

МЕТОД ПРОГНОЗУВАННЯ ПОТРЕБИ В МЕТРОЛОГІЧНОМУ ОБСЛУГОВУВАННІ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ НА ОСНОВІ УДОСКОНАЛЕНИХ ЧАСОВИХ РЕГРЕСІЙНИХ МОДЕЛЕЙ

В статті запропонований метод прогнозування потреби в метрологічному обслуговуванні засобів вимірювальної техніки зразків ОВТ, заснований на використанні удосконалених часових регресійних моделей.

Ключові слова: метрологічне обслуговування, військові засоби вимірювальної техніки, регресійна модель.

Вступ

Постановка задачі. Для забезпечення своєчасного метрологічного обслуговування зразків озброєння та військової техніки (ОВТ) бажано вдосконалити управління силами й засобами метрологічного забезпечення та здійснювати прогнозування стану військових засобів вимірювальної техніки (ВЗВТ). Від точності та достовірності прогнозу залежить ефективність реалізації управлінських рішень як в частині оцінки потреби метрологічного обслуговування зразків ОВТ, так і в частині визначення кількості сил і засобів, які використовуються в метрологічних підрозділах Збройних Сил України, та їх розподілу. Наукове обґрунтування прогнозування потреби в військових засобів вимірювальної техніки зразків ОВТ для метрологічного обслуговування шляхом розробки відповідних математичних моделей є актуальним науково-технічним завданням.

Аналіз літератури. В [1 – 3] розглянуті питання організації виробничої діяльності військових метрологічних лабораторій в Міністерстві оборони України та Збройних Силах України. Питання прогнозування на основі регресійних моделей розглянуті в [4, 5]. Разом з тим, в цих працях не розглядалися методи розв'язання завдань прогнозування, що враховують можливі поточні зміни результатів прогнозування та зміни стану військової ситуації.

Метою статті є обґрунтування методу прогнозування потреби в метрологічному обслуговуванні ВЗВТ зразків ОВТ на основі удосконалених часових регресійних моделей.

Основний матеріал

Для прогнозування кількості ВЗВТ кожного типу для метрологічного обслуговування в залежності від часу будемо враховувати вплив багатьох факторів у найбільш складному випадку, коли не представляється можливим відокремити їх взаємний вплив. У зв'язку з цим змінення значення залежної змінної пов'язується не з якимось конкретними факторами, а зі змінням часу.

Задача прогнозування ставиться таким чином: відома статистична інформація о кількості замовлень ВЗВТ у різні проміжки часу y_t ; $t = \overline{1, n}$ і необхідно дати прогноз на момент $n + \tau$. Якщо розглядати часовий ряд як регресійну модель з незалежною змінною "час":

$$Y_t = f(t) + \varepsilon, \quad (1)$$

то до нього можуть бути застосовані розглянуті методи регресійного аналізу.

Регресійна модель прогнозування повинна враховувати військову ситуацію, що склалася в даний час навколо України. Звідси крім кількісного фактору час, що впливає на залежну змінну, слід враховувати ще й якісний фактор, що описує зміни військової ситуації. Якісні фактори можуть суттєво впливати на структуру зв'язків між змінними й приводити до суттєвих змін технічного стану зразків ОВТ, що потрібно врахувати в регресійній моделі. Запропонуємо наступний метод корегування результатів аналізу, який дозволяє оцінювати вплив значень як кількісних, так й якісних факторів, наприклад, якісного фактору "мирний час - АТО - воєнний час" на залежну змінну за допомогою так званих фіктивних змінних [4]. У якості регресійних моделей для прогнозу з врахуванням фактору "мирний час – АТО – воєнний час" пропонуються такі моделі:

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \alpha_1 \gamma_1 + \alpha_2 \gamma_2 + \varepsilon_t; \quad (2)$$

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \alpha_1 \eta_1 + \alpha_2 \eta_2 + \varepsilon_t; \quad (3)$$

$$Y_t = \beta_0 t^{\beta_1} \mu_1^{\alpha_1} \mu_2^{\alpha_2} + \varepsilon_t; \quad (4)$$

$$Y_t = \exp(\beta_0 + \beta_1 t + \alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2) + \varepsilon_t, \quad (5)$$

де $\gamma_2(\eta_2, v_2) = \begin{cases} 1, & \text{якщо ситуація відповідає АТО;} \\ 0, & \text{випадки, що залишилися;} \end{cases}$

$\gamma_1(\eta_1, v_1) = \begin{cases} 1, & \text{ситуація відповідає воєнному часу;} \\ 0, & \text{випадки, що залишилися;} \end{cases}$

$\mu_1 = \begin{cases} 3, & \text{якщо ситуація відповідає воєнному часу;} \\ 1, & \text{випадки, що залишилися;} \end{cases}$

$\mu_2 = \begin{cases} 2, & \text{якщо ситуація відповідає АТО;} \\ 1, & \text{випадки, що залишилися.} \end{cases}$

Для оцінки параметрів наведених моделей будемо застосовувати метод найменших квадратів:

$$\sum_{t=1}^n (y_t - f(t))^2 \rightarrow \min; \quad (6)$$

для перевірки адекватності моделей - критерій Фішера [4, 5].

Для оцінки якості моделей використовуємо:
- скоригований коефіцієнт детермінації [4]

$$\hat{R}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-m-1} (1 - R^2), \quad (7)$$

де $R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$ - коефіцієнт детермінації; n - кількість спостережень; m - кількість параметрів при змінних x;

- середню абсолютну похибку у відсотках [6]:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100\%, \quad (8)$$

середню відсоткову похибку [6]

$$MPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \cdot 100\%. \quad (9)$$

Для оцінки ступеню апроксимації спостережень рівнянням регресії будемо виходити з наступних емпіричних правил [6,7]:

- 1) $\hat{R}^2 > 0,95$ - висока точність апроксимації;
- 2) $0,7 < \hat{R}^2 < 0,95$ - задовільна апроксимація;
- 3) $\hat{R}^2 < 0,6$ - незадовільна апроксимація;
- 4) допустима межа значень MAPE - $\leq 8-10\%$;
- 5) показник $|MPE| \leq 5\%$.

Розглянемо ілюстративний приклад прогнозування метрологічного обслуговування засобів виміральної техніки (ЗВТ) на 16-й період, якщо відомі статистичні дані замовлень за 1 – 15 періоди для ситуації "мирний час – АТО" (табл. 1).

Таблиця 1

Значення замовлень ЗВТ

Період	ЗВТ	
	Кількість	Військова ситуація
1	118	Мирний час
2	123	Мирний час
3	127	Мирний час
4	124	Мирний час
5	131	Мирний час
6	136	Мирний час
7	130	Мирний час
8	138	Мирний час
9	142	Мирний час
10	144	Мирний час
11	141	Мирний час
12	143	Мирний час
13	145	Мирний час
14	173	АТО
15	175	АТО

Для визначення прогнозу будемо використовувати спочатку регресійні моделі (1) – (5) без врахування впливу якісного фактору.

1. Лінійна модель: $Y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \varepsilon_t$ (табл. 2).

Таблиця 2

Результати розрахунку лінійної моделі

Лінійна модель $Y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \varepsilon_t$: параметри	
b_0	109,89
b_1	3,87
$F_{факт}$	32,11
$F_{табл} = F_{0,05;1;13}$	4,67
\hat{R}^2	0,69
MAPE	5,18%
MPE	-0,38%

Параметри лінійної моделі розраховуються за формулою

$$b = (X^T X)^{-1} X^T y, \quad (10)$$

де $b = [b_0, b_1, b_2, \dots, b_m]^T$ - вектор параметрів рівняння регресії; $y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ - вектор значень залежної змінної;

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

факторів.

Таким чином, рівняння регресії для прогнозування метрологічного обслуговування ЗВТ є таким:

$$\hat{y}_t = 109,89 + 3,87t. \quad (11)$$

Оскільки $F_{факт} > F_{табл}$, рівняння регресії значуще на рівні значущості 0,05. Коефіцієнт детермінації дорівнює $\hat{R}^2 = 0,69$, що відповідає задовільній оцінці якості регресії. Показники ефективності моделі MAPE < 8% та $|MPE| < 5\%$, що відповідає добрій якості моделі.

2. Квадратична модель: $\hat{y}_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \varepsilon_t$ (табл. 3).

Таблиця 3

Результати розрахунку квадратичної моделі

Квадратична модель $Y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \varepsilon_t$	
Параметри	
b_0	122,98
b_1	-0,24
b_2	0,22
$F_{факт}$	27,02
$F_{табл} = F_{0,05;1;13}$	3,89
\hat{R}^2	0,84
MAPE	3,31%
MPE	-0,15%

Параметри моделі розраховуються як рішення наступної задачі оптимізації:

$$S(b_0, b_1, b_2) = \sum_{i=1}^{15} (b_0 + b_1i + b_2i^2 - y_i)^2 \rightarrow \min \quad (12)$$

за допомогою процедури "Поиск решения" MS Excel. Звідси, рівняння регресії має такий вигляд:

$$\hat{y}_t = 122,98 - 0,24t + 0,22t^2. \quad (13)$$

Оскільки $F_{\text{факт}} > F_{\text{табл}}$, рівняння регресії значуще на рівні значущості 0,05. Коефіцієнт детермінації $\hat{R}^2 = 0,84$, що відповідає задовільної оцінки якості регресії. Показники ефективності моделей $\text{MAPE} < 8\%$ та $|\text{MPE}| < 5\%$, що відповідає доброї якості моделей.

3. Степенева модель: $Y_t = \beta_0 t^{\beta_1} + \varepsilon_t$ (табл. 4).

Таблиця 4

Результати розрахунку степеневої моделі

Степенева модель $Y_t = \beta_0 t^{\beta_1} + \varepsilon_t$	
Параметри	
b_0	105,32
b_1	0,15
$F_{\text{факт}}$	13,30
$F_{\text{табл}} = F_{0,05;1;13}$	4,67
\hat{R}^2	0,57
MAPE	6,67%
MPE	0,54%

Параметри моделі розраховуються як рішення задачі оптимізації:

$$S(b_0, b_1) = \sum_{i=1}^{15} (b_0 i^{b_1} - y_i)^2 \rightarrow \min \quad (14)$$

за процедурою "Поиск решения" MS Excel. Отже, рівняння регресії має вигляд:

$$\hat{y}_t = 105,32t^{0,15}. \quad (15)$$

Оскільки $F_{\text{факт}} > F_{\text{табл}}$, рівняння регресії значуще на рівні значущості 0,05. Коефіцієнт детермінації $\hat{R}^2 = 0,57$ відповідає незадовільної оцінки якості. Показники ефективності моделі $\text{MAPE} < 8\%$ та $|\text{MPE}| < 5\%$, що відповідає доброї якості моделей за цими показниками.

4. Експоненціальна модель: $Y_t = \exp(\beta_0 + \beta_1 t) + \varepsilon_t$ (табл. 5).

Параметри моделі розраховуються як рішення задачі оптимізації:

$$S(b_0, b_1) = \sum_{i=1}^{15} (\exp(b_0 + b_1 i) - y_i)^2 \rightarrow \min \quad (16)$$

за процедурою "Поиск решения" MS Excel.

Отже, рівняння регресії має вигляд:

$$\hat{y}_t = \exp(4,71 + 0,03t). \quad (17)$$

Таблиця 5

Результати розрахунку експоненціальної моделі

Експоненціальна модель $Y_t = \exp(\beta_0 + \beta_1 t) + \varepsilon_t$	
Параметри	
b_0	4,71
b_1	0,03
$F_{\text{факт}}$	43,35
$F_{\text{табл}} = F_{0,05;1;13}$	4,67
\hat{R}^2	0,75
MAPE	4,94%
MPE	0,28%

Оскільки $F_{\text{факт}} > F_{\text{табл}}$, рівняння регресії значуще на рівні значущості 0,05. Коефіцієнт детермінації дорівнює $\hat{R}^2 = 0,75$, що відповідає задовільної оцінки якості відповідно. Показники ефективності моделей $\text{MAPE} < 8\%$ та $|\text{MPE}| < 5\%$, що відповідає доброї якості моделі.

Таким чином, всі моделі за критерієм Фішера являються значущими на рівні значущості 0,05, тобто адекватними, і можуть використовуватися для прогнозу. Найкращою з них є квадратична модель. Прогноз для метрологічного обслуговування на 16-й період дорівнює:

$$\hat{y}_t(16) = 122,98 - 0,24 \cdot 16 + 0,22 \cdot 16^2 \approx 176.$$

Будемо вважати, що й у випадку використання якісного фактору "мирний час – АТО" квадратична модель є найкращою, та виконаємо прогноз для метрологічного обслуговування ЗВТ на 16-й період на її основі:

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \alpha \eta, \quad (18)$$

де $\eta = \begin{cases} 1, & \text{якщо ситуація відповідає АТО} \\ & \text{у відповідному проміжку часу;} \\ 0, & \text{якщо ситуація відповідає мирному часу.} \end{cases}$

Параметри моделі розраховуються як рішення наступної задачі оптимізації:

$$S(b_0, b_1, b_2) = \sum_{i=1}^{15} (b_0 + b_1 i + b_2 i^2 + \alpha \eta_i - y_i)^2 \rightarrow \min \quad (19)$$

за процедурою "Поиск решения" MS Excel (табл. 6).

Звідси, рівняння регресії має такий вигляд:

$$\hat{y}_t = 117,46 + 2,54t - 0,02t^2 + 35,15\eta. \quad (20)$$

Оскільки $F_{\text{факт}} > F_{\text{табл}}$, рівняння регресії значуще на рівні значущості 0,05. Коефіцієнт детермінації $\hat{R}^2 = 0,92$, що відповідає доброї оцінки якості. Показники ефективності моделі $\text{MAPE} < 8\%$ та $|\text{MPE}| < 5\%$, що відповідає доброї якості моделі.

Таким чином, рівняння регресії з врахуванням якісного фактору (20) має кращі показники якості ніж рівняння регресії без врахуванням якісного фактору (13).

Таблиця 6
Результати розрахунку
квадратичної моделі
з врахуванням якісного фактору

Квадратична модель $Y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \varepsilon_t$	
Параметри	
b_0	117,46
b_1	2,54
b_2	-0,02
η	35,15
$F_{\text{факт}}$	29,97
$F_{\text{табл}} = F_{0,05;1;13}$	3,59
\hat{R}^2	0,92
МАРЕ	2,41%
МРЕ	0,1%

Визначимо прогноз на 16-й період для ситуації "мирний час":

$$\hat{y}_t(16) = 117,46 + 2,54 \cdot 16 - 0,02 \cdot 16^2 + 35,15 \cdot 0 \approx 147$$

та для ситуації "АТО":

$$\hat{y}_t(16) = 117,46 + 2,54 \cdot 16 - 0,02 \cdot 16^2 + 35,15 \cdot 1 \approx 182.$$

Слід зауважити, що прогноз для ситуації "АТО" за обома рівняннями достатньо близькі: 176 та 182. Однак, для прогнозу в ситуації "мирний час" рівняння регресії (13) є непридатним (дає той же результат, як й для ситуації "АТО"), оскільки не враховує якісний фактор.

Висновки

1. В статті запропонований метод прогнозування потреби в метрологічному обслуговуванні військових засобів вимірювальної техніки зразків ОБТ, заснований на використанні часових регресійних моделей.

2. Удосконалені часові регресійні моделі прогнозування кількості ВЗВТ для метрологічного обслуговування, в яких крім кількісних факторів, що враховують кількість зразків ОБТ кожного виду, додатково введений якісний фактор, що враховує можливий стан військової ситуації (мирний час, АТО). Вплив якісного фактору враховується за рахунок використання фіктивних змінних.

3. Для отримання незміщених оцінок параметрів нелінійних регресійних моделей запропоновано на відміну від лінеаризації моделей використовувати методи оптимізації із застосуванням програмного забезпечення ПЕВМ.

Список літератури

1. Кузнецов І. Б. *Організація метрологічного забезпечення військ (сил). Ч. 1 : навч. посіб. / І.Б. Кузнецов, П.М. Яблонський. – К. : НУОУ, 2009. – 356 с.*
2. *Наказ заступника Міністра оборони з озброєння – начальника Озброєння ЗС України "Про затвердження Керівництва з організації та порядку експлуатації вимірювальної техніки у ЗС України" від 1.06.2001 № 79.*
3. *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" від 14.05.2007 № 2.*
4. Кремер Н.Ш., Путько Б.А. *Эконометрика / Н.Ш. Кремер, Б.А. Путько – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 311 с.*
5. *Четыркин Е.М.. Статистические методы прогнозирования / . Е.М. Четыркин. – М.: "Статистика, 1975.- 184 с*
6. Мур Дж., Уэдерфорд Л.Р. *Экономическое прогнозирование в Microsoft Excel. 6 изд. / Дж. Мур, Л.Р. Уэдерфорд.- М.: Вильямс, 2004.- 1024 с.*
7. *Гельман В.Я. Решение математических задач средствами Excel / В.Я. Гельман. - М.; Питер, 2008. – 235 с.*

Надійшла до редколегії 8.10.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Б. Кононов, Харківський національний університет Повітряних Сил імені І. Кожедуба, Харків.

МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТРЕБНОСТИ В МЕТРОЛОГИЧЕСКОМ ОБСЛУЖИВАНИИ СРЕДСТВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ ВРЕМЕННЫХ ЧАСОВЫХ МОДЕЛЕЙ

Ю.И. Шевяков

В статье предложен метод прогнозирования потребности в метрологическом обслуживании средств измерительной техники образцов ВВТ на основе использования усовершенствованных часовых регрессионных моделей.

Ключевые слова: метрологическое обслуживание, средства измерительной техники, регрессионная модель, фиктивные переменные.

METHOD FOR PREDICTING THE NEED FOR METROLOGICAL MAINTENANCE OF MEASURING MEANS OF MEASURING TECHNIQUES BASED ON IMPROVED TIME-TIME CLOCK MODELS

Yu.I. Shevyakov

The article proposes a method for forecasting the need for metrological servicing of measuring equipment of IWT models based on the use of advanced hour regression models.

Keywords: metrological service, means of measuring equipment, regression model, dummy variables.