

УДК 620.179.14

**ВОЗМОЖНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МНОГОПАРАМЕТРОВЫХ МОДЕЛЕЙ****Кулагин В.Н., Пиунов В.Д., Осипов А.А.***ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»**Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Исследованы возможные особенности многопараметровых моделей и выпускаемых предприятиями изделий. Даны рекомендации по увеличению точности определения контролируемых величин, а также повышению надежности выпускаемой продукции.

**Ключевые слова:** магнитный метод, неразрушающий контроль, точность измерения магнитных характеристик.

**POSSIBLE FEATURES OF MULTI-PARAMETER MODELS****Kulagin V.N., Osipov A.A., Piunov V.D.***The State Scientific Institution "Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus"**Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** Possible features of multi-parameter models and products manufactured by enterprises have been studied. Recommendations are given to increase the accuracy of determining controlled quantities, as well as to improve the reliability of manufactured products.

**Key words:** magnetic method, non-destructive testing, accuracy of measuring magnetic characteristics

*Адрес для переписки: Осипов А.А., ул. Академическая, 16, г. Минск, 220072, Республика Беларусь  
e-mail: osipov@iapb.bas-net.by*

Надежность используемого в производстве оборудования является необходимым условием работы современных предприятий безаварийно. Зачастую сама надежность оборудования обусловлена или определяется множеством разнообразных факторов.

Объективное и всестороннее изучение влияния каждого из факторов требует больших финансовых вложений, времени, использования специального оборудования, больших трудозатрат и т. д.

Более просто оценить и изучить возможные трудности, причем лучше на математических моделях, описывающих используемые в производстве объекты. Разумеется, выбранная модель должна максимально адекватно, а еще надежней в деталях, описывать имитируемый объект.

Подобные простейшие модели могут представлять собой линейные уравнения вида

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^p b_j x_j, \quad (1)$$

где  $b_j$  – коэффициенты многопараметровой модели,  $y$  – зависимые переменные,  $x_j$  – независимые переменные данной многопараметровой модели.

Из (1) с учетом, например, только мультипликативных ошибок независимых переменных  $\delta_j$  следует уравнение для мультипликативной ошибки  $\delta_y$  зависимой переменной выбранной линейной модели [1; 2]

$$\delta_y = \sum_{j=1}^p (b_j x_j / y) \delta_j = \sum_{i=1}^p K_i \delta_i, \quad (2)$$

где  $K_j$  – коэффициенты значимости мультипликативных ошибок  $\delta_j$  независимых переменных.

За основу возьмем, как и в [3], некоторые многопараметровые модели, которые предложены авторами [4]. При расчетах коэффициентов модели (1) используются экспериментальные данные из монографии [5].

Согласно [3; 4] независимыми переменными являются следующие известные магнитные характеристики, а также их комбинации: коэрцитивная сила  $H_c$ ; релаксационная намагниченность  $M_{H_r}$ ; релаксационная магнитная восприимчивость  $\chi_r = M_{H_r} / H_r$ ; квадрат коэрцитивной силы  $H_c^2$ ; квадрат релаксационной намагниченности  $M_{H_r}^2$ ; произведение релаксационной магнитной восприимчивости на релаксационную намагниченность  $\chi_r \cdot M_{H_r}$ .

Расчеты были проведены с использованием магнитных характеристик образцов стали 45 (закалка при 860 °С; отпуск при температурах от 20 °С до 650 °С) из работы [5]. Строились две модели: для твердости и температуры отпуска. Для твердости модель имеет вид

$$\begin{aligned} HRC_B = & 2,303 - 1,633 \cdot H_c + 0,126 \cdot M_{H_r} - \\ & - 0,6002 \cdot \chi_r + \\ & + 0,03216 \cdot H_c^2 - 3,525 \cdot 10^{-5} \cdot M_{H_r}^2 + \\ & + 1,0526 \cdot 10^{-4} \cdot \chi_r \cdot M_{H_r} \end{aligned} \quad (3)$$

Из (3), согласно (2), следует уравнение для мультипликативной ошибки  $\delta_y$ , например, при температуре отпуска  $T_{o.n.} = 300$  °С для зависимой переменной линейной модели [1; 2]

$$\begin{aligned} \delta_y = & -0,486 \cdot \delta_{H_c} + 5,461 \cdot \delta_{M_{H_r}} - 1,787 \cdot \delta_{\chi_r} + \\ & + 0,128 \cdot \delta_{H_c^2} - 2,978 \cdot \delta_{M_{H_r}^2} + 0,611 \cdot \delta_{\chi_r \cdot M_{H_r}} \end{aligned} \quad (4)$$

Наибольший вклад в ошибку вычислений зависимой переменной вносит релаксационная намагниченность  $M_{Hr}$  и квадрат ее величины. Причем коэффициент значимости погрешности для  $M_{Hr}$  превышает 5.

Однако, если отдельно учитывать погрешности измеряемых величин ( $\delta_{Hc}$ ,  $\delta_{M_{Hr}}$  и  $\delta_{Hr}$ ), то (4) упроститься

$$\delta_y = -0,23 \cdot \delta_{Hc} - 1,06 \cdot \delta_{M_{Hr}} + 1,17 \cdot \delta_{Hr} \quad (5)$$

Максимальная значимость погрешности в (5) в несколько раз меньше при сравнении с (4). При отсутствии корреляционной связи между слагаемыми уравнения (5) и полагая погрешности слагаемых равными 1 %, ошибка модели составляет 2,47 % (суммирование без учета знака коэффициентов). При наличии корреляции между слагаемыми – менее 0,12 %. Что существенно меньше, чем для (4), поскольку для данной модели возможна внутренняя компенсация погрешностей измеряемых величин, что является важной ее особенностью, если проводить сравнение с большинством используемых моделей.

Аналогичные (4) и (5) выражения, но для температуры отпуска

$$\delta_y = 17,0227 \cdot \delta_{Hc} - 34,3708 \cdot \delta_{M_{Hr}} + 7,2422 \cdot \delta_{Hr} - 7,9579 \cdot \delta_{Hc}^2 + 19,947 \cdot \delta_{M_{Hr}}^2 - 2,61407 \cdot \delta_{Hr \cdot M_{Hr}} \quad (6)$$

$$\text{и } \delta_y = -5,51 \cdot \delta_{Hc} + 56,17 \cdot \delta_{M_{Hr}} - 27,10 \cdot \delta_{Hr} \quad (7)$$

Коэффициенты значимости мультипликативных ошибок  $\delta_j$  независимых переменных для выражений (4) и (5) существенно ниже, чем для (6) и (7).

На рисунке 1 приводятся значения мультипликативной погрешности  $\delta_{yJ}$ , рассчитанные по выражению (6) для  $J = 1-50$  совокупностей изменяющихся случайным образом от нуля до 1 % для  $\delta_{Hc}$ ,  $\delta_{M_{Hr}}$  и  $\delta_{Hr}$  и от нуля до 2 % для  $\delta_{Hc}^2$ ,  $\delta_{M_{Hr}}^2$  и  $\delta_{Hr \cdot M_{Hr}}$ .

То есть максимальное значение погрешности  $\delta_y$  по формуле (6) оказалось равным приблизительно 120 %. Из рисунка 1 понятно, что величина  $\delta_y$  не превышает 80 % для большинства  $J$  случайных наборов величин  $\delta_j$ , то есть в 1,5 раза меньше своего максимального расчетного значения.

Это позволяет утверждать, что вероятность достижения как максимального значения  $\delta_y$ , так и превышения некоторого порогового значения маловероятно. Сравнение двух моделей показало большую надежность первой из них (для твердости).

Следует рекомендовать проводить предварительный анализ каждой полученной регрессионной многопараметровой модели, что должно обеспечить определение вклада в погрешность входящих в модель независимых переменных и более объективно предсказать максимальную величину ошибки восстановления данных по ней.

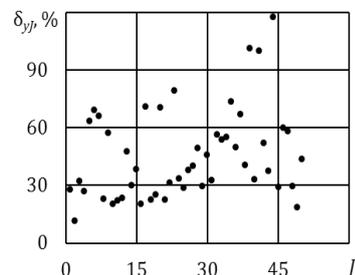


Рисунок 1 – Изменение погрешности модели  $\delta_{yJ}$  при  $J$ -ом случайном наборе мультипликативных ошибок  $\delta_{jJ}$  независимых переменных  $x_j$

Для адекватной оценки надежности оборудования и величины ошибки восстановления данных по регрессионной многопараметровой модели следует проводить анализ, учитывая погрешности определения непосредственно значимых величин, влияющих на качество производимой продукции и используемых в данной модели.

Использование регрессионных многопараметровых моделей для задач неразрушающего контроля является перспективным направлением повышения точности и надежности, а также увеличения возможностей контроля и расширения области использования оборудования.

### Литература

- Осипов, А.А. Оценка точности многопараметровых регрессионных моделей в задачах неразрушающего контроля / А.А. Осипов // Дефектоскопия. – 1995. – № 1. – С. 78–84.
- Осипов, А.А. Применение множественного регрессионного анализа в некоторых задачах неразрушающего контроля / А.А. Осипов // Дефектоскопия. – 1995. – № 4. – С. 87–93.
- Оценка регрессионных многопараметровых моделей в задачах магнитного неразрушающего контроля / А.А. Осипов [и др.] // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2018. – № 4. – С. 32–44.
- Бида, Г.В. Комплексное использование магнитных свойств сталей при неразрушающем контроле качества термообработанных деталей / Г.В. Бида, А.Н. Сташков // Дефектоскопия. – 2003. – № 4. – С. 67–74.
- Бида, Г.В. Магнитные свойства термообработанных сталей / Г.В. Бида, А.П. Ничипурук. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 219 с.