

УДК 662.74 : 658.56 : 539.1.074.2 : 621.39.11

А. М. Онищенко

(Люберцы Московской обл.)

ДИАГНОСТИКА И АВТОМАТИЧЕСКАЯ ГРАДУИРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Описаны особенности восьми типов линейной градуировки между двумя сигналами, по которым определяется значение контролируемого параметра. Показано, что градуировочная характеристика должна проходить через центры эллипсов равной плотности вероятности рассеивания сигналов при различных, но постоянных в пределах каждого эллипса значениях контролируемого параметра. Диагностика работы системы осуществляется индикацией рассеивания пар сигналов вокруг градуировочной характеристики. Автоматическая градуировка выполняется периодически методом группировки по измеренным сигналам в каждой из трех одинаковых групп. В результате измерительная система всегда работает по последней установленной градуировочной характеристике.

В работе [1] впервые описан новый подход к резкому повышению точности путем использования пары коррелированных друг с другом сигналов X_1 и X_2 для определения по ним значения C контролируемого параметра. В наиболее простом благоприятном случае спроецированная на плоскость X_1OX_2 градуировочная характеристика в виде зависимости C от X_1 и X_2 является линейной регрессионной зависимостью

$$X_2 - a - bX_1 = 0, \quad (1)$$

когда с увеличением (уменьшением) C сигналы X_1 и X_2 одновременно увеличиваются (уменьшаются). Совместные флуктуации сигналов при $C = \text{const}$ вызваны многими соизмеримыми по степени влияющего действия причинами и факторами и поэтому происходят по нормальному закону [1]. В работе [1] обоснованы условия обеспечения минимальной погрешности определения C по паре измеренных сигналов X_1 и X_2 , выведены алгоритмы определения C и погрешности этого определения. До настоящего времени оставались нерешенными задачи диагностики работоспособности и автоматической градуировки любых измерительных систем в процессе их работы без остановки и применения специальных эталонных образцов.

В настоящей статье (в продолжение наших работ по повышению точности путем корректного учета стохастических связей между сигналами и выбора наиболее информативных сигналов [1, 2]) излагается решение задач диагностики состояния и автоматической градуировки измерительных систем контроля качества продукции непосредственно в транспортных технологических потоках.

Виды линейной градуировки. Если выбраны наиболее информативные сигналы X_1 и X_2 , распределенные по нормальному закону, то предварительную градуировку измерительной системы проводят на анализируемом материале конкретного предприятия. Для нескольких (например, четырех) значений C , по возможности равномерно заполняющих диапазон измерения, готовят по n проб ($n \geq 10$) с $C = \text{const}$ и произвольно варьируемыми неконтролируемыми параметрами материала и в каждой пробе измеряют сигналы X_1 и X_2 . Для каждой группы проб с $C = \text{const}$ определяют средние значения сигналов

$(\bar{X}_{11}, \bar{X}_{21}), (\bar{X}_{12}, \bar{X}_{22}), (\bar{X}_{13}, \bar{X}_{23}), (\bar{X}_{14}, \bar{X}_{24})$. По результатам измерений, например, методом наименьших квадратов определяют значения углового коэффициента b и свободного члена a уравнения линейной регрессии:

$$b = \left[10 \sum_{i=1}^{10} \bar{X}_{1i} \bar{X}_{2i} - \sum_{i=1}^{10} \bar{X}_{1i} \sum_{i=1}^{10} \bar{X}_{2i} \right] \left[10 \sum_{i=1}^{10} (\bar{X}_{1i})^2 - \left(\sum_{i=1}^{10} \bar{X}_{1i} \right)^2 \right]^{-1}, \quad (2)$$

$$a = \left[\sum_{i=1}^{10} \bar{X}_{2i} \sum_{i=1}^{10} (\bar{X}_{1i})^2 - \sum_{i=1}^{10} \bar{X}_{1i} \sum_{i=1}^{10} \bar{X}_{1i} \bar{X}_{2i} \right] \left[10 \sum_{i=1}^{10} (\bar{X}_{1i})^2 - \left(\sum_{i=1}^{10} \bar{X}_{1i} \right)^2 \right]^{-1}.$$

Каждой точке линейной регрессии по формуле (1) соответствует определенное значение контролируемого параметра C .

В рассматриваемом случае линейной регрессии (1) и совместных флуктуаций X_1 и X_2 по двумерному нормальному закону при любом постоянном значении C могут иметь место восемь основных возможных градуировок. На рис. 1 представлены первые четыре вида градуировки, общим признаком которых является постоянная вдоль градуировочной характеристики ширина полосы погрешностей (на рисунке полосы погрешностей ограничены штриховыми линиями). Полосы погрешностей вызваны колебаниями не коррелированных с C флуктуаций остатков сигналов X_1 и X_2 .

Градуировка I соответствует случаю, когда эллипсы равной плотности вероятности рассеивания сигналов \mathcal{E}_{11} при любом постоянном значении C одинаковы по величине, большие оси эллипсов перпендикулярны градуиро-

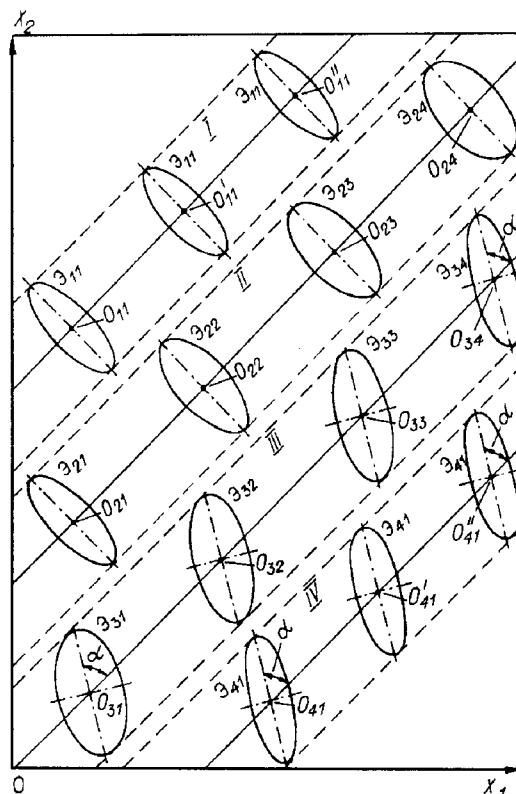


Рис. 1. Виды линейных двумерных градуировочных характеристик с одинаковыми полосами погрешностей и разными наклонами эллипсов равной плотности вероятности рассеивания остатков сигналов при постоянном значении контролируемого параметра

вочной характеристике, все центры эллипсов O_{11} , O'_{11} и O''_{11} лежат на градуировочной характеристике и связаны со значениями контролируемого параметра C_1 , C'_1 и C''_1 . Градуировка II отличается от I разной степенью линейной стохастической связи между остатками сигналов X_1 и X_2 при различных значениях C : с ростом X_1 и X_2 коэффициент корреляции r между не коррелированными с C остатками сигналов уменьшается, о чем свидетельствует последовательное уменьшение эксцентриситета от эллипса \mathcal{E}_{21} до эллипса \mathcal{E}_{24} . Градуировка III отличается от II острым углом наклона при $\alpha = 60^\circ$ эллипсов к градуировочной характеристике и убывающим коэффициентом корреляции r с уменьшением значений сигналов X_1 и X_2 . Градуировка IV отличается от I только углом наклона при $\alpha = 60^\circ$.

На рис. 2 представлены четыре вида градуировочных характеристик V—VIII, общим признаком которых является изменяющаяся вдоль градуировочной характеристики ширина полосы погрешностей (полосы погрешностей ограничены штриховыми линиями). Градуировка V соответствует случаю, когда с уменьшением X_1 и X_2 увеличивается коэффициент корреляции между не коррелированными с C остатками сигналов X_1 и X_2 так, что большие оси эллипсов равной плотности вероятности рассеивания сигналов увеличиваются от \mathcal{E}_{51} до \mathcal{E}_{53} , а малые оси эллипсов остаются постоянными, причем большие оси всех эллипсов перпендикулярны градуировочной прямой $O_{51}O_{53}$. В градуировке VI с ростом X_1 и X_2 увеличивается ширина полосы погрешностей и остается постоянным эксцентриситет эллипсов рассеивания сигналов при $C = \text{const}$, которые перпендикулярны градуировочной характеристике $O_{61}O_{64}$. Градуировочная характеристика вида VII отличается линейным уменьшением ширины полосы погрешностей вдоль градуировочной прямой $O_{71}O_{74}$, наклоном больших осей эллипсов под углом $\alpha = 60^\circ$ к градуировочной харак-

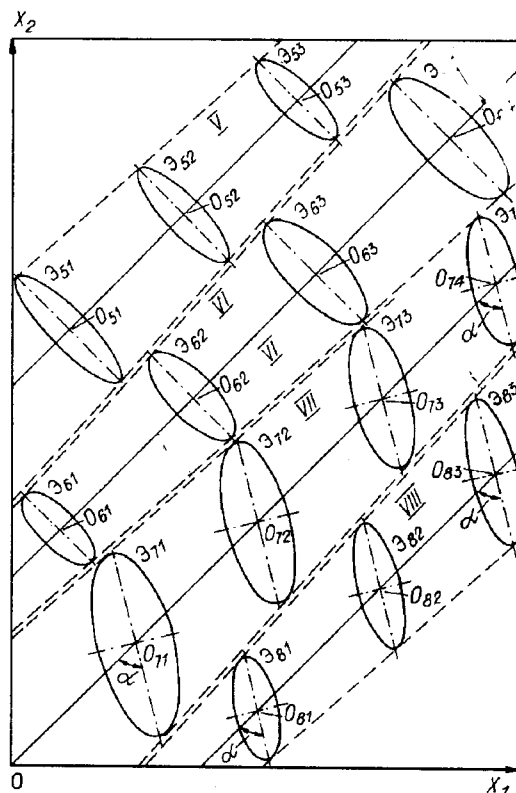


Рис. 2. Виды линейных градуировочных характеристик с неодинаковыми полосами погрешностей и с разными наклонами эллипсов к градуировочной характеристике

теристике и постоянным эксцентриситетом эллипсов. На градуировочной характеристике VIII полоса погрешностей расширяется с ростом сигналов X_1 и X_2 , эксцентриситет эллипсов увеличивается, а угол наклона эллипсов остается постоянным при $\alpha = 60^\circ$. На рис. 1 и 2 показаны трехсигмовые эллипсы рассеивания сигналов и полоса погрешностей вдоль градуировочной характеристики с вероятностью $\pm 99,73\%$.

В общем случае при линейной градуировочной характеристике и двумерном распределении по нормальному закону сигналов X_1 и X_2 при $C = \text{const}$ центры эллипсов равной плотности вероятности рассеивания остатков сигналов всегда лежат на градуировочной прямой. При этом в общем случае эллипсы могут иметь разные размеры, неодинаковый эксцентриситет или отличающиеся углы наклона больших осей эллипсов к градуировочной характеристике. В этом случае всегда градуировочная характеристика либо проходит через диаметр эллипса при $\alpha \neq 90^\circ$, либо совпадает с малой осью эллипса при $\alpha = 90^\circ$.

Алгоритмы определения контролируемого параметра в рассматриваемых случаях основываются на вероятностных относительных расстояниях. В общем случае, когда эллипсы равной плотности вероятности рассеивания сигналов \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 на рис. 3 по-разному наклонены к градуировочной характеристике O_2O_1 , неизвестное значение контролируемого параметра определяется по описанному в работе [1] алгоритму. Если, например, после очередного измерения пары сигналов получают точки координаты $A(X_{1A}, X_{2A})$, то определяют наименьшие расстояния до центров O_1 и O_2 ближайших к точке A градуировочных эллипсов \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 в единицах размеров эллипсов O_2D и O_1B в направлениях от их центров до точки A . Такой алгоритм сравнительно сложен.

Если все градуировочные эллипсы одинаковы и наклонены большими осями к градуировочной характеристике под прямым углом α , то можно рекомендовать более простой алгоритм. Если, например, после очередного измерения пары сигналов получена точка $L(X_{1L}, X_{2L})$, то определяют проекцию M этой точки на градуировочную характеристику. Для этого записывают уравнение прямой, проходящей через точку L в данном направлении γ , где γ — угол

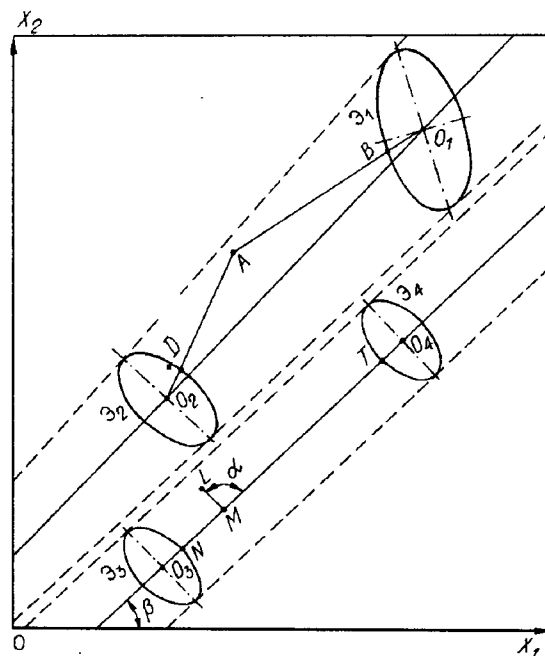


Рис. 3. Геометрическая иллюстрация определения значения контролируемого параметра по паре измеренных сигналов

между прямой LM и осью абсцисс. Для рассматриваемого на рис. 3 случая $\gamma = \alpha + \beta$, где β — угол наклона градуировочной прямой, причем $\beta = \text{arctg}b$. Тогда уравнение прямой LM примет вид

$$X_2 - X_{2L} = (X_1 - X_{1L})\text{tg}(\alpha + \text{arctg}b). \quad (3)$$

Решая совместно уравнения (1) и (3), получим координаты точки M :

$$X_{1M} = [X_{2L} - a - X_{1L}\text{tg}(\alpha + \text{arctg}b)] [b + \text{tg}(\alpha + \text{arctg}b)]^{-1}, \quad (4)$$

$$X_{2M} = a + b[X_{2L} - a - X_{1L}\text{tg}(\alpha + \text{arctg}b)] [b + \text{tg}(\alpha + \text{arctg}b)]^{-1}.$$

Точкам O_3 и O_4 соответствуют градуировочные значения контролируемого параметра C_3 и C_4 . Координаты центров эллипсов O_3 и O_4 равны соответственно $(\bar{X}_{13}, \bar{X}_{23})$ и $(\bar{X}_{14}, \bar{X}_{24})$. Тогда неизвестное значение контролируемого параметра, соответствующее точке $L(X_{1L}, X_{2L})$, определится из уравнений

$$C'_L = C_3 + (C_4 - C_3)O_3M(O_3O_4)^{-1}, \quad (5)$$

$$C''_L = C_4 - (C_4 - C_3)O_4M(O_3O_4)^{-1}.$$

Так как оба значения определены с одинаковыми погрешностями, пропорциональными $1/6$ малой оси эллипса равной плотности вероятности рассеивания сигналов, то уточненное значение C_L можно определить как среднее:

$$C_L = (1/2)(C'_L + C''_L). \quad (6)$$

Диагностика работы системы. Расстояния O_3M , O_4M и O_3O_4 определяются как расстояния между двумя точками:

$$\begin{aligned} O_3M &= [(\bar{X}_{13} - X_{1M})^2 + (\bar{X}_{23} - X_{2M})^2]^{1/2}, \\ O_4M &= [(\bar{X}_{14} - X_{1M})^2 + (\bar{X}_{24} - X_{2M})^2]^{1/2}, \\ O_3O_4 &= [(\bar{X}_{13} - \bar{X}_{14})^2 + (\bar{X}_{23} - \bar{X}_{24})^2]^{1/2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Как следует из анализа градуировочных характеристик (см. рис. 1—3), точка, соответствующая неизвестному значению контролируемого параметра, с одинаковой вероятностью оказывается сверху или снизу градуировочной прямой до тех пор, пока эта прямая не сместится. Однако в процессе работы измерительной системы градуировочная прямая может претерпевать как плоскопараллельные смещения (когда изменяется свободный член a в уравнении (1)), так и изменения угла наклона (изменяется угловой коэффициент b в уравнении (1)). Смещения градуировочной характеристики вызывают технологические факторы (смена сырья, изменения фракционного состава, влажности, насыпной плотности, толщины стенок трубопроводов, натяжения, толщины ленты или мест соединений, производительности транспортных потоков и т. п.), параметры самой измерительной системы (загрязнения окон источников и детекторов излучения, постепенный распад источников излучения, изменения расстояния датчик — слой материала, изменения напряжения на детекторах и элементах схемы и т. п.) и параметры окружающей среды (длительные изменения температуры, давления и влажности воздуха, запыленности и т. д.).

Просто и достоверно осуществить диагностику изменения градуировочной характеристики можно одновременной индикацией значения контролируемого параметра, а также величины и знака расстояния текущей измеренной

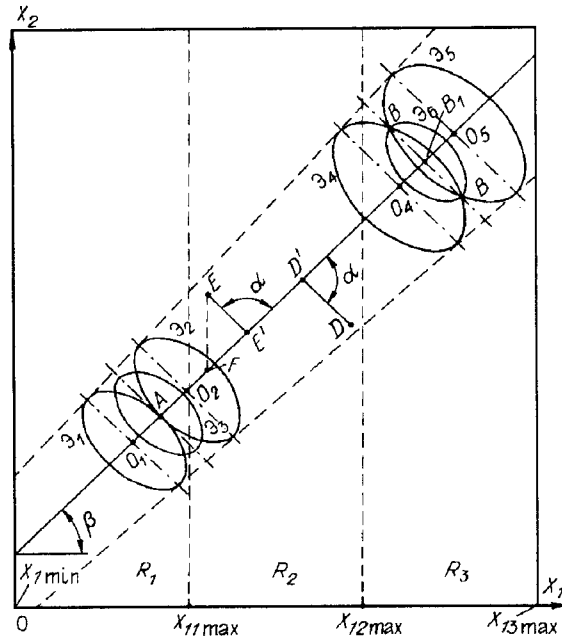


Рис. 4. Геометрическая интерпретация автоматической диагностики работы измерительной системы

точки от градуировочной характеристики. Если точка E (рис. 4) лежит сверху над градуировочной характеристикой O_1O_5 , то подстановка координат $E(X_{1E}, X_{2E})$ в левую часть уравнения (1) обеспечивает левую часть знака плюс, а значение левой части численно равно длине отрезка EF . Если же в левую часть подставить координаты точки $D(X_{1D}, X_{2D})$, то она станет отрицательной. Расстояние от точки E до прямой O_1O_5 , т. е. длина отрезка EE' , в общем случае при $\alpha \neq 90^\circ$ определится из решения косоугольного треугольника EFE' :

$$EE' = (X_{2E} - a - bX_{1E}) \cos \alpha (\cos \beta)^{-1}. \quad (8)$$

Если же $\alpha = 90^\circ$, то из прямоугольного треугольника EFE' получим

$$EE' = (X_{2E} - a - bX_{1E}) \cos \beta. \quad (9)$$

Знак и величина EE' по формулам (7) и (8) индицируются одновременно со значением контролируемого параметра. По этим данным оператор определяет состояние измерительной системы: если значения EE' малы, а знаки (+) и (-) примерно равновероятны, то система работает нормально. Если величина EE' превышает большую полуось эллипса или превагирует один из знаков, то необходима переградуировка измерительной системы.

Идея автоматической градуировки измерительной системы стала возможна только благодаря реализации нового подхода к определению значения контролируемого параметра по паре измеренных сигналов, согласно алгоритму, предложенному в работе [1], или по формулам (3)–(7). Наиболее сложным в автоматической градуировке измерительной системы является выбор подходящего критерия и метода градуировки по критерию. На первый взгляд оценивание параметров a и b в уравнении (1) кажется задачей, похожей на задачу регрессионного анализа, и именно это сходство вызывает недоразумения. В регрессионных задачах мы, однако, интересуемся зависимостью \bar{X}_2

от переменной X_1 , не подверженной ошибкам. В рассматриваемом случае обе переменные X_1 и X_2 подвержены ошибкам. Это ставит проблемы, отличные от задач регрессионного анализа. Если при $C = \text{const}$ сигнал X_1 имеет среднее квадратическое отклонение (далее СКО) погрешности σ_1 , а $X_2 = \sigma_2$, то из регрессионного уравнения (1) получим соотношение

$$X_2 = a + bX_1 + (\sigma_2 - b\sigma_1), \quad (10)$$

которое не совпадает с обычной постановкой задачи в регрессионном анализе, так как случайная величина X коррелирована с ошибкой $(\sigma_2 - b\sigma_1)$. [3]. Уравнение (10) называется структурным соотношением между наблюдаемыми случайными сигналами X_1 и X_2 . Это структурное соотношение порождается функциональной связью между сигналами X_1 и X_2 . В соотношении (10), кроме СКО погрешностей, возникающих при измерении X_1 и X_2 , имеют место и погрешности, обусловленные самой природой этих сигналов вследствие флуктуаций неконтролируемых влияющих параметров при $C = \text{const}$.

Рассмотрим механизм появления тех или иных точек вокруг градуировочной прямой O_1O_5 на рис. 4 в пределах полосы погрешностей с вероятностью $\pm 99,73\%$. Точка $A(X_{1A}, X_{2A})$, лежащая на градуировочной прямой, с вероятностью $0,27\%$ находится на эллипсах \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 и с вероятностью 95% — в центре эллипса \mathcal{E}_3 . Точка B_1 на градуировочной характеристике с большой вероятностью лежит в пределах эллипса \mathcal{E}_6 и с вероятностями около $0,27\%$ принадлежит эллипсам \mathcal{E}_4 и \mathcal{E}_5 . Симметричные градуировочной характеристике точки B с вероятностью около 5% принадлежат эллипсу \mathcal{E}_6 и с вероятностями $0,27\%$ — эллипсам \mathcal{E}_4 и \mathcal{E}_5 . Экстраполяция этих рассуждений приводит к следующим выводам. Точки на прямой O_1O_5 и в непосредственной близости от нее являются более вероятными по частоте появления, а их принадлежность к конкретным эллипсам резко уменьшается с увеличением малых осей эллипсов рассеивания сигналов X_1 и X_2 при $C = \text{const}$. Поэтому с увеличением малых осей эллипсов погрешности определения C по паре измеренных сигналов увеличиваются пропорционально малым осям и наоборот, что отмечено в [1]. С увеличением расстояния точки от градуировочной характеристики уменьшается вероятность ее появления согласно уменьшению аппликаты плотности вероятности нормального распределения. Наименее вероятны удаленные от градуировочной характеристики точки. Другим важным обстоятельством является требование, чтобы градуировочная характеристика в идеальном случае проходила через центры эллипсов рассеивания сигналов X_1 и X_2 при различных, но постоянных для каждого значения C .

Автоматическая градуировка прибора. С учетом этих особенностей проведем анализ возможных методов построений градуировочной характеристики. Оценки метода наименьших квадратов (даже при построении ортогональной регрессии, когда оба сигнала X_1 и X_2 подвержены ошибкам) с квадратичной функцией потерь с утяжелением «хвостов» распределения теряют оптимальные свойства. Это связано с тем, что применяемая в методе наименьших квадратов квадратичная функция потерь придает слишком большой вес большим отклонениям от градуировочной характеристики. Экспоненциально взвешенные оценки (ЭВ-регрессии) используют функции потерь, растущие медленнее квадратичных (т. е. имеют степени от 1 до 2), но требуют итерационных процедур для определения параметров градуировочной характеристики. Оценка Хубера обеспечивает минимум максимальной асимптотической дисперсии оценки параметра положения с помощью квадратичной функции потерь для близких к градуировочной характеристике точек и линейной функции потерь для дальних точек. Эти оценки все же недостаточно устойчивы, а вычисления сложны. Функции потерь, имеющих горизонтальную асимптоту, специально рассчитаны на асимметричные отклонения ошибок от градуировочной характеристики и поэтому пригодны для автоматической градуировки в нашем случае.

ЭВ-регрессия (λ -регрессия) использует специальную меру отклонения, обладает основными свойствами регрессии по методу наименьших квадратов,

а наблюдаемые точки входят в расчетные формулы со специально подобранными весами. Использование весов позволяет настраивать регрессию на интересующую часть градуировочной характеристики. Веса точек в ЭВ-регрессии уменьшаются по мере их удаления от градуировочной характеристики. ЭВ-регрессия значительно устойчивее метода наименьших квадратов и метода Хубера к появлению далеких от градуировочной характеристики точек. Однако ЭВ-регрессия неэффективна, когда оба сигнала X_1 и X_2 отягощены погрешностями. Для построения регрессий при наличии ошибок в обоих сигналах X_1 и X_2 применяются методы конфлюэнтного анализа. Однако эти методы довольно сложны и малоэффективны в условиях пассивных наблюдений пар сигналов для проведения автоматической градуировки. Оценивание параметров структурного соотношения (10) методом максимального правдоподобия невозможно, так как мы ничего не знаем априори о значениях параметров b , σ_1 и σ_2 , а метод устанавливает определенное соотношение между их максимально правдоподобными оценками, которому сами параметры не должны удовлетворять. Об особенностях различных методов построения регрессионных зависимостей и их обсуждении можно получить подробную информацию в работах [3—5].

Рассматриваемую задачу автоматической градуировки непосредственно во время работы измерительной системы эвристически можно понимать как задачу нахождения прямой, пересекающей возможно большее число эллипсов равной плотности вероятности двумерного рассеивания сигналов X_1 и X_2 при различных по всему диапазону значениях контролируемого параметра C , но постоянных для каждого эллипса значениях $C = \text{const}$. Для решения этой задачи наиболее подходящими являются методы группировки, введенные Вальдом и усовершенствованные Нэйром, Бартлеттом и другими [3, 5].

Полученную по формулам (2) градуировочную характеристику (1) разделим на три одинаковые группы R_1 , R_2 и R_3 по диапазону измерений X_1 (см. рис. 4). После запуска измерительной системы с определенными по формулам (2) параметрами a и b градуировочной характеристики система должна запомнить текущие значения всех пар измеренных сигналов отдельно для каждой группы: (X_{11i}, X_{21i}) для R_1 , (X_{12j}, X_{22j}) для R_2 и (X_{13k}, X_{23k}) для R_3 . Критерием разделения пар на группы является удовлетворение неравенств

$$\begin{aligned} X_{11\min} \leq X_{11i} \leq X_{11\max}, \quad X_{11\max} \leq X_{12j} \leq X_{12\max}, \\ X_{12\max} \leq X_{13k} \leq X_{13\max}. \end{aligned} \quad (11)$$

В каждой группе измерительная система запоминает четное количество пар сигналов, не меньшее

$$i = 1, 2, \dots, l \geq 10, \quad j = 1, 2, \dots, m \geq 10, \quad k = 1, 2, \dots, n \geq 10.$$

Затем измерительная система определяет средние значения сигналов в группах

$$\begin{aligned} \bar{X}_{11} = l^{-1} \sum_{i=1}^l X_{11i}, \quad \bar{X}_{21} = l^{-1} \sum_{i=1}^l X_{21i}, \quad \bar{X}_{12} = m^{-1} \sum_{j=1}^m X_{12j}, \\ \bar{X}_{22} = m^{-1} \sum_{j=1}^m X_{22j}, \quad \bar{X}_{13} = n^{-1} \sum_{k=1}^n X_{13k}, \quad \bar{X}_{23} = n^{-1} \sum_{k=1}^n X_{23k} \end{aligned} \quad (12)$$

и уточненные оценки углового коэффициента b_1 и свободного члена a_1 уравнения (1):

$$\begin{aligned} b_1 = (\bar{X}_{23} - \bar{X}_{21})(\bar{X}_{13} - \bar{X}_{11})^{-1}, \\ a_1 = (\bar{X}_{23} - \bar{X}_{21}) - b_1(\bar{X}_{13} - \bar{X}_{11}). \end{aligned} \quad (13)$$

Оценки b_1 и a_1 состоятельны, если дополнительно выполняется условие, когда нижний предел абсолютного значения ковариации положителен:

$$\liminf_{l \rightarrow \infty} \left| \bar{X}_{13} - \bar{X}_{11} \right|, \quad (14)$$

т. е. когда средние X_1 для разных групп асимптотически различимы.

После этого измерительная система определяет погрешности оценок b_1 и a_1 . Сначала система определяет суммы квадратов и произведений относительно средних в первой и третьей группах и затем рассчитывает объединенные оценки дисперсий, каждая из которых основана на $(l-1) + (k-1) = (n-2)$ степенях свободы:

$$\begin{aligned} \sigma_{X_1}^2 &= (n-2)^{-1} \left[\sum_{i=1}^l (X_{11i} - \bar{X}_{11})^2 + \sum_{k=1}^n (X_{13k} - \bar{X}_{13})^2 \right], \\ \sigma_{X_2}^2 &= (n-2)^{-1} \left[\sum_{i=1}^l (X_{21i} - \bar{X}_{21})^2 + \sum_{k=1}^n (X_{23k} - \bar{X}_{23})^2 \right], \\ \sigma_{12}^2 &= (n-2)^{-1} \left[\sum_{i=1}^l (X_{11i} - \bar{X}_{11})(X_{21i} - \bar{X}_{21}) + \sum_{i=1}^n (X_{13i} - \bar{X}_{13})(X_{23i} - \bar{X}_{23}) \right]. \end{aligned} \quad (15)$$

По этим дисперсиям определяются СКО погрешностей оценок b_1 и a_1 :

$$\sigma_{b_1} = (\sigma_{X_2}^2 - \sigma_{12}^2 b_1^{-1})^{1/2}, \quad \sigma_{a_1} = (\sigma_{X_1}^2 - b_1 \sigma_{12}^2)^{1/2}. \quad (16)$$

Правильность проведенной автоматической градуировки проверяется из условия

$$a_1 + 3\sigma_{a_1} + (b_1 + 3\sigma_{b_1})\bar{X}_{12} \geq \bar{X}_{22} \geq a_1 - 3\sigma_{a_1} + (b_1 - 3\sigma_{b_1})\bar{X}_{12}. \quad (17)$$

Если оно выполняется, это свидетельствует о правильности проведенной автоматической градуировки. При невыполнении условия (17) оператор (или сама измерительная система) должен снова запустить систему на проведение автоматической градуировки по формулам (11)–(13) и на проверку градуировки по формулам (14)–(17). Все расчеты по формулам (11)–(17) измерительная система проводит одновременно с определением значения контролируемого параметра по результату очередного текущего измерения пары сигналов.

Расчеты по диагностике работы и автоматической градуировке измерительной системы, а также по определению значения контролируемого параметра C по паре измеренных сигналов X_1 и X_2 легко реализуются на любом процессоре.

Функциональная схема измерительной системы строится с таким расчетом, чтобы она за заданное время (например, за каждые 10 мин работы) индизировала количество плюсов и минусов и при их расхождении выдавала сигнал о необходимости переградуировки. Кроме того, измерительная система должна показывать (также за заданное время) суммы положительных и отрицательных значений расстояний измеренных точек от градуировочной прямой AB и DE и при неодинаковых значениях положительных и отрицательных сумм подавать предупреждающие сигналы о необходимости переградуировки. Третьей полезной функцией измерительной системы является сравнение абсолютных значений расстояний от текущих измеренных точек до градуировочной характеристики AB и DE с большими осями эллипсов, и в случае превалирования расстояний над большими осями эллипсов, и в случае необходимости переградуировки.

В любом из трех возможных случаев система непременно должна подать предупреждающий сигнал о недопустимо больших погрешностях контроля.

Применение совершенных алгоритмов для определения значения контролируемого параметра по паре измеренных сигналов позволяет резко (в несколько раз) повысить точность результата, особенно для бесконтактных измерительных систем контроля качества различной продукции непосредственно в транспортных технологических потоках. Автоматическая непрерывная диагностика правильности работы системы и автоматическая переградуировка дополнительно повышают точность и надежность результатов и значительно снижают расходы на поверку, градуировку и текущее обслуживание системы. Все операции по определению контролируемых параметров продукции, диагностике и переградуировке легко реализуются на любом процессоре, что не приводит к заметному увеличению стоимости измерительной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Онищенко А. М. Повышение точности контроля качества продукции // Атомная энергия. 1993. 75, вып. 2. С. 139.
2. Онищенко А. М. Повышение точности и достоверности радиометрических систем // Атомная энергия, 1994. 77, вып. 46. С. 279.
3. Кендалл М. Дж., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. М.: Наука, 1973.
4. Айвазян С. А., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика. Исследование зависимостей. М.: Финансы и статистика, 1985.
5. Демиденко Е. З. Линейная и нелинейная регрессии. М.: Финансы и статистика, 1981.

Поступила в редакцию 1 сентября 1997 г.