

ное влияние применением лазерных когерентных и квантовых технологий в растениеводстве и животноводстве;

- рассмотрение предложений и осуществление отбора инновационных проектов, имеющих приоритетное значение для реализации стратегической программы «Фотоника в сельском хозяйстве и природопользовании».

ВЫВОДЫ

1. «Дорожная карта» и стратегическая программа технологической платформы «Фотоника» являются содержательными документами, определяющими основные направления инновационного развития аграрного производства. Их изучение и анализ дают опережающее представление о перспективах совершенствования и применения технологий точного земледелия, растениеводства и животноводства.
2. Организациям заинтересованным в сотрудничестве с технологической платформой «Фотоника» очень важно установить постоянный творческий контакт с инициативной рабочей группой «Фотоника в сельском хозяйстве и природопользовании» и присылать свои предложения, уточнения, достигнутые результаты и технико-технологические решения по применению лазерных, оптических и оптоэлектронных технологий, приборов и оборудования в сельском хозяйстве.

ОПТИМИЗАЦИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ ТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМОЙ

Добролюбов И., д.т.н., проф., Савченко О.Ф., к.т.н., с.н.с.
*ФГБНУ Сибирский физико-технический институт аграрных
проблем, Новосибирск, РФ*

Диагностирование двигателей внутреннего сгорания (ДВС) с помощью измерительной экспертной системы двигателей (ИЭСД) [1,2] проводится с практическим применением методов анализа сигналов рабочих процессов ДВС, полученным в результате проводимых в СибФТИ многолетних исследований. Это позволило обосновать требования к функциональным возможностям и структуре ИЭСД, разработать ее информационное, алгоритмическое и программное обеспечение и создать информационную технологию диагностирования ДВС. Однако многообразие решаемых задач при

осуществлении экспертизы технического состояния для обеспечения работоспособности ДВС в процессе его эксплуатации требует совершенствования ИЭСД, решения оптимизационных задач по структуре, параметрам, методам анализа сигналов.

Как известно, работа ДВС характеризуется случайностью процессов подачи топлива и его сгорания от цикла к циклу, а также процессов трения в сопряжениях ДВС, вызывающих случайные отклонения сигналов, например, угловых скорости и ускорения коленчатого вала $\omega(t)$ и $\varepsilon(t)$ от их средних значений. Это приводит к необходимости рассматривать измеряемые процессы как аддитивную смесь полезного информативного (диагностического) случайного процесса и детерминированной составляющей, вызванной неуравновешенными составляющими крутящего момента. Кроме того, возникает необходимость оценить некоторые структурные параметры двигателя, диагностические признаки которых слабо проявляются на фоне других детерминированных и случайных процессов. Например, превышающие допустимый уровень такие ресурсные структурные параметры как износы, жесткость рабочего процесса, люфты и др. (в значительной степени нелинейные элементы) отражаются диагностическими признаками (сигналами), значение которых существенно ниже уровня измеряемых аддитивных и мультипликативных сигналов. Обнаружить и измерить такие признаки, даже при предварительном вычитании из результирующего сигнала зависимостей, известных для данного двигателя и отражающих другие структурные параметры, бывает достаточно сложно.

В связи с этим становится актуальной задача исследования и обоснования оптимального метода обнаружения структурных параметров ДВС, скрытых в высоком уровне других составляющих рабочих процессов для повышения эффективности идентификации технического состояния ДВС в эксплуатационных условиях с применением ИЭСД. Для этого целесообразно использование известных вероятностных методов анализа сигналов, статистических методов оптимальной обработки сигналов на фоне помех [.

Статистическая задача измерения параметров объекта экспертизы (ОЭ) состоит в том, чтобы на основании измеренного значения вектор-столбца $\vec{x}(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)\}$, полученного при усреднении M реализаций (повторности) $x(t)$ и априорной плотно-

сти распределения вероятностей (ПРВ) $f(\vec{\alpha})$ измеряемого вектора $\vec{\alpha} = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$ информативных диагностических признаков получить оценку $\vec{\alpha}^*$.

Сигнал, использующийся для обнаружения и измерения указанных признаков [9]:

$$\vec{x}(t) = A\vec{u}_c(t, \vec{\alpha}, \vec{\beta}) + \vec{u}_n(t, \vec{\gamma}),$$

где A - дискретный случайный параметр, принимающий два значения: $A_0=0$ и $A_1=1$, что соответствует условиям отсутствия и наличия полезного сигнала $\vec{u}_c(t, \vec{\alpha}, \vec{\beta})$, отражающего диагностируемые признаки; $\vec{\beta} = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m\}$ - неинформативные параметры; $\vec{u}_n(t, \vec{\gamma})$ - помеха, вызванная разбросом параметров рабочих процессов двигателя; $\vec{\gamma} = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_l\}$ - параметры помехи.

При дискретизации каждая реализация $x_i(t)$ ($i = \overline{1, M}$) состоит из L отсчетов. Общее число отсчетов (дискрет) $m=LM$. Решение при обнаружении и измерении сигнала принимается по m -мерному вектор-столбцу $\vec{x}(t)$.

Оценка $\vec{\alpha}^*$ должна быть оптимальной, т. е. удовлетворять критерию минимума среднего риска (для квадратичной функции риска это эквивалентно требованию минимума средней квадратичной погрешности измерений [8,10]):

$$\begin{aligned} \bar{r} = M\{r\} &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} r(\vec{\alpha}^*, \vec{\alpha}) f(\vec{\alpha}^*, \vec{\alpha}) d\vec{\alpha}^* d\vec{\alpha} = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} d\vec{x} \int_{-\infty}^{+\infty} r(\vec{\alpha}^*, \vec{\alpha}) f(\vec{x}) f(\vec{\alpha}|\vec{x}) d\vec{\alpha} = \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{r}(\vec{\alpha}^*|\vec{x}) f(\vec{x}) d\vec{x} \rightarrow \\ &= \min \end{aligned} \quad (1)$$

где $\bar{r}(\vec{\alpha}^*|\vec{x}) = \int_{-\infty}^{+\infty} r(\vec{\alpha}^*, \vec{\alpha}) f(\vec{\alpha}|\vec{x}) d\vec{\alpha}$ - условный средний риск.

Для каждого измеренного значения $\vec{x}(t)$ дается вполне определенная оценка $\vec{\alpha}^* = \vec{\alpha}(u_c)$. В выражении (1) ПРВ $f(\vec{x})$ процесса $\vec{x}(t)$ является заданной функцией и не может принимать отрицательных значений. Поэтому минимум подынтегрального выражения (1) достигается при $\bar{r}(\vec{\alpha}^*|\vec{x}) \rightarrow \min$.

Апостериорная ПРВ $f(\vec{\alpha}^*|\vec{x}) = k_x f(\vec{\alpha}) f(\vec{x}|\vec{\alpha})$, где $k_x = 1/f(\vec{x})$ - коэффициент, не зависящий от $\vec{\alpha}$. Из условия нормировки

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(\vec{\alpha}|\vec{x})d\vec{\alpha} = 1; k_{\vec{x}} = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} f(\vec{\alpha})f(\vec{x}|\vec{\alpha})d\vec{\alpha} \right]^{-1}.$$

Кривая апостериорной ПРВ $f(\vec{\alpha}|\vec{x})$ уже априорной ПРВ $f(\vec{\alpha})$.
Условное отношение правдоподобия

$$l(\vec{x}|\vec{\alpha}) = f(\vec{x}|\vec{\alpha}) / f_n(\vec{x}),$$

где $f_n(\vec{x})$ - ПРВ помехи.

Тогда имеем

$$f(\vec{\alpha}|\vec{x}) = k_u f(\vec{\alpha})l(\vec{x}|\vec{\alpha}),$$

где $k_u = \frac{f_r(\vec{x})}{f(\vec{x})} = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} f(\vec{\alpha})l(\vec{x}|\vec{\alpha})d\vec{\alpha} \right]^{-1};$

$$\ln f(\vec{\alpha}|\vec{x}) = \ln[f(\vec{\alpha})] + \ln[l(\vec{x}|\vec{\alpha})] + const.$$

При квадратичной функции риска для векторного и скалярного параметров условный средний риск:

$$\bar{r}(\vec{\alpha}^*|\vec{x}) = \int_{\vec{\alpha}} (\vec{\alpha}^* - \vec{\alpha})^T \|B\| (\vec{\alpha}^* - \vec{\alpha}) f(\vec{\alpha}|\vec{x}) d\vec{\alpha};$$

$$\bar{r}(\alpha^*|x) = \int_{-\infty}^{+\infty} (\alpha^* - \alpha)^2 f(\alpha|x) d\alpha. \quad (2)$$

Минимум (2) при симметричной неособенной матрице веса $\|B\|$, характеризующей важность того или иного признака α , обеспечивается для векторного и скалярного параметров при

$$\vec{\alpha}_{opt}^* = M\{\vec{\alpha}|\vec{x}\} = \int_{-\infty}^{+\infty} \vec{\alpha} f(\vec{\alpha}|\vec{x}) d\vec{\alpha};$$

$$\alpha_{opt}^* = M\{\alpha|\vec{x}\} =$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \alpha f(\alpha|\vec{x}) d\alpha / \int_{-\infty}^{+\infty} f(\alpha|\vec{x}) d\alpha = \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha f(\alpha|\vec{x}) d\alpha \quad (3)$$

где $M\{\dots\}$ – математическое ожидание.

При этом условный средний риск и средний риск погрешности измерения для скалярного параметра α_{opt}^* равны [8–10]:

$$\bar{r}(\alpha^*|\vec{x}) = \int_{-\infty}^{+\infty} (\alpha - M\{\alpha|\vec{x}\})^2 f(\alpha|\vec{x}) d\alpha = D\{\alpha|\vec{x}\}; \quad (4)$$

$$\bar{r} = \int_{-\infty}^{+\infty} D\{\alpha|\vec{x}\} f(\vec{x}) d\vec{x};$$

где $D\{\dots\}$ – дисперсия.

Зависимость $\bar{r}$ в (4) характеризует минимальное значение среднего квадрата погрешности измерения, которое обеспечивается условием для $\bar{r}(\alpha^*|\vec{x})$ в (4). Выполнение этого условия для любого значения x устанавливает, что оценка параметра α^* не имеет систематической погрешности: $M\{\alpha^* - \alpha\} = M\{(\alpha^* - \alpha)|\vec{x}\} = 0$.

Допустимо полагать, что зависимость $f(\vec{a}|\vec{x})$ для процессов двигателя симметричная и унимодальная. Тогда оценки (3) и (4) совпадают с оценкой по критерию максимума апостериорной ПРВ.

Рассмотрим определение оптимальной оценки амплитуды углового ускорения коленчатого вала u_c , измеренной в угловом интервале работы данного цилиндра в цикле, являющейся одним из информативных параметров, отражающих рабочий процесс каждого цилиндра ДВС.

Априорную ПРВ этого скалярного параметра $\alpha = u_c$ полагаем имеющей равномерное, а помехи - нормальное распределение (рис. 1, а):

$$f(u_c) = \frac{1}{(u_{c2} - u_{c1})}, \quad \text{где } u_{c1} < u_c < u_{c2};$$

$$f(u_c) = 0, \quad \text{где } u_c < u_{c1}, u_c > u_{c2}.$$

Условная ПРВ одномерного сигнала $f(x|u_c)$ в функции неизвестного значения u_c (рис. 1, а):

$$f(x|u_c) = f_n(x - u_c) = (1/\sqrt{2\pi\sigma_n}) \exp[-(x - u_c)^2 / 2\sigma_n^2],$$

где σ_n – среднее квадратическое значение помехи.

На рис. 1, а представлена также кривая апостериорной ПРВ $f(u_c|x)$, полученная в результате перемножения кривых $f(u_c)$ и $f(x|u_c)$ с учетом нормирующего множителя k_x . Площадь под этой кривой равна единице. Кривая $f(u_c|x)$ учитывает как результат измерения x , так и априорные данные о возможных значениях измеряемой величины сигнала u_c и помехи. Существенное влияние на апостериорную ПРВ $f(u_c|x)$ оказывает уровень помех (рис. 1, б, в). При экспертизе многоцилиндровых двигателей наблюдается значительное перекрытие измеренного углового ускорения контролируемого цилиндра угловыми ускорениями соседних в цикле цилиндров, а также при идентификации нелинейностей: зазоров, сухого трения, зоны нечувствительности, уровень сигналов нелинейностей существенно ниже сигналов от работающих цилиндров. В этих случаях измерения проводятся в условиях очень сильной помехи, при этом центр тяжести кривой апостериорной ПРВ и оптимальная оценка равны $(u_{c1} + u_{c2})/2$ независимо от измеренного значения x (рис. 1, в). Наоборот, для случая слабой гауссовой помехи (например, при экспертизе четырехцилиндровых двигателей) оптимальная оценка равна измеренному значению, так как в этом случае x соответствует центру тяжести кривой апостериорной ПРВ (рис. 1, б).

Для симметричных выпуклых кривых ПРВ центр тяжести всегда совпадает с максимумом кривой. Поэтому вместо $\alpha_{opt} = u_{c\ opt}$ в качестве оптимальной оценки можно использовать абсциссу максимума кривой апостериорной ПРВ $f(u_c|x)$, т. е. наиболее вероятную оценку. Для слабых гауссовых помех, так как σ_n не зависит от x , показатели качества измерения $\alpha^* = u_c^*$:

$$\bar{r}(\alpha^*|x) = D\{\alpha|x\} = \sigma_n^2; \quad \bar{r} = \sigma_n^2.$$

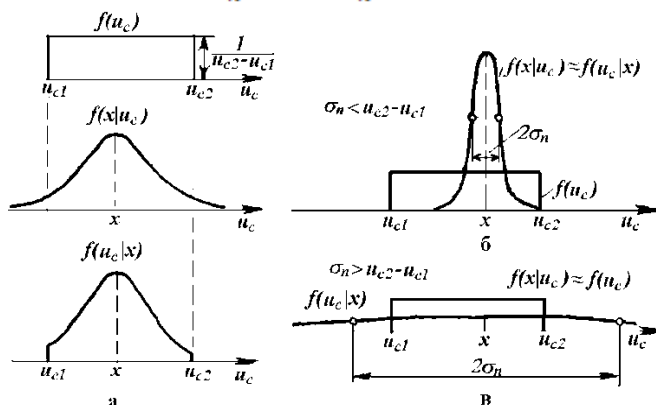


Рис. 1. Зависимости плотностей распределения вероятностей: формирование апостериорной ПРВ (а); б - ПРВ для слабой (б) и сильной помех (в)

Для сильных помех дисперсия апостериорной ПРВ совпадает с дисперсией априорной ПРВ, а ее значение также не зависит от x :

$$\bar{r} = \bar{r}(\alpha_{opt}^* | x) = D\{\alpha | x\} = D\{\alpha\};$$

$$D\{\alpha\} = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \alpha^2 \frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1} d\alpha - \left[\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \alpha \frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1} d\alpha \right]^2 = \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)^2}{12},$$

где $\alpha_2 - \alpha_1 = u_{c2} - u_{c1}$.

Оптимальная средняя квадратичная погрешность измерения при изменении помехи от очень сильной до слабой изменяется в $\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\sigma_n \sqrt{12}} = \frac{u_{c2} - u_{c1}}{\sigma_n \sqrt{12}}$ раз.

Если априорная ПРВ параметра $\alpha = u_c$ неизвестна, то из-за множества влияющих параметров одномерную апостериорную ПРВ

можно считать нормальной, дисперсия σ_α^2 погрешностей точечной оценки скалярного параметра $\alpha=u_c$:

$$f(\alpha|\vec{x}) = 1/\sqrt{2\pi\sigma_\alpha^2} \exp[-(\alpha - \alpha^*)^2/2\sigma_\alpha^2];$$

$$\sigma_\alpha^2 = \left| \frac{d^2}{d\alpha^2} \ln l(\vec{x}|\alpha^*) \right|^{-1}.$$

Вероятность попадания истинного значения $\alpha=u_c$ в интервал $l=2k\sigma_\alpha$:

$$P_0 = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^k e^{-t^2/2} dt.$$

Например, при $P_0=0,9$ значение $k=l/2\sigma_\alpha=1,64$; $l=2k\sigma_\alpha=3,28\sigma_\alpha$.

Таким образом, на основе методов статистической обработки сигналов рассмотрено применение оптимального метода обнаружения структурных параметров ДВС, скрытых в высоком уровне других составляющих рабочих процессов.

Показано, что оценка измеряемых информативных параметров сигналов будет оптимальной, если выполняется требование минимума средней квадратичной погрешности измерений этих параметров, которое эквивалентно критерию минимума среднего риска.

Проанализировано оптимальное определение в условиях слабой и сильной помех амплитуды углового ускорения коленчатого вала, измеренной в угловом интервале работы данного цилиндра в цикле. Установлено, что для случая слабой гауссовой помехи (например, при экспертизе четырехцилиндровых двигателей) оптимальная оценка равна измеренному значению, так как в этом случае измеренный процесс соответствует центру тяжести кривой апостериорной плотности распределения вероятностей. Поэтому целесообразно применение накопителей сигналов и выделение сигналов на фоне помех с помощью фильтрации. При этом необходимо, по возможности, использовать в качестве пороговых (опорных) значений полученные ранее априорные статистические характеристики и параметры, отражающие различные классы состояний ДВС (номинальный, допустимый, предаварийный, аварийный).

В результате применение оптимального определения параметров ДВС на фоне помех статистическими методами позволяет сформировать наиболее эффективную структурную схему измерительного блока ИЭСД для определения технического состояния ДВС.

Литература

1. Савченко О.Ф., Добролюбов И.П., Альт В.В. Особенности и принципы построения экспертной системы оценки состояния ДВС//Современные методы, средства измерений и автоматизации для исследований физических процессов в сельском хозяйстве / РАСХН.– Сиб. отд-ние. – СибФТИ. – Новосибирск, 1993.– С. 59–73.
2. Добролюбов И.П., Савченко О.Ф., Альт В.В. Измерительная экспертная система для определения технического состояния двигателей внутреннего сгорания// Приборы и системы управления: № 12. – 1998. – С. 56–59.

СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАСКАДНОГО РЕЖИМА УПРАВЛЕНИЯ НАСОСАМИ СТАНЦИИ ПЕРВОГО ПОДЕМА ВОДЫ

Якубовская Е.С., Кунац Е.А.

*УО «Белорусский государственный аграрный технический
университет», г. Минск, РБ*

Для водоснабжения сельских потребителей используют одно- и двухступенчатые схемы насосных установок [1, с. 545]. Во втором случае вода из скважины либо открытого источника подается в накопительный резервуар. А затем центробежные насосы второго подъема создают регулируемое давление, под которым вода подается потребителям. На станции первого подъема воды должна быть обеспечена автоматизированная работа насосов для забора воды и ее хранение в резервуарах-накопителях. В функции системы автоматизации таких станций входит [2]: автоматическое поддержание заданных технологических параметров: уровня в приемных резервуарах-накопителях, расхода воды в системе, давления в трубах; плавный запуск насосов, выбор очередности включения двигателей насосов при каскадном режиме управления; управление задвижками после насосов и перед/после резервуаров-накопителей; контроль давления после насосов и на выходе системы; возможность принудительного запуска всех насосов по внешнему сигналу; автоматизированный учет расхода электроэнергии и воды; защита от несанкционированного изменения настроек рабочих параметров, ведение архивов технологических параметров, событий, аварий и создание отчетов.