УДК 623.4.018

М.Ш. Гареев, С.В. Подчезерцев, И.Н. Филатов

СПОСОБ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ СОКРАЩЕННЫХ ПОЛИГОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

M.S. Gareev, S.V. Podchezertsev, I.N. Filatov

METHOD OF PROCESSING THE RESULTS OF THE REDUCED FIELD TESTS

Рассмотрен вариант применения методов регрессионного анализа для обработки результатов сокращенных полигонных испытаний и определения уровня достоверности полученных значений.

СОКРАЩЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ, ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ, УРАВНЕНИЕ РЕГРЕССИИ, МЕТОД НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ, ОЦЕНКА ЗНАЧИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ РЕГРЕССИИ.

The option of using a regression analysis for the processing of the results of the reduced field tests and determination the level of reliability of the obtained values is considered in the article.

ABBREVIATED TESTING, PROCESSING OF RESULTS OF TESTING, REGRESSION EQUATION, LEAST-SQUARES METHOD, ASSESSMENT OF THE SIGNIFICANCE OF REGRESSION COEFFICIENTS.

Процесс полигонных испытаний образцов вооружения можно рассматривать как специфический процесс управления, имеющий целью исследование характеристик объекта испытаний путем целенаправленного воздействия на него и оценки реакций объекта на эти воздействия. При этом образец вооружения, как объект испытаний, представляется набором независимых характеристик, каждая из которых подлежит самостоятельной оценке в ходе проведения испытаний [1, 2]. Однако современный образец вооружения представляет собой сложную техническую систему, состоящую из множества взаимосвязанных элементов и подсистем. Предположив, что часть характеристик образца вооружения в той или иной степени взаимосвязаны [3], можно применить методы корреляционного анализа для выявления наличия и структуры этих связей.

Знание характера и степени тесноты выявленных стохастических связей позволяет «предсказать» значения зависимых параметров образца вооружения расчетным путем без проведения эксперимента. На этом предположении основан метод проведения сокращенных полигонных испытаний [4]. При этом возникает важная задача оценки достоверности данных полученных при реализации такого метода испытаний. В целях решение этой задачи необходимо получить уравнения регрессии результирующих характеристик и оценить значимость коэффициентов регрессии.

В простейшем случае будет иметь место корреляционная связь двух стохастических параметров Y и X. Примем, что значение параметра Y будет рассчитываться по полученным в ходе испытаний значениям предикторного параметра X. По имеющимся априорным данным производится расчет коэффициентов регрессии для уравнения вида:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x \tag{1}$$

где $\beta 0$, $\beta 1$ – коэффициенты регрессии, определяемые с использованием метода наименьших квадратов по формулам [5]:

$$\beta_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i \sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \sum_{i=1}^{n} y_i x_i \sum_{i=1}^{n} x_i}{n\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2}$$

$$\beta_1 = \frac{n\sum_{i=1}^{n} y_i x_i - \sum_{i=1}^{n} y_i \sum_{i=1}^{n} x_i}{n\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2} \qquad (2)$$

Уравнение регрессии, выраженное через выборочные значения математических ожиданий, будет выглядеть [6, 7]:

$$y = \hat{m}_y + \hat{r}_{xy}\frac{\hat{\delta}_y}{\hat{\delta}_x}\left(x - \hat{m}_x\right) \qquad (3)$$

Если исследуемые параметры объекта испытаний коррелированы и характеризуются случайными величинами (y, $x(1)$, ..., $x(n)$), подчиняющимися нормальному закону распределения, то уравнение регрессии у на $x(i)$ при фиксированных остальных (n-2) величинах можно записать:

$$y = \beta_{yx^{(1)}}x^{(1)} + \beta_{yx^{(2)}}x^{(2)} + \ldots + \beta_{yx^{(n)}}x^{(n)} \qquad (4)$$

$$\beta_{yx^{(i)}} = -\frac{\delta_y}{\delta_i}\frac{R_{yi}}{R_{yy}} \qquad (5)$$

где $\beta_{yx^{(i)}}$ – частные коэффициентами регрессии между параметрами y и $x(i)$ при фиксированных значениях всех остальных параметров $x(j)$; R_{yi} и R_{yy} – алгебраические дополнения для элементов ryi и ryy в соответствующем определителе корреляционной матрицы R.

В случае если аппроксимирующая функция имеет вид полинома:

$$y = b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + \ldots b_k x^k, \qquad (6)$$

тогда решение в матричном виде для определения коэффициентов bi записывается:

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

$$X = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{n} x_i^0 & \sum_{i=1}^{n} x_i^1 & \cdots & \sum_{i=1}^{n} x_i^k \\ \sum_{i=1}^{n} x_i^1 & \sum_{i=1}^{n} x_i^2 & \cdots & \sum_{i=1}^{n} x_i^{k+1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \sum_{i=1}^{n} x_i^k & \sum_{i=1}^{n} x_i^{k+1} & \cdots & \sum_{i=1}^{n} x_i^{2k} \end{vmatrix}; \qquad (7)$$

$$Y = \begin{vmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdots \\ y_n \end{vmatrix}; \quad B = \begin{vmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \cdots \\ b_k \end{vmatrix}$$

Получаемые с помощью метода наименьших квадратов оценки являются эффективными независимо от закона распределения стохастического параметра объекта испытаний [5, 8]. Поэтому метод может применяться и в тех случаях, когда не удалось доказать подчиненность распределения параметра нормальному закону распределения.

В общем случае, когда выявлена корреляция между несколькими параметрами и определено, что параметр y будет являться функцией нескольких переменных $x1, x2, \ldots, xn$ уравнение линейной регрессии примет вид:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \ldots \beta_k x_k + \varepsilon \qquad (8)$$

где ε – случайная величина с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ^2.

В матричной форме линейная модель имеет вид:

$$Y = X\beta + E$$

$$Y = \begin{vmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdots \\ y_n \end{vmatrix}; \quad X = \begin{vmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{2k} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 1 & x_{n1} & \cdots & x_{nk} \end{vmatrix}; \qquad (9)$$

$$\beta = \begin{vmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \cdots \\ \beta_k \end{vmatrix}; \quad E = \begin{vmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \cdots \\ \varepsilon_n \end{vmatrix}$$

Для вычисления неизвестных параметров β_k применим метод наименьших квадратов и заменим параметры β на их несмещенную оценку b, тогда:

$$B = \hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \qquad (10)$$

Для определения несмещенной оценки остаточной дисперсии σ^2 вектора остатков $E = Y - \hat{Y} = Y - XB$ воспользуемся формулой [9,10]:

$$\hat{s}^2 = \frac{1}{n-k-1}(Y - XB)^T (Y - XB) \qquad (11)$$

Проверку значимости уравнения регрессии произведем с использованием F – критерия. Если уравнение регрессии незначимо, значит все коэффициенты регрессии генеральной совокупности равны нулю, т.е. проверке подлежит гипотеза H0: β = 0 имеющая F – распределение с ($k+1$) и (n–k–1) степенями свободы:

$$F_{набл} = \frac{\frac{1}{k+1}(XB)^T (XB)}{\frac{1}{n-k-1}(Y - XB)^T (Y - XB)} \qquad (12)$$

Кроме того необходима проверка значимости коэффициентов регрессии с помощью t – критерия, основанного на статистике:

$$t_j = \frac{b_j}{\hat{s}\left[\left(X^T X\right)^{-1}\right]_{jj}^{1/2}} \qquad (13)$$

которая при выполнении гипотезы $H0$: $\beta_j = 0$ имеет t – распределение с числом степеней свободы (n–k–1) [3].

Приведенные зависимости позволяют составить уравнения регрессии для коррелированных параметров объекта испытаний и оценить значимость полученных коэффициентов регрессии. При этом уровень значимости может быть определен исходя из объема имеющегося статистического материала, или же задан директивно, основываясь на важности принимаемого решения.

Такое применение методов корреляционно-регрессионного анализа позволяет, основываясь на структуре и характере стохастических связей, определять значения зависимых параметров образца вооружения расчетным методом с использованием полученных регрессионных зависимостей без проведения эксперимента. При этом уровень достоверности данных полученных косвенным путем сохранится на уровне данных полученных экспериментальным путем при большом количестве повторений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аристов А.В.** Управление качеством: Учебник. М.,: Инфра-М, 2009. – 240 с.

2. **Меньшиков В.А.** Полигонные испытания. Книга 1. М.,: КОСМО, 1997. – 416 с.

3. **Гареев М.Ш., Григорюнов Р.Е., Подчезерцев С.В.** Корреляционный анализ результатов испытаний вооружения и военной техники. Сб. тр. Шестнадцатой Всерос. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы защиты и безопасности». СПб.,: НПО СМ, 2013. – 362 с.

4. **Гареев М.Ш., Григорюнов Р.Е., Подчезерцев С.В.** Метод сокращения полигонных испытаний опытных образцов вооружения и военной техники на основе использования результатов корреляционного анализа априорной информации. Сб. тр. четвертой Всерос. науч.-техн. конференции «Радиовысотометрия - 2013». Каменск-Уральский, 2013. – 440 с.

5. **Панов В.В.** Испытания ракетно-артиллерийского вооружения и радиоэлектронных средств. Ч. 1 – СПб.,: ВАА, 1981. – 188 с.

6. **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей. М.,: КноРус, 2010. – 658 с.

7. **Беляева С.Д.** Математические методы планирования и проведения эксперимента. СПб.,: ВАА, 1991. - 100 с.

8. **Филюстин А.Е., Злотников К.А., Захаров С.В.** Современные методы отбраковки аномальных результатов испытаний образцов вооружения. М.,: Стандартизация ВТ, 1993. № 3. – 232 с.

9. **Филюстин А.Е.** и др. Испытания ракетно-артиллерийского вооружения. Ч. 1: Учебник – М.,: МО РФ, 1998. – 296 с.

10. **Дубров А.М., Мхитарян В.С., Трошин Л.И.** Многомерные статистические методы. М.,: Финансы и статистика, 2003. – 352 с.

REFERENCES

1. **Aristov A.V.** Quality management: Textbook. Moscow.:Infra-M, 2009. – 240 s.

2. **Menshikov V.A.** Ground testing. Book 1. M.,: KOSMO, 1997. – 416 s.

3. **Gareev M.S., Grigoryunov R.E., Podchezertsev S.V.** Correlation analysis of results of testing of weapons and military equipment. Proceedings of the Sixteenth Russian scientific and practical conference «Actual problems of protection and safety». SPb., NPO SM, 2013. – 362 s.

4. **Gareev M.S., Grigoryunov R.E., Podchezertsev S.V.** The reduction method and validation of the pilot samples of weapons and military equipment on the basis of utilization of the results of correlation analysis of a priori information. Proceedings of the fourth all-Russian scientific-technical conference «Radiovisotometriya-2013». Kamensk-Uralskiy, 2013 – 440 s.

5. **Panov V.V.** Testing of rocket-artillery armament and radio-electronic means. Part 1 – Saint-Petersburg: VAA, 1981. – 188 s.

6. **Ventsel E.S.** Probability theory. Moscow: KnoRus, 2010. – 658 s.

7. **Beljaeva S.D.** Mathematical methods of planning and carrying out of experiment. SPb.,: VAA, 1991. – 100 s.

8. **Filjustin A.E., Zlotnikov K.A., Zaharov S.V.** Modern methods of rejection of abnormal test results of samples of armament. M.,: Standartizatsia VT, 1993. № 3. – 232 s.

9. **Filjustin A.E.** Testing of rocket-artillery armament. Part 1: Text book – M,.:MO RF, 1998 – 296 s.

10. **Dubrov A.M., Mhitarjan V.S., Troshin L.I.** Multidimensional statistical methods. Moscow: Financi i statistica, 2003. – 352 s.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

ГАРЕЕВ Марат Шамильевич – адъюнкт; Михайловская военная артиллерийская академия; 195009, ул. Комсомола, 22, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: mark-on@mail.ru
GAREEV Marat S. – Mikhailovskaya Artillery Academy; 195009, Komsomola Str. 22, St. Petersburg, Russia; e-mail: mark-on@mail.ru

ПОДЧЕЗЕРЦЕВ Сергей Викторович – адъюнкт; Михайловская военная артиллерийская академия; 195009, ул. Комсомола, 22, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: sergej591910@yandex.ru
PODCHEZERTSEV Sergej V. – Mikhailovskaya Artillery Academy; 195009, Komsomola Str. 22, St. Petersburg, Russia; e-mail: sergej591910@yandex.ru

ФИЛАТОВ Игорь Николаевич – начальник отдела организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров; Михайловская военная артиллерийская академия; 195009, ул. Комсомола, 22, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: filin.05@mail.ru
FILATOV Igor N. – head of Department of organization of scientific work and training of the teaching staff; Mikhailovskaya Artillery Academy; 195009, Komsomola Str. 22, St. Petersburg, Russia; e-mail: filin.05@mail.ru