

**Скорородов Илья Александрович** – e-mail: i.skorohodov@gmail.com; тел.: +7 (926)147-2940; аспирант.

**Tasenko Sergey Viktorovich** – Federal State budgetary establishment “Institute of Applied Geophysics”; e-mail: tasenko@mail.ru; 9, Rostokinskaya street, Moscow, 129128, Russia; phone: +79032422990; deputy director on science; cand. of eng. sc.

**Chyzenkov Valeriy Aleksandrovich** – e-mail: b1771@g2.ru; phone: +79168559299; dr. of phis.-math. sc.

**Shatov Pavel Viktorovich** – e-mail: p.v.shatov@mail.ru; phone: +79265820658; postgraduate student.

**Skorohodov Илья Александрович** – e-mail: i.skorohodov@gmail.com; phone: +79261472940; postgraduate student.

УДК 004.021:621.11

**В.И. Лачин, Д.А. Плотников**

**РЕАЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИЙ САМОДИАГНОСТИКИ  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ ВИБРАЦИИ**

*Рассмотрены способы диагностики основных элементов интеллектуальных датчиков. Предложен метод определения работоспособности интеллектуального датчика вибрации без демонтажа первичного преобразователя с объекта измерения и без вывода этого объекта из рабочего режима. Приведено теоретическое обоснование метода, описан алгоритм его реализации. Обоснована целесообразность использования метода при создании интеллектуальных датчиков вибрации для систем вибромониторинга роторных машин.*

*Интеллектуальный датчик; вибромониторинг; пьезоэлектрический акселерометр.*

**V.I. Lachin, D.A. Plotnikov**

**ANALYSIS OF THE SELF-TESTING FUNCTIONS IMPLEMENTATION  
FOR INTELLIGENT VIBRATION SENSORS**

*This article considers ways to diagnose the basic elements of smart sensors. It describes serviceability determining method for smart vibration sensor without accelerometer removal from maintenance object and in operating condition of this object. Article gives the theoretical basis of the method, describes the algorithm implementation. The usefulness of the method shown to create smart vibration sensors for rotary machines vibration monitoring systems.*

*Smart sensor; vibration monitoring; piezoelectric accelerometer.*

Термином «интеллектуальный датчик» (ИД) в настоящее время различные разработчики называют самые разнообразные устройства: от простейших, выполняющих аналоговое и последующее аналого-цифровое преобразование данных с целью передачи на следующий уровень измерительной системы, до более сложных, реализующих развитую обработку полученных данных с использованием численных методов. В данной статье указанным термином будем называть класс устройств, обеспечивающих выполнение следующего минимального набора функций: преобразование значений основных и дополнительных (при необходимости) измеряемых величин в электрические сигналы с последующим нормированием и аналого-цифровым преобразованием; выделение из полученной последовательности цифровых данных необходимых характеристик измеряемых величин (например, среднееквадратичное значение (СКЗ), амплитуды и фазы спектральных состав-

ляющих); корректировка температурных и временных погрешностей первичного преобразователя и аналоговых элементов ИД; передача результатов измерений и вычислений на следующий уровень измерительной системы; получение с более высокого уровня измерительной системы (или со специального оборудования) параметров конфигурации ИД и машинных кодов встроенного программного обеспечения (ПО); самодиагностика (в том числе диагностика первичного преобразователя). Функциональная схема аппаратных средств такого ИД приведена на рис. 1.

ИД вибрации (ИДВ) обычно выполняются в соответствии с приведённой функциональной схемой. В качестве ДОВ в большинстве случаев [1] используется пьезоэлектрический акселерометр (ПА), ДВВ (если используется) представляет собой датчик температуры.

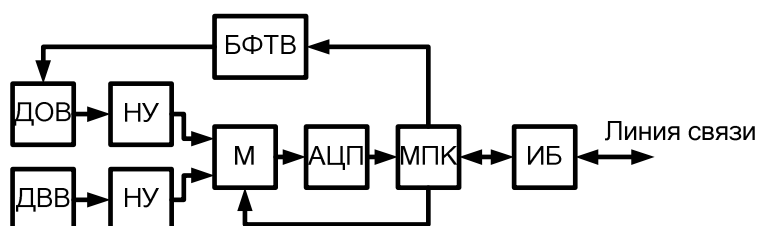


Рис. 1. Функциональная схема аппаратных средств интеллектуального датчика: ДОВ – датчик основной величины, ДВВ – датчик вспомогательной величины, НУ – нормирующие усилители, М – мультиплексор, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, МПК – микропроцессорный контроллер, ИБ – интерфейсный блок, БФТВ – блок формирования тестовых воздействий

В связи с тем, что реализация большей части перечисленных функций в ИДВ обычно не вызывает затруднений и описана в литературе, основное внимание в статье уделено функции самодиагностики. Для большинства элементов, входящих в состав ИДВ, применяются следующие хорошо зарекомендовавшие себя способы контроля работоспособности: использование сторожевого таймера с сигнализацией срабатывания; контроль выходных аналоговых и дискретных сигналов путём подключения их к дополнительным входам АЦП и портов ввода; оценка реакции программно-аппаратных средств блока на известные значения входных сигналов, в том числе на специально сформированные тестовые воздействия (например, при сквозном контроле работоспособности измерительного канала); применение алгоритмов проверки целостности данных. Работоспособность линии связи и ИБ обычно контролируется путём периодической передачи с ИДВ и проверки на более высоком уровне некоторого признака исправности. Отсутствие такого признака свидетельствует об отказе ИДВ или обрыве в линии.

Более сложно реализуется контроль отказов датчиков (ПА). Связано это с тем, что помимо неисправностей, выражающихся в полном отсутствии выходного сигнала, что достаточно легко выявляется диагностическими средствами, для них характерны неисправности другого типа, проявляющиеся в несоответствии выходного сигнала измеряемой величине. Кроме того, ИДВ зачастую используются на объектах, вывод которых из рабочего режима сопряжён с существенными материальными затратами. Примером такого объекта может служить турбоагрегат (ТА) электрической станции. В этих случаях желательно выполнять диагностику ПА в рабочем режиме объекта измерения.

Проанализируем известные способы контроля работоспособности ПА с точки зрения возможности их использования в ИДВ роторных машин и, в частности, ТА.

В литературе [1, 2, 3, 4, 5] отмечается, что одним из важных диагностических признаков ПА является частота установочного резонанса (УР), т.е. резонансная частота смонтированного на объекте измерения ПА. Отклонение значения этой частоты от нормы свидетельствует о неисправности датчика. Следовательно, контролируя частоту УР, можно сделать вывод о текущем состоянии ПА.

Так, в [4] для определения значения частоты УР ПА возбуждают синусоидальным сигналом с изменяющейся частотой, одновременно контролируя значение выходного напряжения датчика. Наличие резонанса чувствительного элемента ПА подтверждается ростом амплитуды контрольного сигнала и сдвигом его фазы на  $90^\circ$  относительно опорного сигнала. При выявлении указанных признаков частота опорного сигнала будет соответствовать частоте УР.

Ещё один способ определения частоты УР описан в [5]: в ПА возбуждают затухающие резонансные колебания путём воздействия на него импульсом напряжения, после чего измеряют частоту этих колебаний.

Оба способа позволяют с достаточной точностью определить значение частоты УР, однако им присущи некоторые недостатки. Первый способ предполагает необходимость использования генератора тестового гармонического сигнала с изменяющейся частотой, фильтров, позволяющих подавить составляющие выходного сигнала датчика, обусловленные вибрацией объекта измерения, а также измерителя частоты и фазы. Все эти компоненты заметно усложняют схему измерительного канала. Устройство, реализующее второй способ, схемотехнически проще, поскольку тестовый сигнал в нём формируется при помощи источника постоянного напряжения и ключа. Однако вибрация объекта измерения, особенно на частоте, близкой к верхней границе рабочего диапазона, может сделать измерение резонансной частоты невозможным, так как к полезному сигналу, представляющему собой затухающие колебания с частотой УР, добавится помеха, соответствующая вибрации контролируемого объекта. В подтверждение сказанного следует отметить, что ни в [4], ни в [5] не указана возможность применения описываемых способов для проверки ПА без вывода объекта измерения из рабочего режима.

Известно также описание способа [6], позволяющего совместить режим контроля работоспособности с рабочим режимом ПА. Цель достигается тем, что испытуемый акселерометр устанавливается на вибрирующем основании, в качестве входного сигнала, поступающего на акселерометр, используют известные характеристики вибраций основания, из суммарного выходного сигнала акселерометра выделяют при помощи фильтра ту составляющую, которая соответствует вибрациям, фиксируют ее и сравнивают с эталоном. Вывод о работоспособности датчика делается по степени соответствия фактического значения полученной составляющей ожидаемому значению. Очевидным недостатком этого способа является необходимость существенного усложнения конструкции датчика за счёт введения в неё механического возбудителя (вибрирующего основания).

Таким образом, известные из литературы способы невозможно или нецелесообразно применить в составе ИДВ для периодического контроля работоспособности ПА без его демонтажа с объекта измерения и без вывода этого объекта из рабочего режима. Следовательно, разработка таких способов является актуальной задачей.

С целью выяснения возможности определения частоты УР в рабочем режиме ПА рассмотрим устройство и принцип действия ПА наиболее распространённого типа [1, 2], показанного на рис. 2.

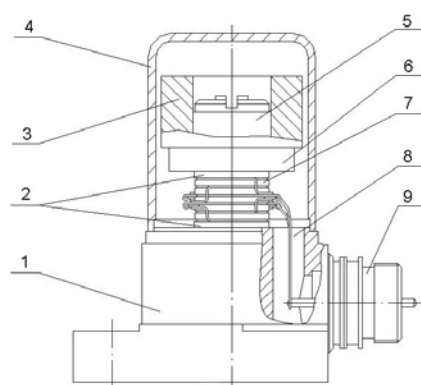


Рис. 2. Устройство пьезоэлектрического акселерометра

На основании 1 установлен блок пьезоэлементов 7, электрически изолированный от основания изоляционными шайбами 2 и прижатый к нему винтом 5. Этот же винт прижимает к блоку пьезоэлементов груз 6 с обоймой 3. Совокупность перечисленных компонентов представляет собой чувствительный элемент (ЧЭ) датчика. На основании установлен разъём 9, контакты которого проводниками 8 подключены к электродам пьезоэлементов. Крышка 4, приваренная к основанию, предохраняет ЧЭ от внешних воздействий.

Принцип действия ПА заключается в следующем. При перемещении основания 1 в вертикальном направлении с ускорением  $a$  на блок пьезоэлементов 7 со стороны груза 6 действует сила  $F = -ma$ , где  $m$  – суммарная масса груза и обоймы. Поскольку материал пьезоэлементов обладает некоторой упругостью, в соответствии с законом Гука под воздействием силы  $F$  они деформируются, что в результате прямого пьезоэффекта приводит к появлению на электродах пьезоэлементов электрического заряда  $q$ , пропорционального величине деформации и, следовательно, ускорению  $a$ .

Согласно [2] ПА, закреплённый на массивном основании, упрощённо может быть представлен в виде колебательной системы с одной степенью свободы (рис. 3).

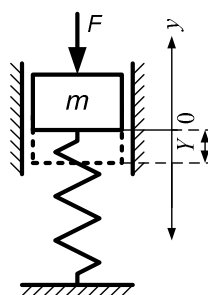


Рис. 3. Колебательная система с одной степенью свободы

Система состоит из груза массой  $m$  и невесомого упругого элемента, закреплённого на неподвижном основании и имеющего в направлении перемещения жёсткость  $c$ . Можно показать, что если под воздействием силы  $F$  груз сместится на величину  $Y$ , то в случае мгновенного прекращения действия силы при наличии демпфирования груз начнёт совершать затухающие колебательные движения, описываемые выражением

$$y = Y e^{-ht} \cos \left( t \sqrt{\frac{c}{m} - h^2} \right)$$

где  $y$  – координата груза в вертикальном направлении;

$t$  – время;

$h$  – коэффициент затухания (демпфирования).

В случае ПА частота этих колебаний будет практически соответствовать частоте УР [5]. Измеряя частоту колебаний и сравнивая её с номинальным значением, можно сделать вывод о работоспособности ПА. Приведённая модель ПА является весьма грубой, поскольку не учитывает массу пьезоэлемента, упругость груза, возможность перемещения груза в поперечном направлении и некоторые другие эффекты, однако она достаточно наглядно иллюстрирует предлагаемый метод.

Для возбуждения затухающих колебаний в описанной системе необходимо каким-либо образом сместить груз (деформировать упругий элемент). В случае ПА смещение может быть выполнено за счёт использования обратного пьезоэффекта, заключающегося в том, что пьезоэлемент деформируется при подаче на его электроды разности потенциалов (тестового импульса). Снятие разности потенциалов через некоторое время (после завершения переходного процесса, связанного с деформацией) будет эквивалентно прекращению действия силы  $F$  (рис. 3), в результате чего груз ЧЭ ПА начнёт совершать затухающие колебания. Под действием этих колебаний за счёт прямого пьезоэффекта на выводах ПА возникнет электрический заряд, пропорциональный мгновенному значению деформации пьезоэлемента (иными словами – координате  $y$  груза).

В идеальном случае изменение заряда выглядело бы так, как показано на рис. 4 ( $T_{\text{имп}}$  – время действия тестового импульса; масштаб времени для наглядности искажён, переходный процесс на вершине тестового импульса не показан). Регистрируя этот сигнал на выходе ПА и измеряя длительности полупериодов  $T_{\text{пп}}$  можно было бы определить текущее значение частоты УР. Однако на практике измерение  $T_{\text{пп}}$  затруднено двумя факторами.

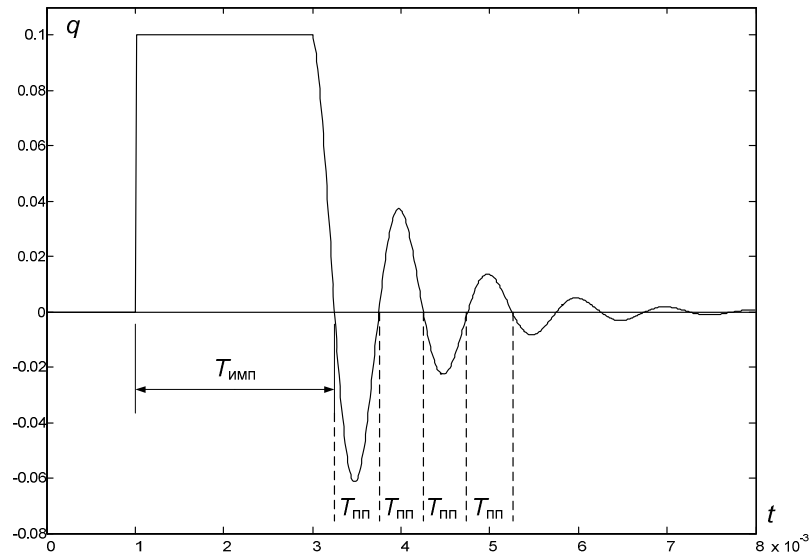


Рис. 4. Идеальный сигнал на выходе пьезоэлектрического акселерометра

Во-первых, после снятия тестового импульса заряд  $q$  на выходе ПА складывается из составляющей  $q_m$ , вызванной механическим колебательным процессом, и составляющей  $q_e$ , определяемой суммарной ёмкостью ЧЭ и соединительного кабеля, заряженной тестовым импульсом. Составляющая  $q_e$  затухает по экспоненциальному закону по мере разряда ёмкости ЧЭ и кабеля через входное сопротивление усилителя, однако её начальное значение намного превосходит по величине начальное значение составляющей  $q_m$  (рис. 5).

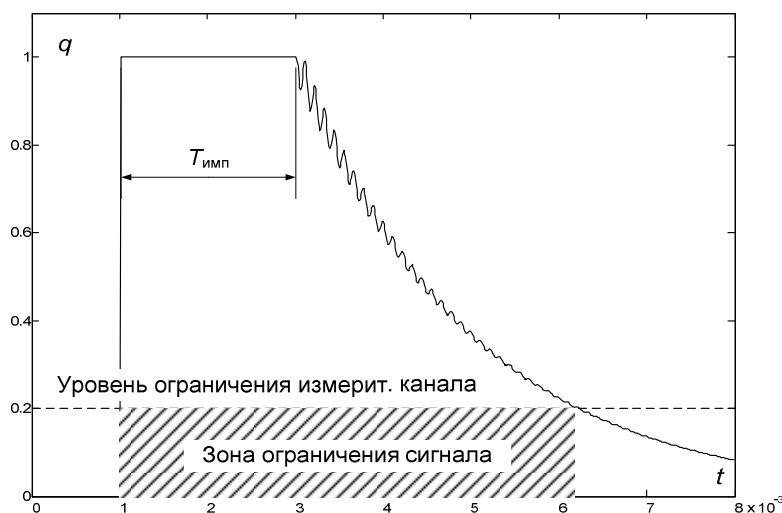


Рис. 5. Реальный сигнал на выходе пьезоэлектрического акселерометра

Теоретически имеется возможность выделения полезной составляющей  $q_m$  из суммарного сигнала, поскольку характер изменения составляющей  $q_e$  известен. Однако в реальности для возбуждения заметных механических колебаний ЧЭ к нему необходимо прикладывать существенную разность потенциалов. Заряд ёмкости ЧЭ и кабеля, вызванный этой разностью, значительно превосходит величину заряда, на регистрацию которой рассчитаны элементы канала измерения. Следовательно, после прекращения тестового импульса сигнал (последовательность кодов) на выходе АЦП регистратора в течение некоторого времени будет находиться в зоне ограничения. К моменту выхода из этой зоны полезная составляющая  $q_m$  затухает настолько, что её обработка становится невозможной. Очевидным решением проблемы является расширение динамического диапазона измерительного канала, но это приводит к неоправданному усложнению и удорожанию аппаратуры.

Во-вторых, даже при условии исключения каким-либо способом составляющей  $q_e$ , выходной сигнал будет содержать вынужденную составляющую  $q_v$ , обусловленную вибрацией объекта измерения (рис. 6). В таких условиях непосредственное определение длительностей полупериодов  $T_{\text{ПП}}$  составляющей  $q_m$  невозможно.

Для исключения составляющей  $q_e$  из выходного сигнала ПА в [5] описан способ, заключающийся в кратковременном (на время  $T_{\text{зам}}$ ) замыкании выходов ПА по окончании тестового импульса. Это приведёт к практически мгновенному разряду ёмкости ЧЭ и кабеля, в то время как на механический колебательный процесс такое замыкание в силу его малой продолжительности не повлияет. В результате после размыкания выходов ПА заряд на них будет определяться только механическим колебательным процессом (рис. 7) и соответствовать составляющей  $q_m$  (при отсутствии вибрации объекта измерения).

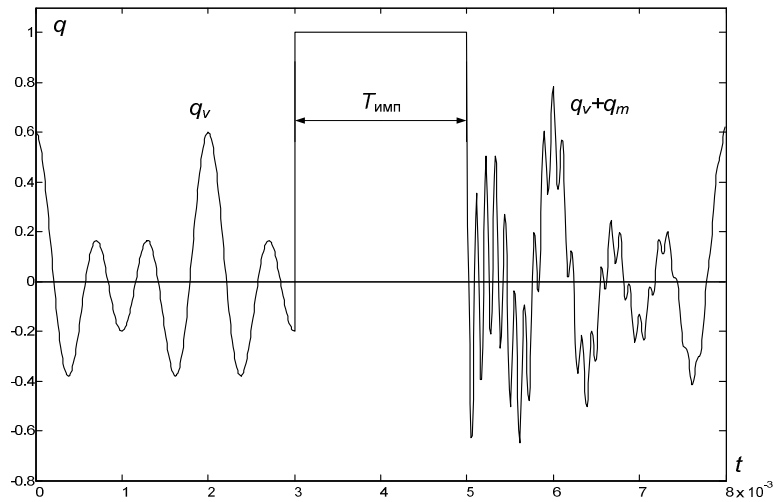


Рис. 6. Реальный сигнал на выходе пьезоэлектрического акселерометра (с вынужденной составляющей)

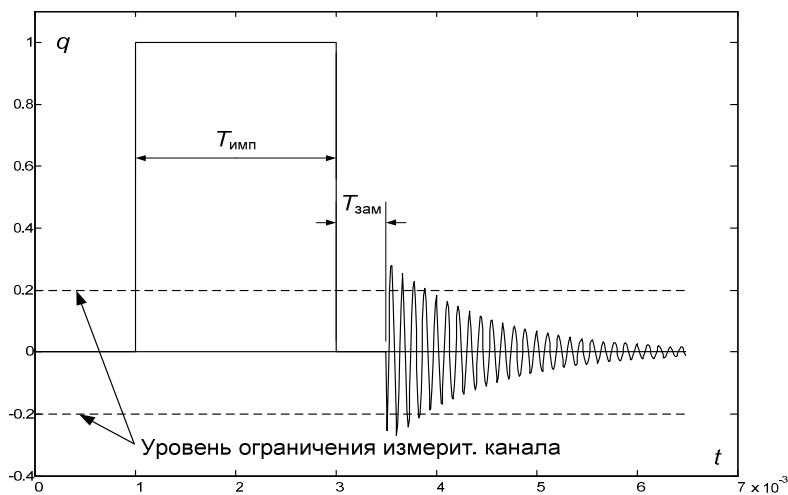


Рис. 7. Реальный сигнал на выходе пьезоэлектрического акселерометра (с использованием кратковременного замыкания выводов)

Однако при наличии вынужденной составляющей  $q_v$ , способ [5] не обеспечит получение сигнала, пригодного для непосредственного измерения частоты УР (см. рис. 6).

Метод определения работоспособности ПА на работающем оборудовании, предложенный авторами и реализованный ими в защищённом патентом РФ [7] устройстве, лишён указанного недостатка и позволяет исключить вынужденную составляющую  $q_v$  из выходного сигнала ПА.

Возможность исключения вынужденной составляющей основана на предположениях о периодическом характере её изменения и неизменности частоты и формы в течение нескольких периодов. Первое предположение объясняется тем, что вибрация элементов ТА имеет периодический характер [1]. Второе предположение сделано исходя из того, что частота вращения ротора ТА, который является

весьма инерционным элементом, не может существенно измениться за время 100...200 мс, т.е. за несколько периодов основной гармонической составляющей вибрации ТА (50 Гц). Форма вынужденной составляющей за это время заметно изменится лишь в случае изменения режима работы ТА или при внезапном возникновении дефекта. В этом случае результат измерения частоты УР окажется некорректным, однако предложенный метод позволяет выявлять такие ситуации, возникающие достаточно редко.

Для исключения вынужденной составляющей необходимо до формирования тестового импульса определить её период и запомнить форму нескольких последовательных периодов. По окончании тестового импульса сохранённая вынужденная составляющая вычитается из сигнала, содержащего сумму вынужденной  $q_v$  и свободной  $q_m$  составляющих. Если составляющая  $q_v$  к моменту окончания измерения изменилась несущественно, то результат вычитания будет соответствовать свободной составляющей  $q_m$ .

Реализация метода определения работоспособности ПА на работающем оборудовании состоит из двух этапов: подготовительного и основного. На подготовительном этапе заведомо исправный ПА монтируется на объекте эксплуатации, после чего определяется его частота УР. Это значение принимается в качестве номинального. На основном этапе (в процессе работы ТА) текущее значение частоты УР с заданной периодичностью измеряется и сравнивается с номинальным значением. В случае, если величина отклонения превысит заданное допустимое значение, диагностируется отказ.

Для измерения частоты УР в рабочем режиме объекта эксплуатации как на основном, так и на подготовительном этапах используется метод, алгоритм реализации которого поясняется графиками, изображёнными на рис. 8.

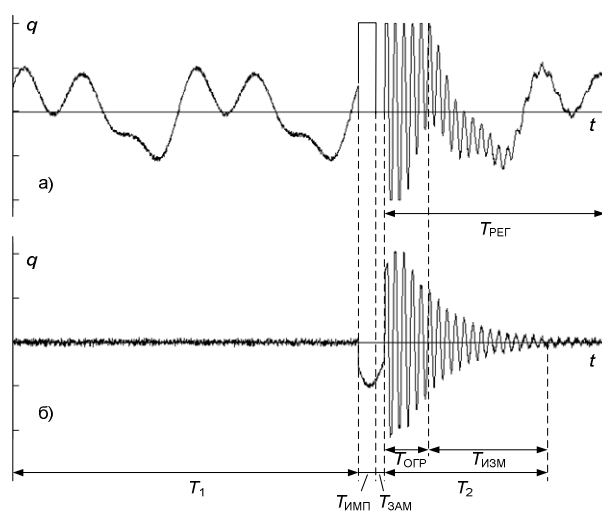


Рис. 8. Этапы обработки сигнала с целью измерения частоты установочного резонанса пьезоэлектрического акселерометра

В некоторый момент времени, определяемый необходимой периодичностью контроля работоспособности, начинается процесс измерения частоты УР. В течение времени  $T_1$  (см. рис. 8) выполняется регистрация (запоминание) последовательности  $\{x_j\}$  мгновенных значений вынужденной составляющей  $q_v$ . При этом значение  $T_1$  выбирается с таким расчётом, чтобы оно в несколько раз превосходило предполагаемую длительность периода  $T_0$  вынужденной составляющей.



После того, как последовательность  $\{x_j\}$  сохранена, предпринимается попытка определения её периода  $T_0$  и амплитуды  $A$ . Если период определён успешно, то выполняется переход к этапу формирования тестового импульса. Если же значение  $T_0$  определить не удалось (например, из-за низкого уровня сигнала или высокого уровня помех), то значение амплитуды  $A$  сравнивается с минимальным значением  $A_{MIN}$ . Величина  $A_{MIN}$  задаёт уровень вынужденной составляющей, до которого влияние этой составляющей на переходный процесс пренебрежимо мало. В том случае, если  $A < A_{MIN}$ , считается, что вынужденная составляющая отсутствует и её можно не учитывать. При этом для дальнейшей нормальной работы алгоритма период  $T_0$  принимается равным некоторой величине  $T_{DEF}$  – например, 20 мс, что соответствует номинальной частоте вращения ротора ТА 3 000 об/мин. Ситуация, когда период последовательности  $\{x_j\}$  определить не удалось, а её амплитуда превышает  $A_{MIN}$ , возникает при недопустимом уровне помех или резком изменении частоты вращения ротора ТА. В этом случае цикл измерения прерывается и регистрируется ошибка.

После того, как значение  $T_0$  определено, на базе последовательности  $\{x_j\}$  формируется более короткая последовательность  $\{s_i\}$ , соответствующая одному периоду вынужденной составляющей. Если ранее было установлено, что амплитуда вынужденной составляющей пренебрежимо мала ( $A < A_{MIN}$ ), то  $\{s_i\}$  заполняется нулевыми значениями. Далее формируется тестовый импульс, как было описано ранее (см. рис. 8:  $T_{ИМП}$ ,  $T_{ЗАМ}$ ), после чего в течение некоторого времени  $T_{РЕГ}$  регистрируется последовательность мгновенных значений виброускорения  $\{x'_j\}$ , соответствующая реакции ПА на импульс (рис. 8,а). Величина  $T_{РЕГ}$  выбирается в процессе адаптации алгоритма к конкретному типу ПА и амплитуде тестового импульса таким образом, чтобы за время  $T_{РЕГ}$  переходный процесс в ПА практически затух.

По истечении времени  $T_{РЕГ}$  выполняется исключение вынужденной составляющей из последовательностей  $\{x_j\}$  (до тестового импульса) и  $\{x'_j\}$  (после тестового импульса) путём вычитания из них последовательности  $\{s_i\}$ . Полученная в результате последовательность  $\{q_i\}$  будет содержать только свободную составляющую переходного процесса  $q_m$ , пригодную для определения частоты УР (рис. 8,б, интервал  $T_2$ ). Последовательность  $\{z_j\}$  после исключения вынужденной составляющей на интервале  $T_1$  в идеальном случае должна содержать только нулевые значения. В действительности же её значения отличаются от нуля и соответствуют сумме случайных помех и составляющих входного сигнала с частотой, не кратной частоте основной гармоники (рис. 8,б, интервал  $T_1$ ). Анализируя параметры этой последовательности, можно определить уровень помех, не исключённых из  $\{z_j\}$  и, предположительно, из  $\{q_i\}$  (т.е. из свободной составляющей). С использованием полученного значения, в частности, определяется длительность интервала  $T_2$  (рис. 8,а), на котором анализируется свободная составляющая.

Получив последовательность значений свободной составляющей переходного процесса  $\{q_i\}$ , выявляют моменты изменения знака этой последовательности (моменты перехода через «0»)  $t_1, t_2, \dots, t_m$ . Выявление переходов выполняется до тех пор, пока уровень сигнала не станет сопоставим с уровнем помех, полученным ранее из последовательности  $\{z_j\}$ . Затем вычисляется значение частоты УР  $f_0$  по формуле

$$f_0 = \frac{0.5}{\frac{1}{m-1} \sum_{i=2}^m (t_i - t_{i-1})}$$

где  $m$  – число выявленных переходов через «0».

Рассмотрим преимущества и недостатки предложенного метода диагностики ПА.

Первое преимущество заключается в отсутствии высоких требований к вычислительной мощности и объёму памяти МПК, реализующего метод. Это связано

с тем, что путём несложной модификации описанного алгоритма можно избежать необходимости хранения в памяти последовательностей мгновенных значений сигнала  $\{x_j\}$ , и  $\{x'_j\}$  – достаточно сохранить только последовательность  $\{s_i\}$ . При этом получение значений  $\{s_i\}$ , исключение вынужденной составляющей, выявление переходов через «0» и вычисление длительностей полупериодов будет выполняться «на лету», т.е. по мере поступления очередных кодов с АЦП. Подобный алгоритм в числе прочих был реализован авторами в устройстве на базе восьмиразрядного контроллера PIC16F877A, имеющего всего 386 байтов ОЗУ.

Второе преимущество состоит в возможности исключения вынужденной составляющей, частота которой близка к частоте УР (в предельном случае частоты могут быть даже равны). Такая возможность не обеспечивается традиционными методами (например, фильтрацией).

Третье преимущество заключается в высокой скорости диагностики. Это важно, поскольку при использовании данного метода (как и других, упомянутых в статье) во время диагностики ПА не может выполнять свои основные функции. Тестовый импульс и переходный процесс, вызванный им, имеют суммарную продолжительность около 20 мс, т.е. примерно один период колебаний с частотой 50 Гц. Потеря значений сигнала в течение одного периода обычно не является критической для работы ИДВ. Кроме того, при необходимости фрагмент сигнала, искажённый тестовым импульсом и переходным процессом, может быть программно заменён предварительно сохранённой последовательностью  $\{s_i\}$ .

Основной недостаток метода состоит в том, что с его помощью можно определить частоту УР только для ПА, измеряющих вибрацию с явно выраженным периодическим характером. Все составляющие вибрации с частотой, не кратной частоте основной гармоники, а также имеющие случайный характер, воспринимаются как помехи и искажают результат измерения. Кроме того, метод не позволяет диагностировать такие неисправности, как изменение коэффициента передачи ПА или НУ (например, под воздействием высокой температуры или с течением времени). В следующей статье авторами будет представлен метод, лишённый этого недостатка.

Сопоставляя преимущества и недостатки рассмотренного метода можно сделать вывод, что его целесообразно использовать в ИДВ элементов ТА, выполненных на основе универсальных микропроцессорных контроллеров с ограниченными вычислительными ресурсами.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин / А.С. Гольдин. – М.: Машиностроение, 1999. – 344 с.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Т. 7: В 2 кн. Кн. 1: Метод акустической эмиссии / Кн. 2 Вибродиагностика / Под общ. ред. чл.-корр. РАН В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2005. – 829 с.
3. Accelerometers and Conditioning – Product Catalogue January 2009 / Brüel&Kjær, 2009. – 80 p.
4. Пат. 1382118 Рос. Федерация, МПК G01H1/06. Устройство для дистанционного контроля пьезодатчиков / Кузь К.А., Серебряный Ф.М., Сергеев К.И., Столяров Ю.Г. – 4082382/10; заявл. 1.07.86; опубл. 10.05.95.
5. Пат. 2150708 Рос. Федерация, МПК G01P21/00, G01P15/09. Способ электрического возбуждения резонансных колебаний пьезоэлектрического акселерометра и устройство для его осуществления / Субботин М.И. – 99100835/28; заявл. 21.01.99; опубл. 10.06.00.
6. Пат. 2078346 Рос. Федерация, МПК G01P21/00. Способ проверки работоспособности акселерометра / Булдакова Т.И., Невлев А.Ю., Ковадлин М.Ш., Суятинов С.И. – 4836140/28; заявл. 6.04.90; опубл. 27.04.97.
7. Пат. 99182 Рос. Федерация, МПК G01P15/09. Устройство дистанционного измерения резонансной частоты пьезоэлектрического акселерометра / Д.А. Плотников, А.К. Малина, В.И. Лачин. – № 2010118405/28; заявлено 6.05.10, опубл. 10.11.10, Бюл. №31. – 2 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Р. Гайдук.

**Лачин Вячеслав Иванович** – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)» в г. Новочеркаске; e-mail: lachinv@mail.ru; 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132; тел.: 88635255297; кафедра «Автоматика и телемеханика»; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

**Плотников Дмитрий Александрович** – e-mail: dpl@novoch.ru; кафедра «Автоматика и телемеханика»; старший преподаватель; к.т.н.

**Lachin Vyacheslav Ivanovich** – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education «South-Russian State Technical University (Novocherkassk Polytechnic Institute)»; e-mail: lachinv@mail.ru; 132, Prosvescheniya street, Novocherkassk, 346428, Russia; phone: +78635255297; chair “Automation and Telemechanics”; head of the chair; dr. of eng. sc.; professor.

**Plotnikov Dmitry Aleksandrovich** – e-mail: dpl@novoch.ru; phone: +78635255297; chair “Automation and Telemechanics”; senior lecturer; cand. of eng. sc.

УДК 629.113

**М.А. Береснев, А.Л. Береснев**

#### **МЕТОД L-ВАРИАЦИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВС ПРИ РАБОТЕ НА БИНАРНОМ ТОПЛИВЕ**

*Рассмотрена задача управления двигателем внутреннего сгорания при использовании смеси бензина и сжиженного углеводородного газа в качестве топлива. Предложен метод управления ДВС, который на основании математической модели крутящего момента двигателя определяет угол опережения зажигания и состав топлива (соотношение бензин/сжиженный газ) в зависимости от потребностей водителя и внешних условий. Разработана схема регулирования состава топлива для различных режимов работы. Проведены эксперименты, продемонстрировавшие увеличение крутящего момента и мощности двигателя по сравнению с известными методами управления ДВС как при работе на бинарном топливе, так и на чистом бензине или сжиженном газе.*

*Двигатель внутреннего сгорания; бинарное топливо; метод управления.*

**M.A. Beresnev, A.L. Beresnev**

#### **L-VARIATIONS METHOD FOR CONTROL OF IC ENGINE RUNNING ON BINARY FUEL**

*Authors consider a task of internal combustion engine control when running on mixture of gasoline and liquefied petroleum gas as a fuel. The proposed IC engine control method uses torque mathematical model to calculate ignition advance angle and fuel composition (gasoline/liquefied gas ratio) depending on driver's demands and external conditions. Scheme for regulation of fuel composition for various operating modes was developed. Experiments proved predicted increase of engine torque and power, comparing to known methods not only for engine, running fuel mixture, but also for pure gasoline and liquefied petroleum gas.*

*Internal combustion engine; binary fuel; control method.*

Вопросам использования альтернативных топлив для улучшения эксплуатационных, экологических и технических характеристик бензиновых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) посвящено множество теоретических и экспериментальных исследований, как в нашей стране, так и за рубежом. Установлено, что помимо преимуществ, их использование связано и с какими-либо недостатками. Например, применение широко распространенного в России сжиженного газа вме-