09.10.

УДК 621.865.8

*В.В. Лузгин, С.Л. Витковский**

АНАЛИЗ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМЫ ЗАЖИГАНИЯ

Предлагаются структурная схема системы зажигания, обобщенная схема замещения трансформатора импульсов и его физико-математическая модель, на основании которых приводится анализ диагностической информации функциональных связей элементов системы зажигания и ее переходных процессов. Рассмотрены взаимосвязи величин структурных параметров элементов системы зажигания с характером проявления их постепенных отказов. Излагается сущность методов диагностирования системы зажигания, разработанных авторами.

Ключевые слова: диагностическая информация, переходные процессы, система зажигания, обобщенная схема трансформатора импульсов системы зажигания, физико-математическая модель.

Если состояние объекта диагностики при заданной глубине диагноза определено, то он обладает критическим свойством, заключающимся в том, что все приходящие извне возмущения известны или измеряются (в противном случае они должны быть пренебрежимо малы для заданной глубины диагноза), т.е. объект диагностики является информационно плотным [1].

Чтобы решить вопрос, является ли система зажигания как часть двигателя информационно плотной, составим ее структурную схему (рис. 1).

Согласно приведенной структурной схеме система зажигания состоит из прерывателя PP , трансформатора импульсов $ТИ$ и высоковольтного разрядника $ВР$. Двигатель $Д$ и система зажигания подвержены возмущениям $В$ окружающей среды. Возмущения $В$ можно не учитывать, если в процессе диагностирования

они не оказывают существенного влияния на переходные процессы системы зажигания.

Прерыватель PP , включающий в себя привод $П$, контакты $К$ и устройства опережения зажигания $УОЗ$, генерирует неравномерную последовательность импульсов $ПИ$, длительность, частота и фаза которых определяются состоянием входящих в него устройств и состоянием двигателя. Постоянная составляющая сдвига фазы импульсов θ , относительно начальной фазы коленчатого вала (точки ВМТ), определяется состоянием $УОЗ$ и возмущений со стороны двигателя по моменту нагрузки M_n и скорости вращения коленчатого вала $n_{кв}$. Неравномерность длительности и фазы импульсов при постоянной скорости вращения коленчатого вала определяется кинематической погрешностью цепи от коленчатого вала до распределителя, которая является интегральной оценкой и характеризует состояния: зубчатой передачи от коленчатого

* - автор, с которым следует вести переписку.

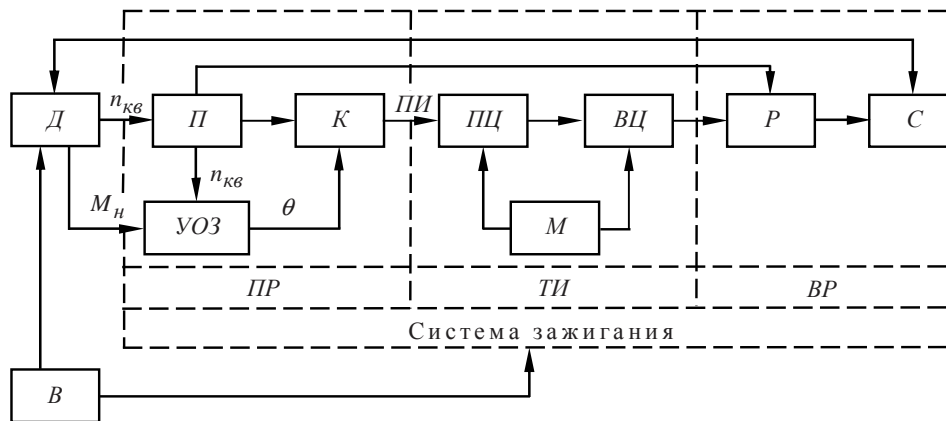


Рис. 1. Структурная схема системы зажигания

вала до распределителя, жестких соединений, геометрии кулачка и контактной пары.

Утвердившееся в практике диагностирования системы зажигания мнение о том, что неравномерность длительности импульсов есть следствие износа и неправильной геометрии кулачка, является некорректным, так как только из анализа интегральной кривой кинематической погрешности можно определить состояние каждого из элементов кинематической цепи.

Таким образом, если глубина диагноза определяется оценкой состояния УОЗ, кинематической цепи от коленчатого вала до распределителя, регулировки контактной пары, то прерыватель будет информационно плотным в том случае, если будут известны момент нагрузки, начальная фаза и скорость вращения коленчатого вала при регистрации постоянных и переменных составляющих фазы и длительности импульсов на выходе прерывателя.

Следует отметить, что получение оптимальных мощностных и экономических характеристик двигателя возможно лишь при достаточно точной ($\pm 1^\circ$ по углу поворота коленчатого вала) регулировке момента воспламенения топливной смеси в цилиндрах и зависит от многих факторов: условиями эксплуатации, режимами работы, техническим состоянием, детонацией двигателя и др.

При регулировании момента воспламенения топливной смеси путем изменения угла зажигания центробежным и вакуумным регуляторами и периодической настройкой октан-корректора учитывается лишь ограниченное число факторов, влияющих на оптимальность функционирования двигателя, что объясняется не только недостатками их конструкции, но и реализуемым ими принципам регулиро-

вания по возмущающим воздействиям $n_{кв}$ и M_n (принцип Понселе-Чиколева).

Ввиду этого практически невозможно заранее определить характеристики центробежного и вакуумного регуляторов и величину начального угла опережения зажигания, требуемые для оптимальной работы диагностируемого двигателя, а, следовательно, определение исправности автоматов опережения зажигания по соответствию их действительных характеристик номинальным (как это делается в настоящее время) нельзя считать обоснованными. И это подтверждается практикой, так как иногда возникает такая ситуация, что автоматы опережения зажигания, признанные неисправными по несоответствию их характеристик номинальным, являются для данного состояния двигателя оптимальными.

В общем случае при активном диагностировании определяются такие величины структурных параметров элементов диагностируемой системы или их характеристик, которые, удовлетворяя условиям их реализуемости и принятым ограничениям, оптимизируют обобщенный параметр системы в данный момент эксплуатации. Более конкретно применительно к устройствам опережения зажигания метод активного диагностирования [2] можно сформулировать следующим образом.

На основании функциональных проб, выполненных посредством поворотов корпуса распределителя для заданных режимов работы двигателя, определяются дополнительные углы зажигания по октан-корректору, соответствующие максимальной мощности двигателя, его экономичности и запасу на начало детонации по углу опережения зажигания. По результатам анализа полученных таким образом дополнительных углов и соответствующих им приращений мощностей формируется

решение о возможной коррекции характеристик автоматов опережения зажигания и начального угла установки октан-корректора.

Высоковольтный разрядник *BP* состоит из распределителя *P*, высоковольтных проводов и свечей *C*. Состояние распределителя можно в какой-то мере определять по величине пробивного напряжения между электродами крышки распределителя и бегунком. Пробивное напряжение свечи зависит от состояния электродов свечи, давления в камерах сгорания в момент пробоя искрового промежутка, состава и температуры топливно-воздушной смеси, динамики процесса горения и параметров сигнала, действующего на ее входе. Так как измерение и учет возмущений со стороны двигателя практически не возможен, то высоковольтный разрядник не является информационно плотным. Следовательно, по результатам измерения пробивного напряжения и параметров горения дуги невозможно оценить состояние свечи однозначно, т.е. при оценке ее состояния неопределенность не снимается. Поэтому, утвердившийся в практике диагноз о состоянии электродов свечи, поставленный по результатам измерения только пробивного напряжения, носит вероятностный характер.

Из сказанного следует, что система зажигания в целом не является информационно плотной. Это говорит о том, что по результатам измерения и анализа параметров переходных процессов и измеряемых возмущений со стороны двигателя в режиме его нормального функционирования определить однозначно состояние системы невозможно.

Трансформатор импульсов *ТИ* состоит из первичной *ПЦ* и вторичной *ВЦ* цепей, степень взаимодействия которых определяется взаимдуктивностью *M*. На вход *ТИ* поступают импульсы *ПИ*, которые можно считать стандартными типовыми воздействиями. *ТИ* через вторичную цепь связан с высоковольтным разрядником *BP*. Особенность этой связи состоит в том, что колебательный процесс, возникающий после искрообразования, характеризует только состояние *ТИ*. Таким образом, *ТИ* является информационно плотным без измерения возмущений со стороны *ПП* и *BP* и поэтому, если в качестве объекта диагностики рассматривать *ТИ*, то в этом случае задачу по

разработке методов его диагностирования можно считать корректной.

Ограничиваясь рассмотрением *ПП* и *BP* на уровне структурной схемы, перейдем к рассмотрению *ТИ* на уровне обобщенной схемы замещения рис. 2

и соответствующей ей физико-математической модели

$$\left. \begin{aligned} L_1 \cdot i_1' - M \cdot i_2' + M_e \cdot i_e' + (R_0 + R_e + R_{L_1}) \cdot i_1 + u_1 &= U_a; \\ L_2 \cdot i_2' - M \cdot i_1' - M_e \cdot i_e' + R_2 \cdot i_2 + u_2 - u_1 &= 0; \\ C_2 \cdot u_2' + \frac{u_2}{R_{ин}} - i_2 &= 0; \\ C_1 \cdot u_1' - \frac{u_2}{R_{ис1}} - i_1 + i_2 &= 0; \\ L_e \cdot i_e' + M_e \cdot i_1' - M_e \cdot i_2' + i_e \cdot R_e &= 0. \end{aligned} \right\} (1)$$

В этой схеме состояние электрической цепи от зажима аккумуляторной батареи до зажима первичной обмотки *ТИ* катушки зажигания характеризуется ее сопротивлением R_0 , так как имеющие место индуктивные и емкостные составляющие пренебрежимо малы. В процессе эксплуатации это сопротивление может существенно меняться в результате окисления элементов соединений, нарушение их контакта, старения изоляции. При этом величина сопротивления R_0 может быть различной в зависимости от условий окружающей среды и режима контроля, т. е. при контроле на работающем и неработающем двигателе.

Если в системе зажигания предусмотрен вариатор, то его состояние может быть охарактеризовано сопротивлением R_e , величина которого зависит от тех же факторов, что и величина сопротивления R_0 .

Состояние катушки зажигания характеризуется следующими структурными параметрами: сопротивлением R_{L_1} и индуктивностью первичной обмотки L_1 , сопротивлением R_{L_2} и индуктивностью вторичной обмотки L_2 , сопротивлением R_e и индуктивностью L_e контура потерь, коэффициентом индуктивной связи контура потерь с первичной и вторичной обмотками K_{e1} , K_{e2} , сопротивлением потерь R_n , сопротивлением утечки по изоляции вторичной цепи $R_{ин}$ и коэффициентом индуктивной связи первичной и вторичной обмоток K_m и емкостью C_2 , учитывающую распределенную емкость высоковольтной цепи.

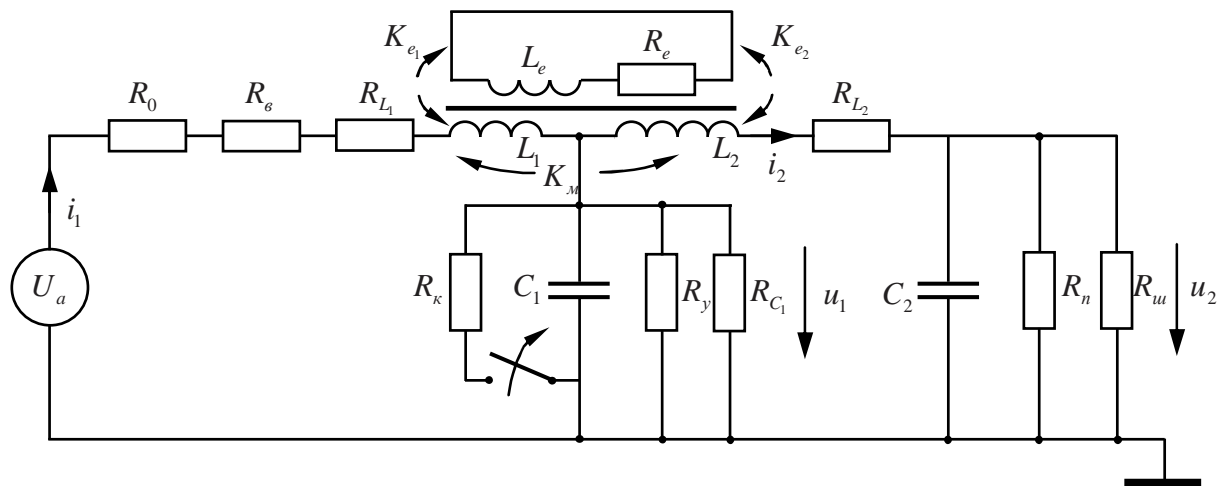


Рис. 2. Обобщенная схема замещения ТИ системы зажигания.

Все перечисленные параметры катушки зажигания зависят от условий окружающей среды и режима их контроля (на работающем и неработающем двигателе). Особенностью катушки зажигания, как катушки индуктивности с железом является наличие воздушного зазора в магнитопроводе, что и обуславливает линейность вольт-амперной характеристики, которая сохраняется на любом этапе эксплуатации катушки независимо от состояний ее электрической изоляции. Сопротивление потерь R_n , включенное на выходе вторичной цепи, эквивалентно общим активным потерям в стали и меди.

Изменение структурных параметров катушки зажигания связано со старением высоковольтной и витковой электрической изоляции и возникновением короткозамкнутых витков обмоток.

Конденсатор характеризуется следующими структурными параметрами: емкостью C_1 , сопротивлением утечки по изоляции R_y , сопротивлением потерь R_{C1} .

Величина сопротивления R_y определяется состоянием изоляции и, следовательно, уменьшается в процессе старения изоляции. Величина сопротивления R_{C1} определяется потерями в диэлектрике и зависит от частоты.

Контакты прерывателя характеризуются переходным сопротивлением R_k . Величина сопротивления R_k определяется состоянием контактов, усилием их прижатия и площадью контакта.

Величины L_1 , L_2 , R_e , L_e , K_{e1} , K_{e2} определяются как конструктивными особенностями схемы, так и частотой свободных колебаний,

возникающих в схеме при коммутации контактов прерывателя.

Переходные процессы при коммутации контактов прерывателя, с учетом вышесказанного, описываются линейными дифференциальными уравнениями. Если задаться целью – описать динамику всего процесса нормального функционирования *ТИ*, не разделяя общий цикл нормального функционирования на отдельные циклы замыкания и размыкания контактов прерывателя, то в этом случае *ТИ* нужно рассматривать как линейный нестационарный объект, коэффициенты дифференциальных уравнений которого изменяются во времени. Необходимость такого подхода возникает тогда, когда переходные процессы в схеме не заканчиваются за межкоммутационный период контактов прерывателя. В реальных случаях нормального функционирования *ТИ*, когда регулировка угла замкнутого состояния контактов существенно не нарушена, переходные процессы при определенных скоростях коленчатого вала в основном заканчиваются за межкоммутационный период контактов прерывателя. Поэтому переходные процессы в схеме могут быть описаны отдельно при режиме замыкания и размыкания контактов прерывателя линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами.

Характер переходных процессов линейных динамических устройств определяется коэффициентами дифференциальных уравнений, конкретные величины амплитуд энергетических параметров (токов, напряжений) определяются начальными условиями. В нашем случае они зависят

от состояния первичной цепи, напряжения аккумуляторной батареи, скорости вращения коленчатого вала и динамического переходного сопротивления контактов прерывателя.

Переходные процессы напряжений и токов вторичной цепи при размыкании контактов прерывателя $i_1(t)$, $i_2(t)$, $u_1(t)$, $u_2(t)$ можно представить состоящими из затухающих косинусоид и синусоид низкой и высокой частоты (рис. 3).

В реальных *ТИ* высокочастотная составляющая быстро затухает (примерно за $1 \div 1,5$ периода низкочастотной составляющей).

В случае искрообразований на контактах прерывателя, между электродами бегунка, крышки распределителя и свечи переходные процессы существенно искажаются. Однако после прекращения искрообразований характер переходных процессов может быть описан теми же дифференциальными уравнениями (1), что и в случае без искрообразования, а уменьшение амплитуд токов и напряжений в вследствие искрообразований можно учесть соответствующим уменьшениям величин начальных условий.

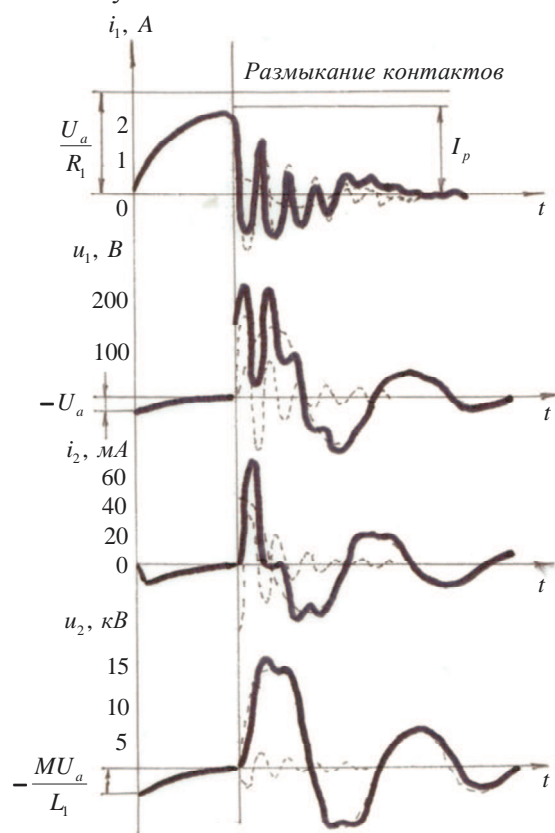


Рис. 3. Переходные процессы токов и напряжений первичной и вторичной цепей *ТИ*.

Система зажигания в целом, являющаяся нелинейным и нестационарным динамическим объектом, может быть представлена блок схемой, состоящей из линейной части *ТИ* и отключающейся нелинейной части высоковольтного разрядника при отсутствии искрообразования на контактах *ПП* при их размыкании и с учетом того, что переходные процессы заканчиваются за межкоммутационный период контактов *ПП*.

Отсюда следует возможность выделения переходных процессов, соответствующих линейной части системы зажигания, а, следовательно, и возможность диагностирования линейной части системы зажигания без предварительной разборки в режиме нормального функционирования двигателя.

При замыкании контактов прерывателя схема замещения упрощается, так как влиянием таких структурных параметров, как C_l , R_y , R_{Cl} можно пренебречь в виду малой величины $R_k = 0,2 \div 0,5 \text{ Ом}$. Если же величина $R_k \gg 0,5 \text{ Ом}$, то такое состояние линейной части системы зажигания можно классифицировать как внезапный отказ.

Переходной процесс напряжения вторичной цепи при замыкании контактов прерывателя линейной части системы зажигания можно представить колебательной составляющей, наложенной на аperiodическую составляющую первого порядка.

Таким образом, степень идентичности переходных процессов линейной части системы зажигания в режиме нормального функционирования и схем замещения (моделей) необходимо определять по характеру высокочастотной и низкочастотной составляющих (при размыкании контакта прерывателя), по характеру колебательной и аperiodической составляющих (при замыкании контактов прерывателя) и величины амплитудных значений энергетических параметров при вариации структурных параметров, соответствующих постепенным отказам в процессе эксплуатации. Для того, чтобы показать, какая модель наиболее полно соответствует реальной линейной части системы зажигания, необходимо провести сравнение ее переходных процессов и решений дифференциальных уравнений схем замещений, выбранных в качестве объектов сравнения. Успешное решение такой задачи возможно лишь при использовании современных методов физико-математического моделирования [3].

Для исследования разработанных авторами методов идентификации и диагностики промышленных объектов был разработан, изготовлен и внедрён в учебно-исследовательский процесс стенд. Стенд оснащен аппаратами как контактной, так и бесконтактной транзисторной систем зажигания. Поскольку он передвижной и имеет массу 47 кг, он может использоваться как исследовательская установка, доставляемая на промышленные энергетические объекты. Контактная система зажигания, питаемая независимым источником питания 5 (1,5; 3; 4,5; 6 В) и используемая как источник прямоугольных импульсов, позволяла проводить исследование работы главного трансформатора Братской ГЭС.

Поскольку изменение напряжения в цепях низкого и высокого напряжения представляют собой быстропротекающие процессы, стенд оснащен системой автоматической регистрации, включающей аналого-цифровой преобразователь L-154 и компьютер. Возможности этого преобразователя позволяют записывать сигналы с шагом 10 микросекунд.

Приведём пример использования данного стенда для экспериментального опробования разработанного прикладного алгоритма диагностики системы зажигания на основании анализа параметров качества переходных процессов напряжений системы зажигания при замыкании и размыкании контактов прерывателя.

Не вдаваясь в подробности, приведём лишь те преобразования системы (1), которые позволяют определить её коэффициенты по измерению параметров качества напряжений низкочастотной составляющей. Система (1) для описания

только низкочастотной составляющей может быть преобразована в два независимых дифференциальных уравнения второй степени, составленных относительно переменных u_1 и u_2 :

$$\begin{aligned} A_1 \cdot u_1'' + A_2 \cdot u_2' + u_1 &= U_a, \\ B_1 \cdot u_1' + B_2 \cdot u_2 + u_1 &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где A_1, A_2, B_1, B_2 , – коэффициенты дифференциальных уравнений.

При восстановлении дифференциальных уравнений (2) по низкочастотным составляющим переходных процессов $u_1(t)$ и $u_2(t)$ определяются их коэффициенты, на основании которых формируется система нелинейных алгебраических уравнений

$$\left. \begin{aligned} L_1 \cdot C_1 + k_T \cdot M \cdot C_2 &= A_1; \\ k_m \cdot \left(\frac{M}{R_{\text{нш}}} - \frac{L_1}{R_{\text{нш}}} \right) &= A_2; \\ L_2 \cdot C_2 + \frac{M \cdot C_1}{k_T} &= B_1; \\ \frac{L_2}{R_{\text{нш}}} - \frac{M}{R_{\text{нш}}} &= B_2. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Методом пробных подключений элементов с известными параметрами $C_{10}, C_{20}, R_{\text{нш}}$ можно получить достаточное количество алгебраических уравнений для определения всех структурных параметров системы зажигания.

На основании анализа переходного процесса напряжения на конденсаторе (рис. 4) формируется исходная информация: U_1 и U_2 – перепады суммарных амплитуд, T_3 – период колебания напряжения на конденсаторе при горении дуги, T_4 – тот же период при пробном подключении конденсатора с известной ёмкостью C_{10} параллельно конденсатору C_1 , T – период свободных колебаний на конденсаторе, T_1 – тот же период при пробном подключении конденсатора, T_2 – тот же период при пробном подключении высоковольтного конденсатора с известной ёмкостью C_{20} к высоковольтному выводу катушки зажигания.

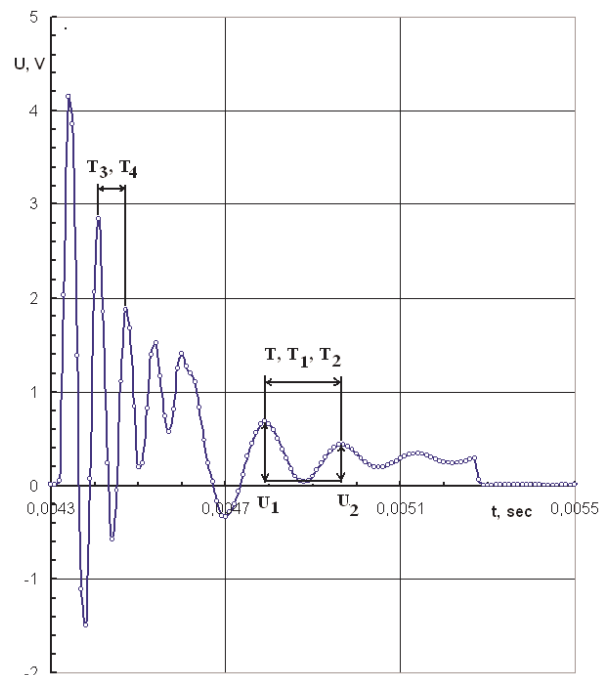


Рис. 4. Кривая напряжения на контактах прерывателя

При замыкании контактов прерывателя измеряется только постоянная времени T_3 , характеризующая динамику аperiodического процесса.

Исходная информация измеряется и обрабатывается соответствующей программой, и на основании программы реализующей восстановления дифференциальных уравнений (2) и решения нелинейной алгебраической системы (5) с дополнительными уравнениями, полученными методом пробных подключений, определяются следующие структурные параметры системы зажигания: $L_1, L_2, M, C_1, C_2, R_{\text{пш}}, K_m$ с погрешностями: $\sigma_{L1} = 5,9\%$, $\sigma_{L2} = 6,4\%$, $\sigma_M = 6,4\%$, $\sigma_{C1} = 6,6\%$, $\sigma_{C2} = 6,8\%$, $\sigma_{R_{\text{пш}}} = 6,1\%$, $\sigma_{K_m} = 6,3\%$.

Таким образом, предлагаемый метод и алгоритм диагностирования системы зажигания позволяют осуществлять постоянный контроль изменения величин структурных параметров и прогнозировать наступление отказов.

Литература

1. Эшби С.С. Системы и информация // За рубежом радиоэлектроника. 1964. № 5. С. 18-25.
2. Лузгин В.В., Данилов В.И., Шалобанов С.В. Методы активного диагностирования системы зажигания // Всесоюз. науч. конф. по диагностике и прогнозированию технического состояния подвижного состава автомобильного транспорта, 21-23 мая 1980 г.: тез. докл. и сообщений. Харьков, 1980. С. 69-70.
3. Лузгин В.В. Метод активного диагностирования устройств опережения зажигания // Организационные и технико-экономические проблемы регионального авторемонтного производства. Владивосток, 1981. С. 45-52.
4. Лузгин В.В., Панасов В.В. Алгоритмы идентификации промышленных объектов диагностики с учетом явлений запаздывания и нестационарности объектов // Тр. Брат. гос. ун-та. Сер. Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. Братск, 2007. Т. 2. С. 31-38.

УДК 621.865.8

С.Л. Витковский*, В.В. Лузгин

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ДИАГНОЗА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

В данной работе предлагается метод автоматизированного определения скоростной характеристики двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в режиме разгона на холостом ходу. В автоматическом режиме фиксируются частоты вращения коленчатого вала ДВС от времени в функции мощности и момента. Получены зависимости от частоты мощности и момента двигателя и проведено их сравнение с внешней скоростной характеристикой. В качестве основных диагностических параметров ДВС предлагается использовать коэффициенты снижения мощности и момента.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, диагностика, автоматизация.

Для формирования диагноза ДВС необходимо системное исследование ДВС как объекта диагностики. Основные характеристики, по анализу которых определяется состояние ДВС, являются статическими. Для увеличения глубины и достоверности формируемого диагноза ДВС необходимо исследовать его динамические характеристики. Например, при резком нажатии на педаль подачи топлива

свойства ДВС проявляются наиболее полно, что позволяет использовать разгон (быстрое увеличение частоты вращения коленчатого вала) на холостом ходу для формирования диагноза ДВС.

Увеличение частоты вращения коленчатого вала ДВС является процессом, потребляющим вырабатываемую им эффективную мощность. Запись процесса разгона выполня-

* - автор, с которым следует вести переписку.