

В.Б. Кононов¹, В.В. Бурцева²¹Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків²Метрологічний центр військових еталонів, Харків

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ Й МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ КІЛЬКОСТІ ЗАМОВЛЕНЬ НА МЕТРОЛОГІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ ВІЙСЬКОВИХ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ЗРАЗКІВ ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ

Предметом вивчення статті є питання прогнозування кількості замовлень на метрологічне обслуговування військових засобів вимірювальної техніки (далі – ВЗВТ) зразків озброєння та військової техніки (далі – ОВТ). Метою статті є дослідження математичних моделей та методів прогнозування потреби з метрологічного обслуговування військових засобів вимірювальної техніки зразків ОВТ для визначення необхідної кількості виїзних метрологічних груп. Задача, що вирішується, – використовуючи статистичні методи прогнозування, які засновані на системах взаємозалежних регресійних рівнянь: визначається модель на основі системи взаємозалежних рівнянь прогнозування замовлень для метрологічного обслуговування військових засобів вимірювальної техніки, де параметри цієї моделі оцінюються за допомогою ідентифікації структурної форми моделі; визначається лінійна багатофакторна регресійна модель прогнозування потреби з метрологічного обслуговування військових засобів вимірювальної техніки та методи визначення параметрів математичної моделі прогнозування кількості замовлень на метрологічне обслуговування ВЗВТ зразків ОВТ на основі системи незалежних рівнянь. Висновки: запропоновані математичні моделі та методи розв'язання задач прогнозування кількості замовлень на метрологічне обслуговування ВЗВТ зразків ОВТ побудовані з використанням багатофакторних регресійних моделей на основі систем незалежних та взаємозалежних рівнянь.

Ключові слова: прогнозування, метрологічне обслуговування, вимірювальна техніка, зразки озброєння, військова техніка, статистичні методи прогнозування, багатофакторні регресійні моделі.

Вступ

Постановка задачі. Для забезпечення своєчасного і якісного метрологічного обслуговування ВЗВТ зразків ОВТ необхідно, не тільки, встановити точні потреби виконання заявок на обслуговування, виходячи з дійсного стану зразків озброєння, але й врахувати можливі зміни стану озброєння. Ефективність реалізації управлінських рішень, як в оцінці потреби проведення метрологічного обслуговування зразків ОВТ, які використовуються в метрологічних підрозділах Збройних Сил України, так і розподілу існуючих ресурсів залежать від точності та достовірності прогнозу можливого розвитку озброєння.

Ефективність реалізації управлінських рішень, під час встановлення оцінки потреби проведення метрологічного обслуговування ВЗВТ зразків ОВТ, які використовуються в Збройних Силах України, та подальшого розподілу існуючих ресурсів залежать від точності та достовірності прогнозу розвитку озброєння.

В умовах сучасного реформування і розвитку Збройних Сил України, які характеризуються появою новітніх зразків озброєння та військової техніки, значним розвитком інформаційних технологій,

вимагається корегування та покращення парку пересувних лабораторій вимірювальної техніки, за рахунок оновлення їх якісного складу.

Тому питання, що пов'язане із дослідженням методів прогнозування потреби з метрологічного обслуговування військових засобів вимірювальної техніки зразків озброєння та військової техніки й методики можливості їх використання для визначення необхідної кількості виїзних метрологічних груп є актуальним науково-технічним завданням.

Аналіз літератури. Принципи й організаційні основи метрологічного забезпечення, а також роль й місце метрологічного забезпечення Збройних Сил України, викладено в наказах [1–2], в статтях [3–4], літературі [5–10] та інструкції [11]. Математичні моделі визначення кількості замовлень на гарантоване метрологічне обслуговування зразків озброєння та військової техніки з урахуванням їх важливості викладено в статтях [3]. Методика прогнозування можливостей метрологічних підрозділів з відновлення пошкоджених засобів вимірювальної техніки викладено в статті [4]. Основи експлуатації засобів вимірювальної техніки військового призначення в умовах проведення ООС викладені в літературі

[5–10]. Нажаль в джерелах [1–11] питання, які пов'язані з дослідженням методів прогнозування потреби з метрологічного обслуговування військових засобів вимірювальної техніки зразків озброєння та військової техніки й методики можливості їх використання для визначення необхідної кількості виїзних метрологічних груп, не розглядалися.

Метою статті є дослідження математичних моделей та методів прогнозування потреби з метрологічного обслуговування військових засобів вимірювальної техніки зразків ОВТ для визначення необхідної кількості виїзних метрологічних груп.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо існуючі методи прогнозування потреби з метрологічного обслуговування військових засобів вимірювальної техніки ОВТ й методику можливості їх використання для визначення необхідної кількості виїзних метрологічних груп.

Методи прогнозування, загалом, базуються на двох підходах: евристичному та математичному. Евристичні моделі формуються експертами на основі цільової установки, представленої інформації, досвіду, інтуїції та знань експерта. Недоліком методів експертних оцінок являються суб'єктивність оцінки та залежність їх застосування від наявності експертів, знайомих з ситуацією, яка прогнозується. Експертні методи прогнозування рекомендовані для використання, якщо:

- немає достатньої статистичної інформації залежності показника, що аналізується, від факторів, котрі на нього впливають;

- значення показника описуються якісними ознаками;

- показник, що аналізується, змінюється стрибкоподібно, й природа цих змінень невідома.

Математичні методи прогнозування поділяються на:

- симплексні (прості) методи екстраполяції за часовими рядами (експоненціальне згладжування, метод плинних середніх та ін.);

- статистичні методи (кореляційний та регресійний аналіз, факторний аналіз та ін.);

- комбіновані методи, які являють собою синтез різних варіантів використання методів прогнозу.

Математичні методи прогнозування рекомендуються для застосування, якщо прогноз виконується за умовою, що основні фактори, які впливають на розвиток процесу, що розглядається, не мають стрибкоподібних змінень. Це дозволяє висунути гіпотези о майбутньому розвитку процесів, які базуються на аналізі минулого.

При прогнозуванні метрологічного обслуговування військових засобів вимірювальної техніки зразків озброєння та військової техніки будемо ви-

ходити з того, що відома необхідна статистична інформація щодо кількості замовлень на метрологічне обслуговування військових засобів вимірювальної техніки різних типів та значень обсягів зразків ОВТ різних видів.

Розглянуті в статтях [3–4] моделі, основані на удосконалених багатофакторних та часових регресійних моделях не є повними, тому їх слід доповнити рівняннями, де певні залежні (ендогенні) змінні виступають в якості факторів (екзогенних, незалежних змінних), що впливають на інші залежні змінні.

Розподіл змінних на ендогенні та екзогенні залежить від теоретичної концепції побудови моделі. Ендогенні змінні – залежні змінні, які визначаються за рівняннями системи, тобто вони є основою. Їх кількість дорівнює кількості рівнянь системи, що описує процес прогнозування. Оскільки в статті розглядаються питання прогнозування кількості замовлень на метрологічне обслуговування військових засобів вимірювальної техніки, доцільно їх пропонувати в якості ендогенних змінних.

Екзогенні змінні – незалежні змінні, які визначаються зовнішніми чинниками. Кількість замовлень на метрологічне обслуговування військових засобів вимірювальної техніки очевидно залежить від кількості зразків озброєння та військової техніки, які містять ці військові засоби вимірювальної техніки. Звідси в якості екзогенних змінних слід розглядати обсяги зразків озброєння та військової техніки різних видів, кількість яких впливає на кількість замовлень на метрологічне обслуговування військових засобів вимірювальної техніки, тобто впливає на ендогенні змінні.

В умовах оновлення зразків ОВТ можлива залежність кількості замовлень на метрологічне обслуговування військових засобів вимірювальної техніки одних типів від кількості замовлень на метрологічне обслуговування військових засобів вимірювальної техніки інших типів. Отже, одні і ті ж ендогенні змінні у деяких рівняннях входять в ліву частину, а інші – в праву частину. Таким чином, для оцінки впливу кількості замовлень на метрологічне обслуговування військових засобів вимірювальної техніки певного типу на кількість замовлень на метрологічне обслуговування військових засобів вимірювальної техніки інших типів та здійснення прогнозу виникає необхідність у використанні системи взаємозалежних рівнянь.

Отже, будемо використовувати статистичні методи прогнозування, які засновані на системах взаємозалежних регресійних рівнянь.

Систему взаємозалежних рівнянь (структурна форма моделі) прогнозування замовлень для метрологічного обслуговування військових засобів вимірювальної техніки пропонується розглянути у вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_1 = \alpha_{10} + \sum_{k \in N_1} \alpha_{1k} \gamma_k + \sum_{u \in M_1} \beta_{1u} \chi_u + \varepsilon_1; \\ \gamma_2 = \alpha_{20} + \sum_{k \in N_2} \alpha_{2k} \gamma_k + \sum_{u \in M_2} \beta_{2u} \chi_u + \varepsilon_2; \\ \dots \dots \dots \\ \gamma_j = \alpha_{j0} + \sum_{k \in N_j} \alpha_{jk} \gamma_k + \sum_{u \in M_j} \beta_{ju} \chi_u + \varepsilon_j; \\ \dots \dots \dots \\ \gamma_m = \alpha_{m0} + \sum_{k \in N_m} \alpha_{mk} \gamma_k + \sum_{u \in M_m} \beta_{mu} \chi_u + \varepsilon_m, \end{array} \right. \quad (1)$$

де $\gamma_j, j = \overline{1, m}$ – випадкова ендеогенна змінна, яка описує кількість замовлень на метрологічне обслуговування військових засобів вимірювальної техніки j -го типу;

m – кількість типів військових засобів вимірювальної техніки;

$\chi_u, u = \overline{1, n}$ – екзогенна змінна, що може впливати на значення залежних змінних та описує кількість зразків озброєння та військової техніки u -го виду;

$\alpha_{j0}, \alpha_{jk}, \beta_{jk}, j = \overline{1, m}, k \in N_j$ – параметри моделі;

$N_j, j = \overline{1, m}$ – множина типів військових засобів вимірювальної техніки, які можуть впливати на кількість замовлень на обслуговування військових засобів вимірювальної техніки j -го типу;

$M_j, j = \overline{1, m}$ – множина видів озброєння та військової техніки, які можуть впливати на кількість замовлень на обслуговування військових засобів вимірювальної техніки j -го типу;

$\varepsilon_j, j = \overline{1, m}$ – випадкова складова, яка описує вплив неврахованих та випадкових факторів на значення випадкової величини γ_j .

Параметри моделі (структурні параметри) не завжди можуть бути оцінені. Можливість їх оцінювання пов'язана з проблемою ідентифікації структурної форми моделі. З позиції ідентифікованості структурні моделі розрізняють на три види: ідентифіковані; неідентифіковані; надідентифіковані.

Запропонована модель (1) вважається ідентифікованою, якщо кожне рівняння її ідентифіковане. Модель (1) вважається неідентифікованою, якщо хоча б одне з рівнянь системи неідентифіковане. Модель (1) вважається надідентифікованою, якщо система містить хоча б одне надідентифіковане рівняння, проте рівняння системи, що залишилися є ідентифікованими. Звідси, виконання умов ідентифікованості моделі необхідно перевіряти для кожного рівняння системи.

Ідентифікованість, неідентифікованість та надідентифікованість структурної форми моделі перевіряється за допомогою відповідних необхідних та достатніх умов. У випадку неідентифікованості структурна форма моделі повинна бути переглянута. Розглянемо необхідні умови ідентифікації моделі (1).

Необхідна умова визначення типу рівняння системи полягає в виконанні наступних лічильних правил, а саме:

H_j – кількість ендеогенних змінних, які входять до j -го рівняння системи;

D_j – кількість екзогенних змінних, які відсутні у j -му рівнянні, але є присутніми у системі.

Таким чином, якщо:

$H_j = D_j + 1$ – виконується необхідна умова ідентифікації;

$H_j > D_j + 1$ – рівняння неідентифіковане (модель неідентифікована);

$H_j < D_j + 1$ – виконується необхідна умова надідентифікації рівняння.

При цьому, лічильне правило для j -го рівняння системи (1) має наступний вигляд:

$$|N|_j = l - |M_j| + 1 \quad (2)$$

виконується необхідна умова ідентифікації;

$$|N|_j > l - |M_j| + 1 \quad (3)$$

рівняння неідентифіковане (модель неідентифікована); виконується необхідна умова надідентифікації:

$$|N|_j < l - |M_j| + 1, \quad (4)$$

де l – кількість видів зразків озброєння та військової техніки.

Розглянуті співвідношення (2)–(4) відображають необхідні, але недостатні умови ідентифікації рівнянь системи (1). Тому у разі виконання необхідних умов ідентифікації для цієї моделі, необхідно перевірити кожне з рівнянь системи на достатню умову ідентифікації.

Достатня умова ідентифікації (надідентифікації) формулюється таким чином: ранг матриці A_j , що складається з коефіцієнтів при змінних системи (ендогенних та екзогенних), які є відсутніми у j -му рівнянні, але є присутніми у системі, не менше кількості ендеогенних змінних системи H без одиниці:

$$rang A_j \geq H - 1. \quad (5)$$

Розглянемо методи визначення параметрів математичної моделі прогнозування кількості замовлень на метрологічне обслуговування зразків озброєння та військової техніки на основі системи незалежних рівнянь.

Перш за все розглянемо методи розв'язання часткового випадку системи (1), коли на ендеогенні змінні системи відсутній вплив інших ендеогенних змінних, тобто $\alpha_{jk} = 0, j = \overline{1, m}, k \in N_j$. В цьому випадку система (1) має назву незалежних рівнянь й приймає наступного вигляду:

$$\left\{ \begin{aligned} \gamma_1 &= \alpha_{10} + \sum_{u \in M_1} \beta_{1u} \chi_u + \varepsilon_1; \\ \gamma_2 &= \alpha_{20} + \sum_{u \in M_2} \beta_{2u} \chi_u + \varepsilon_2; \\ &\dots \\ \gamma_j &= \alpha_{j0} + \sum_{u \in M_j} \beta_{ju} \chi_u + \varepsilon_j; \\ &\dots \\ \gamma_m &= \alpha_{m0} + \sum_{u \in M_m} \beta_{mu} \chi_u + \varepsilon_m \end{aligned} \right. \quad (6)$$

В цій системі кожна ендогенна змінна розглядається як функція одного і того ж набору екзогенних змінних. Сукупність екзогенних змінних χ_u , $u = \overline{1, n}$ в кожному рівнянні системи (6) може бути різною. Відсутність тієї чи іншої екзогенної змінної в рівнянні системи може бути наслідком як недоцільності її включення в модель, так і неістотності її впливу на ендогенну змінну. Кожне рівняння системи незалежних рівнянь може розглядатись окремо. Для знаходження його параметрів використовується метод найменших квадратів. Розглянемо зміст цього методу з використанням лінійної багатofакторної моделі.

У загальному випадку лінійна багатofакторна регресійна модель прогнозування потреби для метрологічного обслуговування військових засобів вимірювальної техніки, що розглядається, має вигляд:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_m x_m + \varepsilon, \quad (7)$$

де y – випадкова залежна змінна, яка описує кількість замовлень на метрологічне обслуговування військових засобів вимірювальної техніки певного типу;

x_1, x_2, \dots, x_m – екзогенні або незалежні змінні, що впливають на змінення y та описують кількості зразків озброєння та військової техніки кожного виду;

ε – випадкова складова, яка описує вплив неврахованих та випадкових факторів на змінення y ;

m – кількість видів зразків озброєння та військової техніки;

$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$ – параметри моделі, при чому $\beta_u = 0$, якщо зразок озброєння та військової техніки u -го виду не містить військових засобів вимірювальної техніки типу, що розглядаються.

Визначимо i -те спостереження змінної y через y_i , екзогенних змінних x_1, x_2, \dots, x_m , випадковою – ε_i відповідно, де $i = \overline{1, n}$, а n – кількість спостережень. Оцінкою моделі (7) за вибіркою є рівняння регресії:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_m x_m, \quad (8)$$

де \hat{y}_i , – оцінка умовного математичного сподівання

залежної змінної y ;

b_i – оцінки коефіцієнтів β_j , $j = \overline{0, m}$.

Відповідно до методу найменших квадратів невідомі параметри b_i визначаються таким чином, щоб сума квадратів $S(b_0, b_1, \dots, b_m)$ відхилень фактичних значень від теоретичних значень y_i , рівняння регресії (7) була мінімальною:

$$S = \sum_{i=1}^n (b_0 + b_1 x_{i,1} + \dots + b_m x_{i,m} - y_i)^2 \rightarrow \min. \quad (9)$$

Використовуючи необхідні умови екстремуму, отримаємо наступну систему нормальних рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial b_0} &= 2 \sum_{i=1}^n (b_0 + b_1 x_{i,1} + \dots + b_m x_{i,m} - y_i) = 0; \\ \frac{\partial S}{\partial b_1} &= 2 \sum_{i=1}^n x_{i,1} (b_0 + b_1 x_{i,1} + \dots + b_m x_{i,m} - y_i) = 0; \\ &\dots \\ \frac{\partial S}{\partial b_m} &= 2 \sum_{i=1}^n x_{i,m} (b_0 + b_1 x_{i,1} + \dots + b_{m-1} x_{i,m-1} - y_i) = 0. \end{aligned} \right. \quad (10)$$

Рішення лінійної системи рівнянь в матричній формі має наступний вигляд:

$$B = (X'X)^{-1} X'Y, \quad (11)$$

де $B = [b_0, b_1, b_2, \dots, b_m]^T$ – матриця-стовпець параметрів рівняння регресії;

$Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ – матриця-стовпець значень залежної змінної;

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1m} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad - \text{ матриця}$$

значень екзогенних змінних;

X' – транспонована матриця.

Отримані оцінки параметрів регресії повинні відповідати певним критеріям. Вони повинні бути незміщеними, обґрунтованими та ефективними.

Незміщеність оцінки означає, що математичне сподівання залишків ε_i дорівнює нулю. Звідси при великій кількості вибіркового оцінювання залишки не будуть накопичуватись, і знайдений параметр регресії β_i можна розглядати як середнє значення з можливо великої кількості незміщених оцінок.

Обґрунтованість оцінок характеризує збільшення їх точності із збільшенням обсягу вибірки.

Оцінки вважаються ефективними, якщо вони характеризуються найменшою дисперсією. Тому незміщеність оцінки повинна доповнюватись

мінімальною дисперсією.

В практичних дослідженнях це означає можливість переходу від точкового оцінювання до інтервального.

Для отримання незміщених, обґрунтованих та ефективних оцінок за МНК необхідно виконання наступних умов:

- 1) випадковість похибок ε_i , $i = \overline{1, n}$;
- 2) математичне сподівання похибки ε_i дорівнює нулю:

$$M[\varepsilon_i] = 0, \quad i = \overline{1, n};$$

- 3) гомоскедастичність, тобто дисперсія кожного відхилення постійна:

$$D[\varepsilon_i] = \sigma^2, \quad i = \overline{1, n};$$

- 4) похибки ε_i та $\varepsilon_{i'}$ розподілені за нормальним законом та некорельовані:

$$M[\varepsilon_i \varepsilon_{i'}] = 0, \quad i \neq i';$$

- 5) матриця значень екзогенних змінних невідроджена, тобто її ранг дорівнює $m+1$:

$$\text{rang}X = m + 1 < n.$$

Після визначення рівняння регресії здійснюється як оцінка рівняння регресії у цілому, так і його окремих параметрів.

Значущість рівняння регресії (8) у цілому оцінюється за допомогою F -критерія Фішера (F -тесту), а саме: фактичне значення F -статистики

$$F_{\text{факт}} = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{n - m - 1}{m} \quad (12)$$

порівнюють з табличним значенням розподілу Фішера з m і $n-m-1$ ступенями свободи при заданому рівні значущості α (як правило $\alpha = 0,05$ або $\alpha = 0,01$)

$$F_{\text{табл}} = F_{\alpha; m; n-m-1},$$

де

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (13)$$

коефіцієнт множинної детермінації,

y_i , $i = \overline{1, n}$ – теоретичне значення залежної змінної у для i -го спостереження за рівнянням регресії (8);

\bar{y} – середнє значення за вибіркою для n спостережень залежної змінної y ;

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}. \quad (14)$$

Якщо:

$$F_{\text{факт}} > F_{\alpha; m; n-m-1} \quad (\text{або } \alpha_F < \alpha), \quad (15)$$

де α_F – значущість F , то рівняння регресії (8) признається статистично значущим на рівні значущості α , що свідчить про адекватність моделі.

Якщо

$$F_{\text{факт}} < F_{\alpha; m; n-m-1} \quad (\text{або } \alpha_F > \alpha), \quad (16)$$

то признається статистична незначущість рівняння регресії (8) на рівні значущості α , тобто модель вважається неадекватною.

Оцінка значущості параметрів рівняння регресії здійснюється за допомогою t -критерію Стьюдента (t -тесту), а саме фактичне значення t -статистики

$$t_{b_j} = \frac{b_j}{s_{b_j}} \quad (17)$$

порівнюють з табличним значенням розподілу Стьюдента з $n - m - 1$ ступенями свободи при заданому рівні значущості α де

$$s_{b_j} = S \sqrt{(X'X)^{-1}_{jj}}, \quad j = \overline{1, m} \quad (18)$$

середньоквадратичне відхилення параметра регресії b_j , де $(X'X)^{-1}_{jj}$ – діагональний елемент матриці $(X'X)^{-1}$, що знаходиться на перетину j -го рядка та j -го стовпця.

Якщо

$$t_{b_j} > t_{1-\alpha; n-m-1} \quad (\text{або } \alpha_{t_{b_j}} < \alpha), \quad (19)$$

де $\alpha_{t_{b_j}}$ значущість t_{b_j} , то параметр b_j признається статистично значущим на рівні значущості α .

Якщо

$$t_{b_j} < t_{1-\alpha; n-m-1} \quad (\text{або } \alpha_{t_{b_j}} > \alpha), \quad (20)$$

параметр b_j признається статистично незначущим на рівні значущості α . В цьому випадку рекомендується виключення екзогенної змінної x_j зі складу моделі (7) та побудови нової моделі.

Для оцінки якості підбору регресійної моделі до спостережень y_i використовується коефіцієнт множинної детермінації (13), що характеризує, яка

частка варіації ендогенної змінної обумовлена варіацією екзогенних змінних.

Наведемо властивості коефіцієнта множинної детермінації:

1. Значення коефіцієнта множинної детермінації задовольняють нерівності: $0 \leq R^2 \leq 1$. Чим ближче R^2 до одиниці, тим краще регресія апроксимує емпіричні дані.

2. Якщо $R^2 = 1$, між змінними y та x_1, x_2, \dots, x_m існує лінійна функціональна залежність.

3. Якщо $R^2 = 0$, то варіація залежної змінної повністю обумовлена впливом випадкових та неврахованих факторів.

На практиці для оцінки ступеню апроксимації спостережень рівнянням регресії використовують наступні емпіричні правила:

- 1) $R^2 \geq 0,95$ – висока точність апроксимації;
- 2) $0,8 \leq R^2 < 0,95$ – добра апроксимація;
- 3) $0,6 \leq R^2 < 0,8$ – задовільна апроксимація;
- 4) $R^2 < 0,6$ – незадовільна апроксимація.

Недоліком коефіцієнта множинної детермінації R^2 є те, що він, взагалі, збільшується при додаванні нових факторів, хоча це не обов'язково означає поліпшення якості регресійної моделі. Врахувати дану особливість дозволяє скоригований (адаптований, виправлений) коефіцієнт детермінації \hat{R}^2 який визначається за формулою:

$$\hat{R}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-m-1}(1-R^2). \quad (21)$$

Таким чином, якщо рівняння регресії, які побудовані для моделі (6), задовольняють умовам значущості та якості, то маємо наступну модель прогнозування кількості замовлень на метрологічне обслуговування зразків ОВТ на основі системи незалежних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{\gamma}_1 = a_{10} + \sum_{u \in M_1} b_{1u} \chi_u; \\ \hat{\gamma}_2 = a_{20} + \sum_{u \in M_2} b_{2u} \chi_u; \\ \dots \\ \hat{\gamma}_j = a_{j0} + \sum_{u \in M_j} b_{ju} \chi_u; \\ \dots \\ \hat{\gamma}_m = a_{m0} + \sum_{u \in M_m} b_{mu} \chi_u. \end{array} \right. \quad (22)$$

Висновки

1. В статті запропонована багатофакторна регресійна модель на основі систем незалежних та взаємозалежних рівнянь, яка дозволяє отримувати точковий та інтервальний прогнози можливих змін обсягів замовлень на метрологічне обслуговування військових засобів виміральної техніки в залежності від кількості та важливості (кількісного та якісного стану) зразків озброєння та військової техніки.

2. Запропонований метод часткового випадку визначення параметрів моделі, коли на ендогенні змінні системи відсутній вплив інших ендогенних змінних, на основі системи незалежних рівнянь. Для знаходження його параметрів використовується метод найменших квадратів

3. Отримані незміщені, обґрунтовані та ефективні оцінки за МНК, шляхом перевірки їх обов'язковим умовам Гауса-Маркова.

4. Адекватність запропонованої моделі отримана та перевірена за допомогою оцінки параметрів регресії у цілому за допомогою F -критерія Фішера, та його окремих параметрів – шляхом порівняння фактичного та табличного значень t -критерію Стьюдента.

Список літератури

1. Наказ Міністерства оборони України “Про затвердження Положення про метрологічну службу Міністерства оборони України та Збройних Сил України № 288 від 24.05.2017 р.”
2. Наказ начальника Центрального управління метрології і стандартизації “Про затвердження Керівництва з організації виробничої діяльності військових метрологічних лабораторій в Міністерстві оборони України та Збройних Силах України № 2 від 14.05.2007 р.”
3. Кононов В.Б. Математичні моделі визначення кількості замовлень на гарантоване метрологічне обслуговування зразків озброєння та військової техніки з урахуванням їх важливості / В.Б. Кононов, В.В. Бурцева // Системи обробки інформації. – № 1(147). – 2017. – С. 88-92.
4. Кононов В.Б. Методика прогнозування можливостей метрологічних підрозділів з відновлення пошкоджених засобів виміральної техніки військового призначення / В.Б. Кононов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 8(85). – С. 231-234.
5. Основи експлуатації засобів виміральної техніки військового призначення в умовах проведення АТО / В.Б. Кононов, А.М. Науменко, О.В. Водолажко, О.В. Коваль, І.І. Кондрашова. – Х.: ХНУПС, 2017. – 288 с.
6. Економетрика / Л.С. Гур'янова, Т.С. Клебанова, О.А. Сергієнко, С.В. Прокопович. – Х.: ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2015. – 384 с.
7. Кононов В.Б. Застосування електричних вимірювань засобами виміральної техніки в умовах проведення АТО / В.Б. Кононов, А.М. Науменко, О.В. Коваль. – Х.: ХНУПС, 2018. – 392 с.
8. Кононов В.Б. Приладобудування та загальні принципи датчиків / В.Б. Кононов, А.М. Науменко, О.В. Коваль. – Х.: ХНУПС, 2018. – 64 с.
9. Кузнецов І.Б. Організація метрологічного забезпечення військ (сил) / І.Б. Кузнецов, П.М. Яблонський. – К.: НУОУ, 2009. – 356 с.

10. Кузнецов І.Б. Організація застосування пересувних засобів метрологічного обслуговування / І.Б. Кузнецов, О.В. Ярошенко. – К.: НУОУ, 2009. – 356 с.
11. Удосконалення парку пересувних лабораторій вимірювальної техніки як фактор підвищення оперативності та ефективності метрологічного обслуговування складних систем / І.Б. Кузнецов, В.Т. Марценківський, О.В. Ярошенко, О.В. Буяло, В.О. Проценко // Збірник наукових праць Київського національного університету ім. Т. Шевченка. – 2011. – № 32. – С. 33-46.
12. Інструкція “Організація роботи виїзних метрологічних груп метрологічних частин затверджена начальником Центрального управління метрології і стандартизації – головним метрологом ЗС України від 09.10.2006”.

References

1. The Order of the Ministry of Defense of Ukraine (2017), “*Pro zatverdzhennia Polozhennia pro metrolohichnu sluzhbu Ministerstva oborony Ukrainy ta Zbroinykh Syl Ukrainy No. 288 vid 24.05.2017*” [About approval of the Provision on metrological service of the Ministry of Defence of Ukraine and Armed Forces of Ukraine No. 288 dated 24.05.2017].
2. The Order of the Head of the Central Department of Metrology and Standardization (2007), “*Pro zatverdzhennia Kerivnytstva z orhanizatsii vyrobnychoi diialnosti viiskovykh metrolohichnykh laboratorii v Ministerstvi oborony Ukrainy ta Zbroinykh Sylakh Ukrainy No. 2 vid 14.05.2007*” [About approval of the Manual for the organization of production activities of military metrology laboratories in the Ministry of Defense of Ukraine and the Armed Forces of Ukraine No. 2 dated 14.05.2007].
3. Kononov, V.B. and Burtseva, V.V. (2017), “*Matematychni modeli vyznachennia kilkosti zamovlen na harantovane metrolohichne obsluhovuvannya zrazkiv ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki z urakhuvanniam yikh vazhlyvosti*” [Mathematical models for determination of the number of orders for guaranteed metrological maintenance of weapons and military equipment samples taking into account their importance], *Information Processing Systems*, No. 1(147), pp. 88-92.
4. Kononov, V.B. (2011), “*Metodyka prohnozuvannya mozhyvostei metrolohichnykh pidrozdiliv z vidnovlennia poskodzhenykh zasobiv vymiriuvalnoi tekhniki viiskovoho pryznachennia*” [Methodology of forecasting of possibilities of metrological units for the repair of damaged measuring equipment of military purpose], *Aerospace Technology*, No. 8(85), pp. 231-234.
5. Kononov, V.B., Naumenko, A.M., Vodolazhko, O.V., Koval, O.V. and Kondrashova, I.I. (2017), “*Osnovy ekspluatatsii zasobiv vymiriuvalnoi tekhniki viiskovoho pryznachennia v umovakh provedennia ATO*” [Fundamentals of Operation of Means of Measuring Equipment for Military Purposes under the conditions of ATO], KNAFU, Kharkiv, 288 p.
6. Hurianova, L.C., Klebanova, T.C., Sergienko, O.A. and Propokovich, S.V. (2015), “*Ekonometrika*” [Econometrics], KHNUE, Kharkiv, 384 p.
7. Kononov, V.B., Naumenko, A.M. and Koval, O.V. (2018), “*Zastosuvanya elektrychyn vumiryvan zasobam vumiryvalnoi tekhniki v umovakh provedennia ATO*” [Application of electrical measurements by means of measuring equipment in the condition of ATO], KNAFU, Kharkiv, 392 p.
8. Kononov, V.B., Naumenko, A.M. and Koval, O.V. (2018), “*Priladobuduvannya ta zagal'ni principi datchikiv*” [Instrumentation and general principles of sensors], KNAFU, Kharkiv, 64 p.
9. Kusnetsov, I.B. and Yablonskiy, P.M. (2009), “*Orhanizatsiia metrolohichnoho zabezpechennia viisk (syl)*” [Organization of metrological support of troops (forces)], NUOU, Kyiv, 356 p.
10. Kusnetsov, I.B. and Yaroshenko, O.V. (2009), “*Orhanizatsiia zastosuvannya peresuvnykh zasobiv metrolohichnoho obsluhovuvannya*” [Organization of the using of mobile metrological services], NUOU, Kyiv, 356 p.
11. Kusnetsov, I.B., Martcenkivskiy, V.T., Yaroshenko, O.V., Buyalo, O.V. and Protsenko, V.O. (2011), “*Udoskonalennia parku peresuvnykh laboratorii vymiriuvalnoi tekhniki yak faktor pidvyshchennia operatyvnosti ta efektyvnosti metrolohichnoho obsluhovuvannya skladnykh system*” [Improvement of park of mobile laboratories of measuring technique as a factor of increasing efficiency and efficiency of metrological service of complex systems], *Collection of Scientific Works of T. Shevchenka Kyiv National University*, No. 32, pp. 33-46.
12. The Head of the Central Department of Metrology and Standardization - the main metrologist of the Armed Forces of Ukraine Instruction (2006), “*Instruktsiia z orhanizatsii roboty vyiznykh metrolohichnykh hrup metrolohichnykh chastyn vid 09.10.2006*” [Instruction of the organization of work of the visiting metrological groups of metrological units approved by from 09.10.2006].

Надійшла до редколегії 19.09.2019
Схвалена до друку 15.10.2019

Відомості про авторів:

Кононов Володимир Борисович
доктор технічних наук професор
начальник кафедри
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-9946-5056>

Information about the authors:

Volodymyr Kononov
Doctor of Technical Sciences Professor
Chief of the Department
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9946-5056>

Бурцева Вікторія Валеріївна
молодший науковий співробітник
Метрологічного Центру військових еталонів,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-1867-4615>

Viktoria Burtseva
Junior Research
of Metrology Center of Military Standarts,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-1867-4615>

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОЛИЧЕСТВА ЗАКАЗОВ НА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ВОЕННЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ОБРАЗЦОВ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

В.Б. Кононов, В.В. Бурцева

Предметом изучения статьи вопрос прогнозирования количества заказов на метрологическое обслуживание военных средств измерительной техники образцов вооружения и военной техники. Целью статьи является исследование математических моделей и методов прогнозирования потребности по метрологическому обслуживанию военных средств измерительной техники образцов вооружения и военной техники для определения необходимого количества выездных метрологических групп. Задача, которая решается, - используя статистические методы прогнозирования, основанные на системах взаимосвязанных регрессионных уравнений: определяется модель на основе системы взаимосвязанных уравнений прогнозирования заказов для метрологического обслуживания военных средств измерительной техники, где параметры этой модели оцениваются с помощью идентификации структурной формы модели; определяется линейная многофакторная регрессионная модель прогнозирования потребности по метрологическому обслуживанию военных средств измерительной техники и методы определения параметров математической модели прогнозирования количества заказов на метрологическое обслуживание ВЗВТ образцов ВВТ на основе системы независимых уравнений.

Ключевые слова: прогнозирование, метрологическое обслуживание, измерительная техника, образцы вооружения, военная техника, статистические методы прогнозирования, многофакторные регрессионные модели.

MATHEMATICAL MODEL AND METHODS USED FOR PROGNOSIS OF AMOUNT OF ORDERS FOR METROLOGICAL SERVICE OF MILITARY MEASUREMENT MEANS OF SAMPLES OF WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT

V. Kononov, V. Burtseva

The subject of this article is prognosis of the amount of orders for metrological service of samples of weapons and military equipment. Aim of the article is to study mathematical models and methods used for prediction of necessity of metrological service of military measurement means of samples of weapons and military equipment in order to find out required number of mobile metrological groups. Problem being solved – is to determine a model of prediction of amount of orders for metrological service of military measurement means, based on the systems of interdependent equations, with use of statistical prognosis methods, based on the systems of interdependent equations, where parameters of this model are evaluated by identification of the structure form of this model; linear multifactorial regressive model for prognosis of the amount of orders for metrological service of samples of weapons and military equipment and methods, used to determine the parameters of mathematical model, based on the system of interdependent equations, used to prognose the amount of orders for metrological service of samples of weapons and military equipment. In order to find out the parameters of models of multifactorial regressive independent and interdependent equations, it is proposed to use the least squares method. It is also proposed to examine unbiasedness, validity and effectiveness of the marks found out with the least squares method, for compliance with Gaussian-Markov terms. In order to find out the overall importance of regression equations it is proposed to use the Fischer's ratio test, checking the importance of the parameters of regressive equations – by comparison of their real values with reference values of Student's t-test. Summary: proposed mathematical models and methods used to solve tasks of prognosis of amount of orders for metrological service of samples of weapons and military equipment are built with use of multifactorial regressive models based on systems of independent and interdependent equations.

Keywords: forecasting, metrological services, measuring equipment, weapons samples, military equipment, statistical methods of forecasting, multifactorial regression models.