# ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АВТОМОБИЛЯ

СЕРГЕЕВ А. Г.*

Кафедра Автомобилей Будапештского Технического Университета

Поступило 15. 6. 1975. г.

Представлено проф. З. ЛЕВАИ

## Постановка задачи

В настоящее время, в условиях повышения требований к техническому состоянию автомобилей при широком использовании диагностических средств, перед работниками автомобильного транспорта стоит принципиально новая задача — повысить эффективность самих диагностических комплексов. Данная задача во многом определяется уровнем метрологического обеспечения диагностических операций: метрологическими показателями самого метода диагностирования и точностными характеристиками инструментальных средств. При этом метрологические характеристики процесса диагностирования конкретного элемента (узла, агрегата, системы) автомобиля должны выбираться, исходя из его долговечности или величины прогнозируемого пробега.

В соответствии с изложенным в настоящей работе предлагается метод оценки точности диагностирования с учетом метрологических показателей средств измерения при заданной точности прогнозирования технического состояния элементов автомобиля.

Точность прогнозирования характеризуется точностью измерения диагностического параметра, выбираемой из условий заданного прогнозируемого пробега. Например, для узлов, обеспечивающих безопасность движения, прогнозируемый пробег составляет 200—500 км; для остальных узлов этот пробег равен периодичности диагностирования в соответствии с установленной технологией (от 1700 до 14 000 км).

Точность измерения определяется методической и произведенной относительной погрешностью (классом точности инструментальных средств) измерений диагностических параметров.

Диагностический параметр характеризует прямо или косвенно количественное проявление одного или нескольких структурных (первичных, формирующих) параметров, а именно ,технологических допусков на изготовление, геометрических размеров, физико-химических свойств и т. д.

Ниже рассмотрим поставленную задачу в теоретическом и прикладном аспектах.

* Автор был участником научных исследований кафедры по данной теме.

## Теоретические предпосылки

Исходя из очевидного предположения, что точность $\delta_{пр}$ прогнозирования технического состояния элемента автомобиля по результатам диагностики зависит от величины прогнозируемого пробега $L$, методической погрешности $\delta_М$ и точности $\delta_И$ инструментальных средств, получим функциональную связь между этими показателями

$$\delta_{пр} = f(L, \delta_М, \delta_И) . \tag{1}$$

Величины $\delta_М$ и $\delta_И$ определяются целесообразной точностью измерения диагностических и структурных параметров на данном пробеге.

В общем случае (при косвенных измерениях), точность $\delta_g$ измерения диагностического параметра зависит от точности регистрации структурных $\delta_c$ параметров

$$\delta_g = f(\delta_{c1}, \delta_{c2}, \ldots, d_{cn}) . \tag{2}$$

В процессе эксплуатации автомобиля все структурные параметры (кроме исходных технологических, например, начального зазора, определяемого допусками на изготовление сопряжения типа «вал-отверстие») изменяются с определенной интенсивностью (темпом). Под темпом $V$ изменения следует понимать интенсивность износа сопряженных пар, интенсивность накопления усталостных повреждений или микротрещин, скорость изменения электромагнитных характеристик и т. п. Если величина $V = \text{var}$, то в качестве расчетного необходимо выбирать среднее $V_{cp}$ значение интенсивности изменения параметра.

Тогда на прогнозируемом пробеге $L$ фактическая величина изменения структурного $(\Delta a_c)_L$ и диагностического $(\Delta a_g)_L$ параметров составит

$$(\Delta a_c)_L = V^c_{cp} \cdot L; \quad (\Delta a_g)_L = V^g_{cp} \cdot L . \tag{3}$$

Очевидно, что величина $(\Delta a_c)_L$, например, физически является абсолютной погрешностью структурного параметра $a_c$ на заданном пробеге. Поэтому, зная предельное эксплуатационное значение $[a_c]$ этого параметра, можно определить приведенную относительную погрешность $\delta_c$ (точность структурного параметра) в рассматриваемый момент времени

$$\delta_c = \frac{(a_C)_L - [(a_C)_L \pm (\Delta a_C)_L]}{[a_C]} = \pm \frac{(\Delta a_C)_L}{[a_C]} . \tag{4}$$

Изменения структурных параметров оказывают различное влияние на процесс формирования диагностического сигнала. Это влияние $S_i$ зависит от вида функциональной связи

$$a_g = f(a_{c1}, a_{c2}, \ldots, a_{cn}) . \tag{5}$$

Располагая уравнениями (5) для различных узлов и агрегатов автомобиля, коэффициенты влияния можно определить [1] как

$$S_{ci} = \frac{\partial a_g}{\partial a_{ci}} \cdot \frac{a_{ci}}{a_g} . \tag{6}$$

Учитывая многообразие связей между различными параметрами автомобиля, в табл. 1 приведены значения $S_i$ для различного вида функциональных зависимостей.

Изложенное показывает, что точность регистрации $\delta_g$ диагностического параметра является функцией $S_{ci}$ и $\delta_{ci}$. Действительно, пусть взаимосвязь между диагностическим $a_g$ и структурными параметрами задана в виде (5).

Используя разложение в ряд Тейлора, абсолютная погрешность будет

$$\Delta a_g = \sqrt{\left(\frac{\partial a_g}{\partial a_{c1}}\right)^2 \Delta a_{c1}^2 + \left(\frac{\partial a_g}{\partial a_{c2}}\right)^2 \Delta a_{c2}^2 + \ldots + \left(\frac{\partial a_g}{\partial a_{cn}}\right)^2 \Delta a_{cn}^2} , \tag{7}$$

а относительная

$$\delta_g = \frac{\Delta a_g}{a_g} = \sqrt{\left(\frac{\partial a_g}{\partial a_{c1}}\right)^2 \frac{\Delta a_{c1}^2}{a_g^2} + \left(\frac{\partial a_g}{\partial a_{c2}}\right)^2 \frac{\Delta a_{c2}^2}{a_g^2} + \ldots + \left(\frac{\partial a_g}{\partial a_{cn}}\right)^2 \frac{\Delta a_{cn}^2}{a_g^2}} . \tag{8}$$

Преобразуем подкоренные члены (8) с учетом (6) как

$$\left(\frac{\partial a_g}{\partial a_{ci}}\right)^2 \frac{\Delta a_{ci}^2}{a_g^2} = \left(\frac{\partial a_g}{\partial a_{ci}}\right)^2 \frac{\Delta a_{ci}^2}{a_g^2} \cdot \frac{a_{ci}^2}{a_{ci}^2} = \left[\left(\frac{\partial a_g}{\partial a_{ci}}\right)^2 \frac{a_{ci}^2}{a_g^2}\right] \frac{\Delta a_{ci}^2}{a_{ci}^2} = S_{ci}^2 \delta_{ci}^2 . \tag{9}$$

Окончательно

$$\delta_g = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (S_{ci}^2 \cdot \delta_{ci}^2)} . \tag{10}$$

Значения $\delta_g$ для различного вида функциональных связей сведены также в табл. 1.

Поскольку точность регистрации диагностического параметра выбрана из условий прогнозируемого пробега, то целесообразная точность прогнозирования $\delta_{пр}$ будет, соответственно, равна $\delta_g$.

Оценив точность прогнозирования $\delta_{пр}$, необходимо выбрать точность $\delta_И$ инструментальных средств, поскольку погрешность регистрации диагно-

**Таблица I**

| №№ п/п | Функциональная связь, $a_g = f(a_{c1}, a_{c2} \ldots)$ | Коэффициент влияния, $S_i$ | Приведенная относительная погрешность, $\delta_g$ |
|---|---|---|---|
| 1 | $a_{c1}$ | $S_{c1} = 1$ | $S_{c1} \cdot \delta_{c1}$ |
| 2 | $na_{c1}$, $n = \text{const}$ | $S_{c1} = 1$ | $S_{c1} \cdot \delta_{c1}$ |
| 3 | $a_{c1}^n$, $n = \text{const}$ | $S_{c1} = n$ | $S_{c1} \cdot \delta_{c1}$ |
| 4 | $\ln a_{c1}$ | $S_{c1} = 1/\ln a_{c1}$ | $S_{c1} \cdot \delta_{c1}$ |
| 5 | $n^{a_{c1}}$, $n = \text{const}$ | $S_{c1} = a_{c1} \ln n$ | $S_{c1} \cdot \delta_{c1}$ |
| 6 | $\sin a_{c1}$ | $S_{c1} = a_{c1} \operatorname{ctg} a_{c1}$ | $S_{c1} \cdot \delta_{c1}$ |
| 7 | $\cos a_{c1}$ | $S_{c1} = a_{c1} \operatorname{tg} a_{c1}$ | $S_{c1} \cdot \delta_{c1}$ |
| 8 | $\operatorname{tg} a_{c1}$ | $S_{c1} = 2a_{c1}/\sin 2a_{c1}$ | $S_{c1} \cdot \delta_{c1}$ |
| 9 | $\operatorname{ctg} a_{c1}$ | $S_{c1} = -2a_{c1}/\sin 2a_{c1}$ | $S_{c1} \cdot \delta_{c1}$ |
| 10 | $e^{\left(\frac{a_{c1}}{n}\right)}$, $n = \text{const}$ | $S_{c1} = a_{c1}/n$ | $S_{c1} \cdot \delta_{c1}$ |
| 11 | $a_{c1} \pm a_{c2} \pm \ldots$ | $S_{c1} = \dfrac{a_{c1}}{a_{c1} \pm a_{c2} \pm \ldots}$; $S_{c2} = \dfrac{a_{c2}}{a_{c1} \pm a_{c2} \pm \ldots}$ | $\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (S_{ci} \cdot \delta_{ci})^2}$ |
| 12 | $a_{c1} \cdot a_{c2} \ldots$ | $S_{c1} = S_{c2} = \ldots = 1$ | $\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (S_{ci} \cdot \delta_{ci})^2}$ |
| 13 | $a_{c1}^{\gamma} \cdot a_{c2}^{\beta} \cdot a_{c3}^{\gamma} \cdot \ldots$ $\alpha = \text{const}$; $\beta = \text{const}$, $\gamma = \text{const}$ | $S_{c1} = \alpha$; $S_{c2} = \beta$; $S_{c3} = \gamma$ | $\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (S_{ci} \cdot \delta_{ci})^2}$ |
| 14 | $a_{c1}/a_{c2}$ | $S_{c1} = S_{c2} = 1$ | $\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (S_{ci} \cdot \delta_{ci})^2}$ |
| 15 | $a_{c1}(a_{c2} \pm a_{c3})$ | $S_{c1} = 1$; $S_{c2} = \dfrac{a_{c2}}{a_{c2} \pm a_{c3}}$; $S_{c3} = \dfrac{a_{c3}}{a_{c2} \pm a_{c3}}$ | $\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (S_{ci} \cdot \delta_{ci})^2}$ |

стического параметра определяется методической $\delta_М$ и инструментальной $\delta_И$ составляющими

$$\delta_g = \delta_М + \delta_И . \tag{11}$$

Для этого рассмотрим процесс передачи диагностической информации по структурной цепочке звеньев, обладающих определенной информационной пропускной способностью.

В общем случае, в указанную цепочку звеньев входит объект, датчик, преобразователь и регистратор диагностического сигнала. У конкретных узлов автомобиля некоторые из этих звеньев могут быть совмещены (объект-датчик, датчик-преобразователь и т. д.) или отсутствовать как элемент. Например, при виброакустической диагностике двигателя, коробки передач, заднего моста все эти звенья присутствуют. При диагностике же системы регулирования или зажигания роль датчиков выполняют электрические сигналы данных систем.

В соответствии с теорией информации [2] количество информации I, получаемое от элемента измерительной цепи, имеющей пропускную способность $R$ и точность $\delta_И$, не может превысить величины

$$I = \log_2 \left( \frac{50}{\delta_И} \right), \quad \text{bit} . \tag{12}$$

Кроме того, в зависимости от пропускной способности звеньев измерительной цепи, в последней могут возникнуть следующие ситуации:

1. Пропускная способность $R_{n-1}$ предыдущего звена больше пропускной способности $R_n$ последующего, т. е. $R_{n-1} > R_n$ — случай фильтрации сигнала;
2. $R_{n-1} < R_n$ — структурная избыточность;
3. $R_{n-1} = R_n$ — структурное соответствие.

Очевидно, что в первом случае имеет место потеря информации, во втором — недоиспользование возможностей предыдущего звена и наиболее благоприятным является случай структурного соответствия.

Требование структурного соответствия пропускной способности сопряженных звеньев измерительной цепи позволяет более корректно ставить вопрос о необходимой точности измерительной диагностической аппаратуры.

Рассмотрим данный вопрос в свете основных положений теории информации.

Погрешность изметирельного устройства эквивалентна квантованию измеряемого значения параметра по уровню с интервалом $m$ [3]. Тогда энтропия квантованного сигнала $H_K$ при нормальном законе распределения ошибок измерения $H(a) = \sigma_a \log_2 \sqrt{2\pi e}$ можно определить как

$$H_K = H(a) - \log_2 l_a , \tag{13}$$

где $\sigma_a$ — среднеквадратическое значение ошибки измерения; $l_a = \delta_g$ — разрешающая способность измерительного устройства (шаг квантования) — величина, характеризующая ошибку измерения.

Шаг квантования связан с абсолютной погрешностью измерения соотношением [3]

$$l_a = 2\Delta a . \tag{14}$$

Поскольку при нормальном законе $l_a = 6\sigma_a/m$, то

$$m = \frac{2a_{\max}}{\delta_g} = \frac{a_{\max}}{\Delta a} .$$

Учитывая уравнения (13) и (14), число уровней квантования составит $m = 1/\delta_g$, а энтропия

$$H_K = \log_2 \frac{\sqrt{2\pi e}}{6\delta_g}. \qquad (15)$$

Тогда, если величину $l_a$ представить в процентном отношении к значению $a_{max}$, принятому за 100%, энтропия

$$H_K = \log_2 \frac{50\sqrt{2\pi e}}{3\delta_g}. \qquad (16)$$

Исходя из условия структурного соответствия и используя (12) и (16), получим

$$\frac{50\sqrt{2\pi e}}{3\delta_g} = \frac{50}{\delta_И}.$$

Откуда приведенная относительная погрешность измерительного прибора

$$\delta_И = \frac{3\delta_g}{\sqrt{2\pi e}} = 0{,}725\ \delta_g. \qquad (17)$$

Таким образом, для обеспечения необходимой точности прогнозирования относительная приведенная погрешность инструментальных средств диагностики должна быть на 25—30%, ниже, чем найденное ранее значение $\delta_g$.

Рассмотренные теоретические предпосылки позволяют научно обоснованно назначать точность измерительных средств диагностики при прогнозировании технического состояния отдельных элементов автомобиля.

## Практическое использование методики

Определим точность измерения зазора в шкворневом соединении при диагностировании переднего моста автомобиля ГАЗ-24 «Волга».

Исходные данные:

по заводским чертежам диаметр шкворня в мм составляет $20^{-0{,}020}_{-0{,}033}$, а диаметр втулки цапфы — $20^{+0{,}020}_{-0{,}020}$.

из условий эксплуатации допустимый зазор шкворень-втулка [а] = 0,75 мм средняя интенсивность износа шкворня $V_m$ = 0,021 мм/10 000 км, а втулки — $V_b$ = 0,008 мм/10 000 км; углубленное диагностирование переднего моста осуществляется при ТО-2, т. е. прогнозирование необходимо осуществлять на пробег, равный примерно 10 000 км.

Диагностическим параметром рассматриваемого сопряжения является зазор между шкворнем и втулкой цапфы. Тогда

$$(\Delta a)_L = a_H + (\Delta a_m)_L + (\Delta a_b)_L ,$$

где $(\Delta a_m)_L$, $(\Delta a_b)_L$ — износы шкворня и втулки за пробег $L$; $a_H$ — начальный зазор, определяемый технологией изготовления деталей.

Поскольку по условиям технологических допусков $a_{H\max} = 0{,}053$ мм, а $a_{H\min} = 0$,
то на пробеге $L = 10\,000$ км рассматриваемый зазор будет находиться в пределах

$$(\Delta a)_{\max} = 0{,}053 + 0{,}008 + 0{,}021 = 0{,}082 \text{ mm} ;$$

$$(\Delta a)_{\min} = 0{,}008 + 0{,}021 = 0{,}029 \text{ mm}.$$

При допустимом эксплуатационном изменении зазора $[a] = 0{,}75$ мм на долю износа сопряжения шкворень-втулка приходится $0{,}75 - 0{,}053 = 0{,}697$ мм при наличии $a_{H\max}$, а при $a_{H\min}$ — весь допустимый зазор 0,75 мм.

Учитывая, что $V_m/V_b = 2{,}62$, в рассматриваемых случаях предельный износ втулки составит $[a_b]_{\min} = \dfrac{0{,}697}{0{,}362} = 0{,}192$ мм, а шкворня — $[a_m]_{\min} = 0{,}192 \cdot 2{,}62 = 0{,}504$ мм.

Соответственно, $[a_b]_{\max} = \dfrac{0{,}75}{3{,}62} = 0{,}207$ мм, $[a_m]_{\max} = 0{,}543$ мм.

Тогда относительная приведенная погрешность на заданном пробеге составит:

при $a_{H\max}$ $\quad \delta_b = \dfrac{0{,}008}{0{,}192} = 0{,}041 ; \quad \delta_m = \dfrac{0{,}021}{0{,}504} = 0{,}041 .$

при $a_{H\min}$ $\quad \delta_b = \dfrac{0{,}008}{0{,}207} = 0{,}039 ; \quad \delta_m = \dfrac{0{,}021}{0{,}543} = 0{,}039 .$

Коэффициенты влияния, соответственно, по правилу II табл. 1

при $a_{H\max}$ $\quad S_b = \dfrac{0{,}192}{0{,}75} = 0{,}256 ; \quad S_m = \dfrac{0{,}504}{0{,}75} = 0{,}67 .$

при $a_{H\min}$ $\quad S_b = \dfrac{0{,}207}{0{,}75} = 0{,}276 ; \quad S_m = \dfrac{0{,}543}{0{,}75} = 0{,}72 .$

Тогда относительная приведенная погрешность метода измерения не должна превышать величины:

при $a_{H\max}$ $\quad \delta_g = 0{,}041 \cdot 0{,}256 + 0{,}041 \cdot 0{,}67 = 0{,}038;$

при $a_{H\min}$ $\quad \delta_g = 0{,}039 \cdot 0{,}276 + 0{,}039 \cdot 0{,}72 = 0{,}038.$

Таким образом, если в качестве диагностического параметра используется зазор в сопряжении шкворень-втулка, то для прогнозирования технического состояния передней подвески автомобиля ГАЗ-24 на пробег 10 000 км погрешность измерительного прибора в соответствии с формулой (17) составит

$$\delta_И = 0{,}038 \cdot 0{,}725 \cdot 100 = 2{,}7\% .$$

То есть для практических целей диагностирование вполне достаточно осуществлять приборами класса точности не выше 2,5. В этом случае погрешность измерения не превысит требуемые 3,8%.

Рассмотренный пример показывает, что для функции II Табл. 1 которой подчиняется подавляющее количество взаимосвязей между отдельными параметрами автомобиля, значение $\delta_g$ не зависит от перераспределений структурных параметров, формирующих диагностическим целям.

Действительно, при $V_{cp} = \text{const}$ на заданном прогнозируемом пробеге

$$\delta_i S_i = \frac{(\Delta a_i)_L}{[a_i]} \cdot \frac{[a_i]}{[a]} = \frac{(\Delta a_i)_L}{[a]} \equiv \text{const} .$$

Этот вывод имеет важное практическое значение, т. к. позволяет, определив $\delta_i$ и $S_i$ только в одном режиме диагностирования, найти $\delta_g$, которое будет постоянным для диагностируемого объекта на указанном пробеге.


## Резюме

1. Выявлена взаимосвязь между точностью диагностирования и точностью прогнозирования технического состояния автомобиля.

2. Доказана возможность априорной оценки точности инструментальных средств диагностики в соответствии со схемой измерения диагностического параметра.

3. Теоретически и практически обоснована зависимость точности прогнозирования технического состояния элементов автомобиля от функциональной связи между структурными и диагностическими параметрами.


## Литература


1. Розенвассер Е. Н., Юсупов Р. М.: Чувствительность систем автоматического управления. «Энергия», М., 1969
2. Шеннон К.: Работы по теории информации и кибернетике. Издательство иностранной литературы. М., 1963
3. Селезнев Ю. В., Рыжков Г. П.: Сб. трудов ВПИ № 5, 1970



А. Г. Сергеев Владимир-26 Ул. Горького 87
Политехнический Институт
Кафедра автомобильного транспорта
СССР