

DOI: 10.18372/2310-5461.60.18274
УДК 656.072.7: 626.735.33

А. М. Валько,
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0003-0394-6304
e-mail: pasoshka@ukr.net

МНОЖИННА МОДЕЛЬ ЛІНІЙНОЇ РЕГРЕСІЇ АВІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ АЕРОПОРТУ

Вступ

Авіаційна безпека в аеропорту – це комплекс заходів, спрямованих на запобігання можливих загроз для польотів. Вона включає в себе контроль безпеки пасажирів та багажу, технічне обслуговування літаків, тренування персоналу та багато іншого.

Акт незаконного втручання в діяльність аеропорту – це будь-яка дія, яка порушує безпеку аеропорту або може призвести до порушення його роботи або наземного обслуговування. Як правило, може включати в себе незаконне проникнення на обмежені або заборонені території, спроби вплинути на роботу систем безпеки, або будь-яку дію, яка може створити загрозу безпеці польоту або безпеці аеропорту в цілому.

Ризики включають в себе терористичні загрози, технічні недоліки, людські помилки та природні чинники, такі як погодні умови. Міжнародні стандарти та процедури допомагають зменшити ці ризики, але повна безпека завжди залишається важливим завданням.

Проте, важливо також враховувати зростання індексу авіаційних інцидентів, який може вказувати на погіршення безпеки в авіації, але сам по собі це не єдиний показник безпеки. Важливо розглядати зростання цього індексу в контексті його причин, деталей і характеристик конкретних інцидентів.

Індекс авіаційних інцидентів може бути впливовий різними факторами, такими як розвиток технологій, політики безпеки, культури безпеки в авіаційній галузі та інші чинники. Тому, для повного розуміння рівня безпеки в авіації важливо аналізувати індекс авіаційних інцидентів разом із іншими показниками та контекстом, щоб узагальнити оцінку безпеки в авіації. Це може бути наслідком різних факторів, таких як збільшення обсягів авіаційного трафіку, зміни в репортуванні інцидентів, вдосконалення систем виявлення інцидентів тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проведений аналіз науково-практичної літератури свідчить про достатньо вагоме теоретико-методологічне обґрунтування окремих проблем

щодо сучасних підходів до оцінки та впровадження заходів безпеки в аеропорту. Зокрема над цим питанням працювали вітчизняні науковці: Т. Акімова, С. Богданов, Д. Бугайко, І. Висоцька, Г. Гарипова, В. Іваннікова, В. Кулик, О. Лещинський, К. Марінцева, Соколова, О. Соколова, О. Соловйова, Г. Прокудін, Є. Сич, В. Харченко, К. Чередніченко, М. Черепа, Г. Юн, [1–5], а також зарубіжні автори: Д. Бейлі, І. Бланк, П. Друкер, Д. Берлін, Е. Вінер, Р. М. Джафар-заде, Р. С. Дженсен, Д. Різон, Е. Едвардс та інші. [6–7].

Багато досліджень у сфері авіаційної безпеки використовують модель лінійної регресії для аналізу. Авторами таких досліджень можуть бути вчені, експерти з авіаційної безпеки, консультанти з ризиків або фахівці з інших суміжних галузей, які цікавляться покращенням безпеки в аеропортах. Проте наукові праці в яких би висвітлювалися сучасні тенденції математичної моделі надійності або захисту аеропорту на жаль, мають одиничний характер. [8]

Мета статті – Метою дослідження є визначення впливу на рівень авіаційної безпеки (в даному випадку – АНВ (актів незаконного втручання)) таких факторів, як: світовий авіаційний індекс безпеки, пасажиропотоки та тарифи на обслуговування пасажирів в аеропортах.

Виклад основного матеріалу

Існуючі заходи авіабезпеки в світових аеропортах не можуть застрахувати або втілити повний захист від усіх типів загроз. В основі методики з оцінки загроз враховуються різні фактори, включаючи можливості та наміри, а також потенційна летальність результату АНВ. [9]

Множинна модель регресії в контексті авіаційної безпеки аеропорту може досліджувати різні фактори, які впливають на безпеку в аеропорту. Це може включати такі змінні, як рівень технічної обладнаності, кількість персоналу з безпеки, погодні умови та інші фактори, які можуть впливати на загальний рівень безпеки в аеропорту.

Регресійні моделі - це математичні моделі, які використовуються для аналізу та моделювання залежності між однією чи кількома незалежними (пояснюючими) змінними та однією залежною (прогнозованою) змінною. [10]

Головна ідея регресійного аналізу полягає в тому, щоб зрозуміти, як змінні взаємодіють між собою та як вони впливають на значення залежної змінної.

Типове використання регресійних моделей в авіації:

– прогнозування витрат палива: регресійні моделі використовуються для аналізу впливу різних факторів, таких як вага літака, висота польоту, швидкість, температура повітря тощо, на витрати палива; це дозволяє авіакомпаніям оптимізувати маршрути та виробничі процеси для економії палива та зменшення витрат;

– прогнозування тривалості рейсу: регресійні моделі можуть допомагати в прогнозуванні часу в дорозі, враховуючи різні фактори, такі як маршрути, погода, технічний стан літака тощо; це важливо для точного планування рейсів та оптимізації розкладів;

– регресійних моделей може бути використаний для визначення взаємозв'язку між параметрами політної діяльності та технічним станом літаків; це допомагає авіакомпаніям виробляти планове обслуговування та ремонт, щоб підтримувати безпеку та надійність флоту;

– аналіз ефективності використання ресурсів: регресійні моделі допомагають в оцінці та прогнозуванні ефективності використання ресурсів, таких як час експлуатації літака, що впливає на вартість обслуговування та знос обладнання;

– оптимізація безпеки та надійності: аналіз регресійних моделей може виявити фактори, які впливають на безпеку та надійність авіаційних систем; це дозволяє приймати заходи для покращення безпеки авіаційних операцій.

Адитивна та мультиплікативна регресійні моделі є підтипами регресійних моделей, які врахо-

вують специфічні особливості залежності між змінними.

Адитивна регресійна модель виражає залежність між вихідною змінною (зазвичай позначеною як Y) та вхідними змінними (позначеними як X) як суму їх внесків. Математично це можна виразити наступною формулою:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon, \quad (1)$$

де Y – вихідна (залежна) змінна; X_1, X_2, \dots, X_n – вхідні (незалежні) змінні; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ – параметри моделі; ε – помилка моделі, яка враховує інші фактори, що не враховуються в моделі.

Мультиплікативна регресійна модель враховує залежність між змінними як добуток їх внесків. Формула мультиплікативної регресійної моделі може мати наступний вигляд:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon, \quad (2)$$

де Y – вихідна (залежна) змінна; X_1, X_2, \dots, X_n – вхідні (незалежні) змінні; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ – параметри моделі; ε – помилка моделі, яка враховує інші фактори, що не враховуються в моделі.

Як зазначалося вище, індекс авіаційних інцидентів – це статистичний показник, що використовується для оцінки рівня безпеки в авіації. Він може включати різні показники, такі як кількість інцидентів на певну кількість польотів або годин польоту, типи інцидентів та їх серйозність. Цей показник допомагає авіаційним організаціям, державам та іншим зацікавленим сторонам оцінювати тенденції у безпеці та вживати заходів для покращення безпеки в авіації.

У таблиці 1 подано вихідні дані для моделювання. Варто зазначити, що дана модель буде розглянута на прикладі авіаперевезень США.

Таблиця 1

Статистичні показники ринку авіаперевезень США зі світовим авіаційним індексом з брудними даними

Рік	Пасажиропотік, млрд пасс	Пасажирський збір, млрд дол США	Акти незаконного втручання	Індекс авіаційних інцидентів
2002	0,1253	0,9954	9	
2003	0,1257	1,1997		
2004	0,1413	1,6002		
2005	0,15	1,8663		
2006	0,1544	1,8558	17	
2007	0,1604	1,9598	22	
2008	0,1602	1,9201	21	
2009	0,1511	1,7560	16	
2010		1,8080	17	

Закінчення табл. 1

Рік	Пасажиропотік, млрд пасс	Пасажирський збір, млрд дол США	Акти незаконного втручання	Індекс авіаційних інцидентів
2011		1,8475	18	
2012		1,8777	18	3,1
2013	0,1811	1,8789	26	2,3
2014	0,1905	2,0870	27	3
2015	0,2039	3,5082	30	2,8
2016	0,2153	3,6942	31	2,1
2017	0,2269	3,8826	34	2,4
2018	0,2387	4,0985	37	2,6
2019	0,244	4,2632	42	2,9
2020	0,064	2,4566	4	2,14
2021	0,095	2,5108	5	1,98
2022	0,1894	3,7870	25	2,05

* червоним виділено відсутні дані, яких не було знайдено на момент моделювання

Для вирішення проблеми «брудних» даних була використана трендова апроксимація функції (за допомогою програмного продукту MS Excel), а саме:

– поліноміальна апроксимація для формування функції пасажиропотоку (рис. 1);



Рис. 1. Поліноміальна функція апроксимації пасажиропотоку

Використовуючи рівняння (3) було знайдено відсутні дані:

$$y = 0,0002x^2 - 0,9118x + 910,16 \quad (3)$$

$$R^2 = 0,9714$$

де y – змінна пасажиропотоку; x – змінна періоду вивчення ряду; R^2 – коефіцієнт детермінації, що характеризує точність моделі ($\geq 0,85$).

– поліноміальна апроксимація для формування функції актів незаконного втручання (рис. 2);

Використовуючи рівняння (4) було знайдено відсутні дані:

$$y = 0,1202x^2 - 480691x + 481227 \quad (4)$$

$$R^2 = 0,886$$

де y – змінна пасажиропотоку; x – змінна періоду вивчення ряду; R^2 – коефіцієнт детермінації, що характеризує точність моделі ($\geq 0,85$).

лінійна апроксимація для формування функції світового індексу авіаційних інцидентів (рис. 3).



Рис. 2. Поліноміальна функція апроксимації актів незаконного втручання

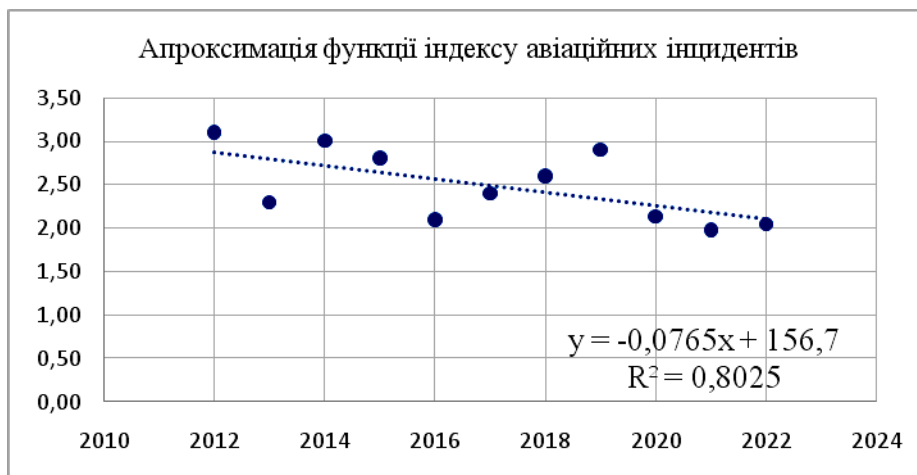


Рис. 3. Лінійна функція апроксимації індексу авіаційних інцидентів

Використовуючи рівняння (5) було знайдено де y – змінна пасажиропотоку; x – змінна періоду відсутні дані: вивчення ряду; R^2 – коефіцієнт детермінації, що характеризує точність моделі ($\geq 0,85$).

$$y = -0,0765x^2 + 156,7$$

$$R^2 = 0,8025$$

(5) Тоді таблиця вихідних даних для моделювання набуває виду, представленого в табл. 2.

Таблиця 2

Статистичні показники ринку авіаперевезень США зі світовим авіаційним індексом за 2002–2022 рік

Рік	Пасажиропотік, млрд пасс	Пасажирський збір, млрд дол США	Акти незаконного втручання	Індекс авіаційних інцидентів
2002	0,1253	0,9954	9	3,55
2003	0,1257	1,1997	10	3,47
2004	0,1413	1,6002	15	3,39
2005	0,1500	1,8663	16	3,32
2006	0,1544	1,8558	17	3,24
2007	0,1604	1,9598	22	3,16
2008	0,1602	1,9201	21	3,09
2009	0,1511	1,7560	16	3,01
2010	0,1122	1,8080	17	2,94
2011	0,1124	1,8475	18	2,86
2012	0,1125	1,8777	18	3,10
2013	0,1811	1,8789	26	2,30

Закінчення табл. 2

Рік	Пасажиропотік, млрд пасс	Пасажирський збір, млрд дол США	Акти незаконного втручання	Індекс авіаційних інцидентів
2014	0,1905	2,0870	27	3,00
2015	0,2039	3,5082	30	2,80
2016	0,2153	3,6942	31	2,10
2017	0,2269	3,8826	34	2,40
2018	0,2387	4,0985	37	2,60
2019	0,2440	4,2632	42	2,90
2020	0,0640	2,4566	4	2,14
2021	0,0950	2,5108	5	1,98
2022	0,1894	3,7870	25	2,05

Наступний крок – розробка математичної моделі адитивної лінійної регресії за допомогою програмного забезпечення RStudio.

RStudio – це інтегроване середовище розробки (IDE) для мови програмування R. Воно надає зручний інтерфейс для роботи з R, допомагаючи аналізувати дані, робити статистичні обчислення, візуалізувати результати, розробляти моделі та писати код.

RStudio має ряд корисних функцій, включаючи консоль R для виконання коду, вікно з фай-

лами та середовищем роботи, панелі для графічного відображення даних, інструменти для розробки графіків та діаграм, можливості роботи з пакетами R та багато іншого. Це популярне середовище для аналізу даних та статистики за допомогою мови програмування R.

Програмний код для моделі можна подати наступним чином (рис. 4). На рис. 5 представлена характеристика вибірки даних у програмному забезпеченні RStudio.

```
# installing the necessary packages for time series modeling
library(astsa)
library (forecast)
library (ggplot2)
library (readxl)
library (writexl)
library (GGally)

# input data for modeling
data <- read_xlsx (path = "/Users/kostya_chero/Desktop/data_AvIndex.xlsx")
head (data)
summary(data)
ggpairs(data)

# new dataset
data1 <- data[, -which(names(data) == "PassFlow")]

# Fit a multiple linear regression model
model <- lm(AUI ~ PassTax + AvIndex, data = data1)

# Display the summary of the regression model
summary(model)

# Diagnostic plots
par(mfrow=c(2,2))
plot(model)
```

Рис. 4. Програмний код адитивної лінійної регресії за допомогою програмного забезпечення RStudio

```
> summary(data)
```

AUI		PassFlow		PassTax		AvIndex	
Min.	: 4.00	Min.	: 0.0640	Min.	: 0.9954	Min.	: 1.140
1st Qu.	: 16.00	1st Qu.	: 0.1253	1st Qu.	: 1.8475	1st Qu.	: 2.600
Median	: 18.00	Median	: 0.1544	Median	: 1.9201	Median	: 3.011
Mean	: 20.95	Mean	: 0.1597	Mean	: 2.4216	Mean	: 2.792
3rd Qu.	: 27.00	3rd Qu.	: 0.1905	3rd Qu.	: 3.5082	3rd Qu.	: 3.212
Max.	: 42.00	Max.	: 0.2440	Max.	: 4.2632	Max.	: 3.547

Рис. 5. Характеристика вибірки даних у програмному забезпеченні RStudio

Перший крок для розробки моделі – оцінка колінеарності. Проблема мультиколінеарності виникає, коли у множинній регресії існує висока кореляція між двома чи більше незалежними змінними.

Це означає, що одна чи кілька змінних в моделі можуть бути лінійно залежними одна від одної.

Проблема мультиколінеарності може виникнути у таких випадках:

- висока кореляція між предикторами: коли дві чи більше незалежні змінні в моделі сильно корелюють між собою, це може призвести до проблеми мультиколінеарності;

- лінійна залежність між змінними: Якщо одна змінна може бути лінійно представлена як комбінація інших змінних, це також може лінійна залежність між змінними: Якщо одна змінна може бути лінійно представлена як комбінація інших змінних, це також може викликати мультиколінеарність;

- чисельна нестійкість: в деяких випадках, при обчисленні коефіцієнтів регресії можуть виникати чисельні нестійкості, особливо при використанні комп'ютерних методів. На рис. 6. наведено матрицю колінеарності та її графіки.

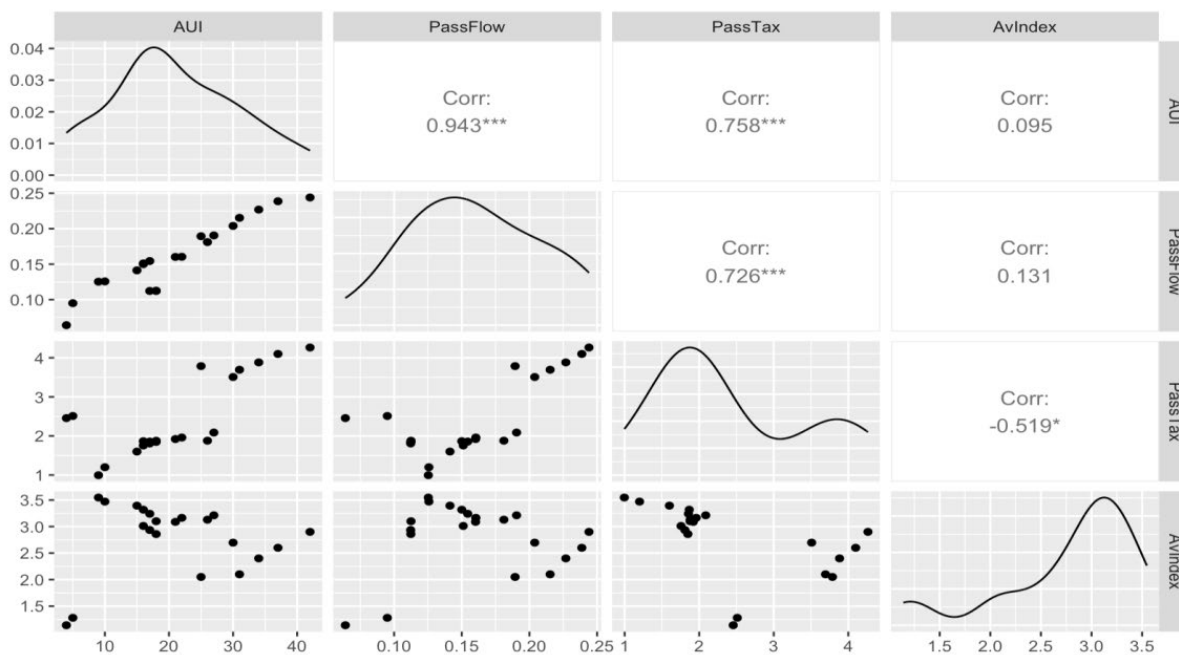


Рис. 6. Матриця колінеарності та її графіки

З рис. 6 видно, що існує висока ймовірність колінеарності між факторами пасажиропотоків та пасажирського збору (за умови, що колінеарність має значення 0,7). Таким чином, з моделі було виключено фактор пасажиропотоків.

Нова матриця колінеарності набуває наступного вигляду, що представлено на рис. 7.

На рис. 8 наведено розроблену модель в RStudio, яка набуває наступного вигляду:

З рис. 8 можна зробити наступні висновки:

- p -значення кожного фактору є статистично значущим, тобто, є меншим за значення p -value $\leq 0,05$; таким чином, ми можемо відкинути нульову гіпотезу про незалежність факторів – точність моделі складає 0,8907 ($\geq 0,85$), що свідчить про високу точність;

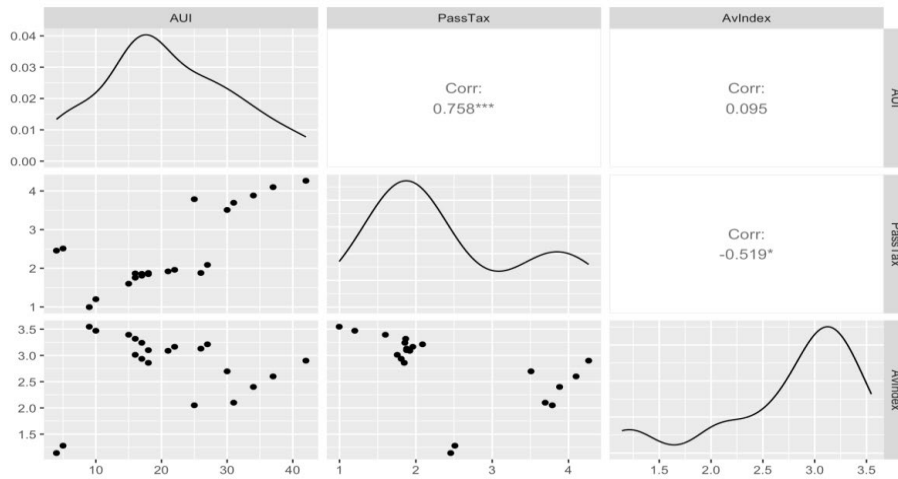


Рис. 7. Нова матриця колінеарності та її графіки

```
Call:
lm(formula = AUI ~ PassTax + AvIndex, data = data1)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-4.2185 -2.2153 -0.4069  2.4039  7.6690

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -34.7983    5.1866  -6.709 2.73e-06 ***
PassTax      11.2019    0.8765  12.780 1.82e-10 ***
AvIndex      10.2515    1.3258   7.733 3.96e-07 ***
---
Signif. codes:
  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 3.364 on 18 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9016,    Adjusted R-squared:  0.8907
F-statistic: 82.5 on 2 and 18 DF,  p-value: 8.62e-10
```

Рис. 8. Результат з розробки моделі множинної лінійної регресії

– розроблену множинну модель можна подати

$$y = -34,7983 + 11,2019 \cdot \alpha + 10,2515 \cdot \beta \quad (6)$$

де y – акти незаконного втручання (AUI); α – пасажирський збір (PassTax); β – світовий індекс

авіаційних інцидентів (AvIndex). Відповідно, діагностичні значення моделі наведені на рисунку 9, у математичному вигляді будуть мати наступний вид:

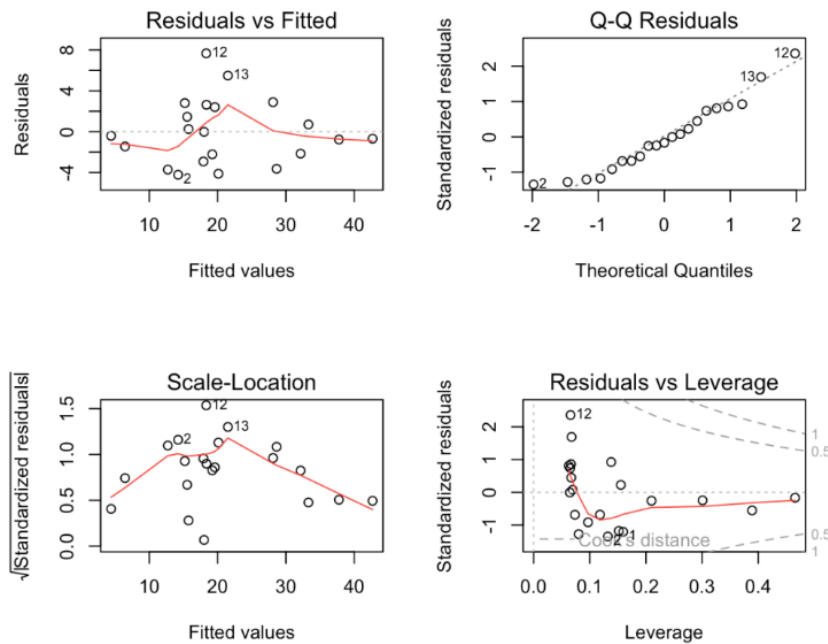


Рис. 9. Діагностичні значення моделі

Висновки

Отже, світовий індекс авіаційних інцидентів може слугувати важливим показником для оцінки рівня авіаційної безпеки. Також, з розробленої моделі можна зробити однозначний висновок про значущий вплив світового індексу авіаційних інцидентів на рівень авіаційної безпеки. А, зменшення цього індексу може свідчити про покращення безпеки в галузі авіації, оскільки це вказує на зменшення кількості авіаційних інцидентів або підвищення рівня їх управління.

Важливо вживати заходів для вивчення причин зростання індексу та вжиття відповідних заходів для покращення безпеки, таких як підвищення стандартів безпеки, вдосконалення навчання пілотів, розробка нових технологій безпеки тощо. Такий аналіз допомагає зрозуміти, як зростання індексу впливає на безпеку та які заходи можуть бути вжиті для зменшення ризиків у авіації.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Bugayko D., Isaienko V., Lischinskiy O., Sokolova N., Zamiar Z. Analysis of aviation safety system by fractal and statistical tools. *Logistics and Transport - Wrocław: International School of Logistics and Transport in Wrocław*. 2019. № 4 (44). P. 41–60. Web of Science. URL: <http://jeej.wunu.edu.ua/index.php/ukjee/article/download/1523/1514>
- [2] Marintseva K. V. Organization of the air transportation in the conditions of a terrorist threat: a problem statement. «AVIATION IN THE XXI-st CENTURY» (28 листопада 2019, Київ). К.: НАУ, 2019. С. 12.17–12.22. URL: <http://conference.nau.edu.ua/index.php/Congress/Congress2018/schedConf/presentations>
- [3] Cherednichenko K., Sokolova O., Ivannikova V. Mathematical Model of Airport Aviation Security. In the book: *TRANSBALTICA XIII: Transport Sciences and Technologies* (pp. 773–781). Publisher: Springer Cham February. 2023. URL: https://www.researchgate.net/publication/368690412_Mathematical_Model_of_Airport_Aviation_Security_Matematichna_model_aviacijnoi_bezpeki_aeroportu
- [4] Юн Г. М., Борець І. В., Валько А. М. Вимірність і суб'єктивність оцінок математичного моделювання при прогнозуванні рівня авіаційної безпеки. *Наукоємні технології*. 2019. № 3. DOI: 10.18372/2310-5461.43.13990
- [5] Valko A., Soloviova O., Volkovska G., Herasymenko I. Constructing a system of integrated management of aviation safety as a key element of airport service quality. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 4 (3(112)), p. 13–26.
- [6] McFarlane, P.: Developing a systems failure model for aviation security. *Saf. Sci.* 124, 104571(2020). <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.104571>.
- [7] Tamasi, J., Demichela, M.: Risk assessment techniques for civil aviation security. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 96, 892–899 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.03.0098>.
- [8] Соловійова О. О., Валько А. М. Передумови впровадження заходів безпеки в аеропорту. *Наукоємні технології*. 2020. № 3. С. 407–414. URL: <http://jrnل.nau.edu.ua/index.php/SBT/issue/current>
- [9] Валько А. М. Методи кількісної оцінки ризиків авіабезпеки. Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми організації перевезень та управління на повітряному транспорті» (26–27 жовтня 2023р, Київ). К.: НАУ, 2023. С. 122–127.
- [10] Wikipedia Лінійна регресія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Лінійна_регресія (access date 30/10/2023)

Валько А. М.

МНОЖИННА МОДЕЛЬ ЛІНІЙНОЇ РЕГРЕСІЇ АВІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ АЕРОПОРТУ

Безпека в аеропортах завжди має високий пріоритет. Вона включає в себе контроль пасажирів, багажу та транспортних засобів для запобігання можливим загрозам. Актуальність цих заходів не змінюється через постійні зміни в методах загроз та технологій їх запобігання.

В Конвенції про міжнародну організацію цивільної авіації (додаток 19) ІКАО було запропоновано "Управління безпекою польотів" в якому зазначені зміни глобального підходу до АНВ. Впровадження на глобальному, регіональному і державному рівнях містять сфери відповідальності організаційних структур, необхідних процедур політичних аспектів.

Однією з основних проблем аналізу безпеки є вибір відповідного математичного апарату. Відповідно, розвиток і аналіз управління даними авіабезпеки є тим важливим інструментом підвищення рівня контролю і прийняття рішень щодо процесів і процедур, що дозволить гарантувати позитивні результати при прийнятті найбільш ефективних управлінських рішень.

Модель лінійної регресії може бути корисною для аналізу деяких аспектів авіаційної безпеки в аеропортах. Наприклад, вона може бути використана для прогнозування попередньої ймовірності виникнення певних подій на основі певних факторів. За допомогою використання моделі лінійної регресії автором обґрунтовано вплив факторів (світовий авіаційний індекс безпеки, пасажиропотік та тарифи) на рівень авіаційної безпеки в аеро-

портах. Однак, безпека в авіації - це складне питання, яке включає в себе багато аспектів, тому для повного забезпечення безпеки може знадобитися комбінація різних моделей та підходів.

Ключові слова: аеропорт, авіаційна безпека, модель лінійної регресії, акт незаконного втручання, світовий авіаційний індекс безпеки, пасажиропотік та тарифи

Valko A.

MULTIPLE LINEAR REGRESSION MODEL OF AIRPORT AVIATION SECURITY

Airport security is always a high priority. It includes the control of passengers, luggage and vehicles to prevent possible threats. The relevance of these measures does not decrease due to constant changes in methods of threats and technologies for their prevention.

In the Convention on the International Organization of Civil Aviation (Appendix 19), the ICAO proposed "Management of Flight Safety" in which changes to the global approach to ANS are indicated. Implementation at the global, regional and state levels includes areas of responsibility of organizational structures, necessary procedures and political aspects.

One of the main problems of security analysis is the choice of the appropriate mathematical apparatus. Accordingly, the development and analysis of air safety data management is an important tool for increasing the level of control and decision-making regarding processes and procedures, which will guarantee positive results when making the most effective management decisions.

A linear regression model can be useful for analyzing some aspects of aviation security at airports. For example, it can be used to predict the prior probability of certain events based on certain factors. Using a linear regression model, the author substantiated the influence of factors (world aviation safety index, passenger traffic and tariffs) on the level of aviation safety at airports. However, safety in aviation is a complex issue that includes many aspects, therefore, to fully ensure safety, it may be necessary a combination of different models and approaches.

Keywords: airport, aviation security, linear regression model, act of unlawful interference, world aviation safety index, passenger flow and tariffs

Стаття надійшла до редакції 24.10.2023 р.
Прийнято до друку 19.12.2023 р.