

© С.М. Гапєєв¹, Г.А. Старушенко¹, Г.П. Іванова¹, М.О. Вигодін¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ЦИФРОВА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ІНВЕСТИЦІЙНОГО РИЗИКУ В ГАЛУЗІ ЕНЕРГЕТИКИ

© S. Hapiev¹, G. Starushenko¹, H. Ivanova¹, M. Vyhodin¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

DIGITAL MODEL FOR INVESTMENT RISK ASSESSMENT IN THE ENERGY SECTOR

Мета. Метою дослідження є побудова цифрової моделі і розробка комплексного алгоритму оцінки інвестиційного ризику в галузі енергетики для визначення ефективності інвестицій та мінімізації ризику банкрутства при інвестуванні за рахунок взятого під процент кредиту.

Методика. З математичної точки зору цифрова модель заснована на застосуванні нерівності Чебишева, узагальненої з урахуванням логарифмічно нормального закону розподілу випадкової величини ефективності інвестицій. Використовується строгий математичний апарат у поєднанні з імовірнісними оцінками та асимптотичним підходом. Чисельний аналіз ризикової моделі проведено у професійному математичному редакторі Maple 18.

Результати. Побудовано цифрову модель оцінки інвестиційного ризику і розроблено комплексний алгоритм її аналізу, що складається з таких основних етапів: кількісна оцінка мінімальної ймовірності ризику; визначення граничного значення відсотку за кредитом за умови мінімальної ймовірності ризику; оцінка області зміни математичного сподівання і середнього квадратичного відхилення ефективності інвестицій, в якій мінімізується ймовірність банкрутства; оцінка діапазону зміни середнього квадратичного відхилення ефективності інвестицій і кредитного відсотку, що мінімізує ймовірність банкрутства; чисельне й асимптотичне визначення максимального ризику. Знайдені і графічно проілюстровані кількісні оцінки ймовірності банкрутства при варіюванні параметрів логарифмічно нормального розподілу випадкової величини ефективності інвестицій.

Наукова новизна. Розроблено цифрову модель і комплексний алгоритм її оцінки, що поєднують сучасні методи математичного моделювання та цифрових технологій. Отримано аналітичні співвідношення та чисельні оцінки ймовірності ризику, що дозволяють мінімізувати ризик банкрутства в умовах кредитного інвестування.

Практична значимість. Результати дослідження можуть бути використані для оцінки інвестиційних ризиків у реальних проєктах енергетичної галузі, що сприятиме підвищенню ефективності прийняття рішень стосовно інвестиційних стратегій.

Ключові слова: інвестиційний ризик, цифрова модель, ймовірність банкрутства, нерівність Чебишева, логарифмічно нормальний розподіл, відсоток за кредитом, математичний редактор Maple 18.

Вступ. Збройна агресія Російської Федерації проти України, багаторазові широкомасштабні атаки на об'єкти енергетичної інфраструктури спричинили значну шкоду й великі збитки економіці нашої держави, вплинувши на всі сфери життєдіяльності: від опалення будинків та функціонування систем водозабезпечення – до онлайн-навчання, ведення бізнесу та діяльності системи охорони здоров'я.

За оцінками спеціалістів KSE Institute – аналітичного центру при Київській школі економіки – станом на травень 2024 року енергетичний сектор України зазнав прямих збитків (руйнування магістральних ліній електропередач, об'єктів генерації електроенергії, теплоелектростанцій, пошкодження нафтогазової інфраструктури) і непрямих фінансових втрат (розбір завалів, демонтажні роботи на зруйнованих і пошкоджених об'єктах, втрачені доходи енергетичних компаній) на суму \$56,2 млрд. Для повної реконструкції зруйнованих об'єктів, як визначено аналітичною командою KSE Institute, буде потрібно \$50,5 млрд [1].

З огляду на реалії сьогодення – велику кількість пошкоджених або знищених енергетичних потужностей – важливим є використання фінансових інструментів для залучення інвестицій у відновлення українського енергосектору і розвиток вітчизняної енергетики. Проте інвестиційна діяльність пов'язана зі сукупністю ризиків, вплив яких тим більш загострюється в умовах воєнного стану.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тенденції інвестування у сферу енергетики і пов'язані з цим проблеми ризиків інвестиційної діяльності широко висвітлюються в науковій літературі.

В статті [2] досліджуються інструменти інвестування у сферу відновлювальної енергетики в Україні. Обґрунтовано, що найбільш перспективним серед сучасних інвестиційних інструментів є «зелені» облігації, але для широкого впровадження такого виду фінансування необхідно здійснити ряд законодавчих та організаційних удосконалень. Вирішення цих питань створить нові можливості для залучення прямих іноземних інвестицій, що є критично важливими для відновлення економіки України в післявоєнний період. Автори публікації [3] одним із кардинальних трендів у світі визначають зростання обсягів інвестицій у відновлювальну енергетику. Розглянуто сучасні інструменти, що сприяють розвитку цього інвестиційного напрямку: «зелені» облігації, кошти від продажу яких спрямовуються виключно на фінансування проєктів і програм із відновлювальної енергетики; соціально-відповідальні інвестиційні фонди, які орієнтуються не тільки на фінансові, а й на екологічні та соціальні показники, що сприяє їх позитивному іміджу в інвесторів. Стаття [4] присвячена питанням впровадження відновлюваних джерел енергії у світі та особливостям їх використання для відновлення економіки України. Визначено вплив повномасштабної російської агресії на стан відновлюваної енергетики України, висвітлено основні напрями повоєнного відновлення нашої держави з використанням відновлюваних джерел енергії.

Встановлено, що диверсифікація енергопостачання в Україні шляхом інвестування у розвиток відновлюваної енергетики є перспективним напрямком уникнення ризику енергетичної залежності. В науковій праці [5] застосовано монографічний і кваліметричний методи для виявлення та систематизації найбільш перспективних і раціональних методів та форм інвестицій у розвиток відновлюваних джерел енергії. Розроблено пропозиції щодо активізації інвестиційного процесу в українській енергетичній системі.

В публікації [6] проаналізовано сутність інвестиційних ризиків як невід'ємної частини самої інвестиційної діяльності, проведено їх класифікацію,

визначено теоретичні аспекти для розробки методів оцінки ризиків і заходів стосовно зниження їх ступеня до прийнятних значень. Авторами роботи [7] засобами економіко-математичного моделювання надано оцінку інвестиційної привабливості альтернативної енергетики в Україні у сучасний час – в умовах воєнного стану. Побудовано чотирьохфакторну виробничу модель, яка враховує не лише фінансові показники, а й воєнні ризики. У статті [8] представлено ймовірно-статистичний метод кількісної оцінки ризику, який має місце при реалізації інвестиційних проєктів. Запропоновано критерій вибору інвестиційного проєкту з альтернативних за показником найменшого ступеня ризику. В науковій роботі [9] розглянуто функції ризиків та надано їх класифікацію: за часом; за характером наслідків; за ступенем ризику (величиною збитків). Визначено заходи, спрямовані на зниження ризиків та уникнення ризикових ситуацій. В статті [10] автором проведено якісний аналіз науково-методичних підходів до оцінки взаємозв'язку ризиків. Досліджено синергетичний вплив ризиків інвестиційного проєкту та класифіковано розподіл упорядкованих по групах видів ризиків за характеристиками відповідно до виду підприємства електрогенерації. За методом експертних оцінок проаналізовано синергетичний взаємний вплив ризиків інвестиційного проєкту для підприємств різних галузей: атомної, теплової та гідровідної електроенергетики. В науковій роботі [11] досліджено ризики інвестування в чисту енергетику, природу інфраструктурних інвестицій і пов'язані з ними додаткові специфічні ризики. Визначено, що ідентифікація та мінімізація цих ризиків сприятимуть підвищенню привабливості екологічно орієнтованих проєктів і допоможуть вирішити проблему залучення додаткових інвестицій в зелену енергетику.

Ключові ризики для роботи української енергетичної галузі визначені в Матеріалах робочої групи «Енергетична безпека» Проєкту Плану відновлення України [12]. Зокрема, в цьому документі зазначено, що передумовою для успішного повоєнного відновлення енергетичної галузі України є залучення значних інвестицій та забезпечення інвесторам привабливих умов для швидкої реалізації інвестиційних проєктів.

Попри велику кількість наукових публікацій стосовно аналізу інвестиційного ризику в енергетичній сфері, актуальним є питання щодо застосування для його якісної й кількісної оцінки засобів сучасних цифрових технологій.

Основна частина. Запропонована у роботі цифрова модель оцінки інвестиційного ризику в галузі енергетики з математичної точки зору заснована на використанні нерівності Чебишева, узагальненої з урахуванням закону розподілу випадкової величини ефективності інвестицій. Нерівність Чебишева дає можливість при будь-якому законі розподілу випадкової величини X оцінити ймовірність [13]:

$$P(|X - m_x| < \varepsilon) \geq 1 - \frac{D_x}{\varepsilon^2}, \quad (1)$$

де m_x – математичне сподівання випадкової величини X ; D_x – дисперсія, $D_x \leq \varepsilon^2$.

Якщо відомий закон розподілу випадкової величини X , то нерівність (1) перетворюється на строгу рівність [14].

Нерівність Чебишева може бути застосована у практиці ризик-менеджменту для оцінки ймовірності банкрутства. Якщо R – випадкова величина ефективності інвестицій, здійснюваних за рахунок кредиту, взятого під відсоток r_s , то нерівність Чебишева ймовірності банкрутства P_b перетворюється до вигляду [14]:

$$P_b \begin{cases} \leq \left(\frac{s_R}{m_R - r_s} \right)^2 & \text{при } m_R - r_s \geq s_R, \\ = 1 & \text{при } m_R - r_s \leq s_R \end{cases} \quad (2)$$

де m_R – математичне сподівання ефективності інвестицій, s_R – середнє квадратичне відхилення.

При цьому мають виконуватись умови:

а) раціональності використання кредитних коштів: $m_R > r_s$;

б) величина дисперсії не надто велика (1): $D_R \leq (m_R - r_s)^2$, або $s_R \leq m_R - r_s$.

Будемо вважати, що випадкова величина ефективності інвестицій R має логарифмічно нормальний (логнормальний) розподіл зі щільністю розподілу ймовірностей

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma r} e^{-\frac{(\ln r - a)^2}{2\sigma^2}}, \quad r > 0, \quad (3)$$

де $-\infty < a < \infty$, $\sigma > 0$ – параметри.

Якщо випадкова величина X розподілена за логнормальним законом, то її логарифм $\ln X = Y$ має нормальний розподіл з параметрами a , σ . Коли йдеться про інвестиції, доречно вважати, що доходності активів розподілені логнормально. Таке припущення має сенс при дослідженні фінансових ринків, оскільки доходності фінансових активів часто наближаються до нормального розподілу при розгляді логарифмів доходності, а не абсолютних величин. У моделях фінансових ринків логнормальний розподіл застосовується, наприклад, у моделях цін акцій чи інших активів. Якщо вважати, що доходності активів розподілені нормально, то це призводить до того, що самі ціни активів будуть мати логнормальний розподіл [15].

Банкрутство інвестора з математичної точки зору означає ймовірність того, що випадкова величина ефективності інвестицій R набуде значення, яке визначається умовою: $R < r_s$.

Перетворимо вираз функції щільності розподілу ймовірностей $f(r)$ (3), з урахуванням співвідношень для математичного сподівання m_R і дисперсії $D_R = s_R^2$

$$m_R = e^{a + \frac{\sigma^2}{2}}, \quad D_R = e^{2a + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1), \quad (4)$$

до вигляду:

$$f(r) = \frac{1}{2r\sqrt{\pi} \sqrt{\ln \frac{\sqrt{mR^2 + sR^2}}{mR}}} \exp \left(-\frac{\ln^2 r \frac{\sqrt{mR^2 + sR^2}}{mR}}{4 \ln \frac{\sqrt{mR^2 + sR^2}}{mR}} \right). \quad (5)$$

Тоді з урахуванням співвідношень (4), (5) і формули для ймовірності попадання випадкової величини X в заданий інтервал $[\alpha, \beta]$ [13]

$$P(\alpha < X < \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} f(x) dx, \quad (6)$$

отримуємо у випадку логнормального закону розподілу ефективності інвестицій вираз для ймовірності банкрутства P_b у вигляді:

$$P_b = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{\frac{1}{2} \frac{\ln \frac{m_R^2 (m_R - r_s)}{r_s \sqrt{m_R^2 + s_R^2}}}{\sqrt{\ln \frac{\sqrt{m_R^2 + s_R^2}}{m_R}}}}{2} \right), \quad (7)$$

де $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ – функція помилок [16].

В граничних випадках значень відсотка за кредит r_s зі співвідношення (7) відповідно отримуємо:

$$P_b \rightarrow 0 \text{ при } r_s \rightarrow 0; \quad P_b \rightarrow 1 \text{ при } r_s \rightarrow m_R. \quad (8)$$

Кількісний аналіз ризикової моделі (6) проведено в математичному редакторі Maple 18. На рис. 1 проілюстровано функцію ймовірності банкрутства (7) при фіксованому значенні відсотку за кредитом r_s (при розрахунках умовно прийнято $r_s = 10\%$).

Для порівняння, на рис. 2 показана функція ймовірності банкрутства (2), знайдена при $r_s = 10\%$ без урахування закону розподілу випадкової величини ефективності інвестицій R .

```
smartplot3d[mR,sR](1/2-(1/2)*erf((1/2)*ln(mR^2
*(mR-10)/(10*sqrt(mR^2+sR^2)))/sqrt(ln(sqrt(mR
^2+sR^2)/mR)))));
plots[:display](plots[:implicitplot3d](Pb=1,mR=5..10,
sR=0..10,Pb=0..1.1,style=polygon))
```

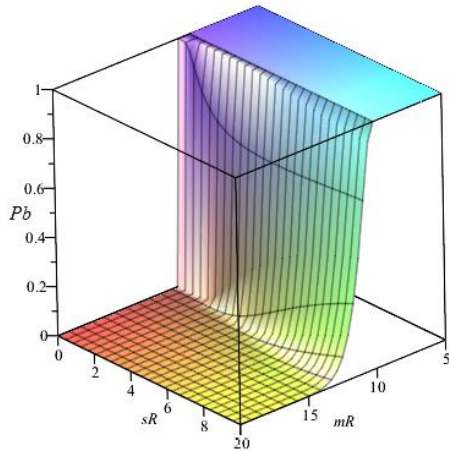


Рис. 1. Функція ймовірності банкрутства (7) при фіксованому значенні відсотку за кредитом $r_s = 10\%$

```
plots[:display](plots[:implicitplot3d](Pb=(sR/(mR-10))^2,mR=10..
20,sR=0..1,Pb=0..1,style=surface,numpoints=200000),
plots[:implicitplot3d](sR=mR-10,mR=10..11,sR=0..1,Pb=0..
1.1,color=orange,style=surfacecontour),plots[:implicitplot3d]
(Pb=1,mR=5..10,sR=0..1,Pb=0..1,style=polygon))
```

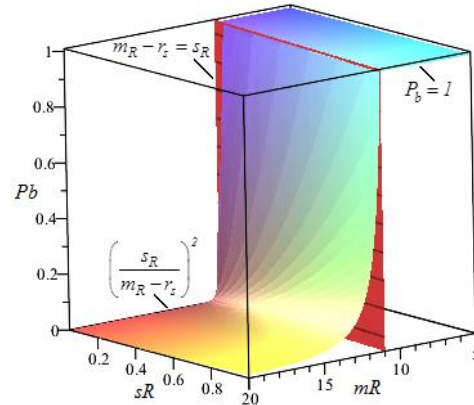
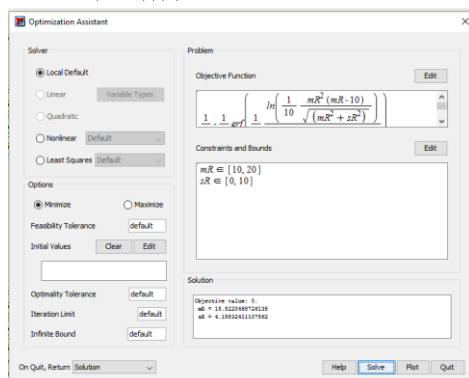


Рис. 2. Функція ймовірності банкрутства (2) при $r_s = 10\%$ без урахування закону розподілу випадкової величини ефективності інвестицій R

Алгоритм оцінки інвестиційного ризику за побудованою моделлю складається з таких етапів:

1) Кількісна оцінка мінімального ризику, тобто $P_b \rightarrow 0$, при значенні відсотку за кредитом $r_s = 10\%$ наведена на рис. 3. Як показують розрахунки, при $m_R = 15,8220$, $s_R = 4,1883$ ймовірність банкрутства вже практично дорівнює нулю. Графічна оцінка мінімального ризику при $r_s = 10\%$ проілюстрована на рис. 4.

```
Optimization[Interactive](1/2-(1/2)*erf((1/2)*ln(mR^2
*(mR-10)/(10*sqrt(mR^2+sR^2)))/sqrt(ln(sqrt(mR
^2+sR^2)/mR)))));
```



[0., [mR = 15.8220468726138, sR = 4.18832411107562]]

Рис. 3. Кількісна оцінка мінімального ризику

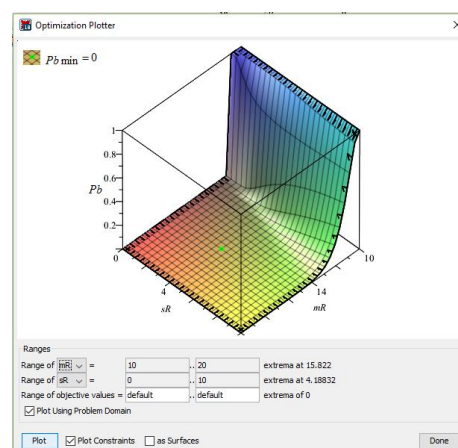
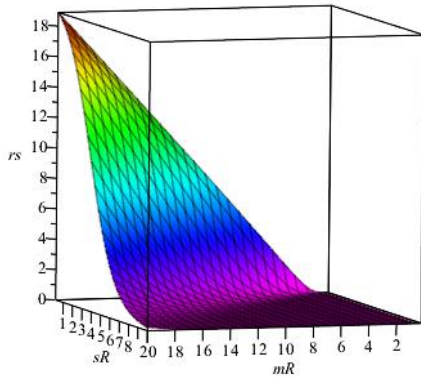


Рис. 4. Графічна оцінка мінімального ризику при значенні відсотку за кредитом $r_s = 10\%$

2) При мінімальній імовірності ризику $P_b \rightarrow 0$ залежність $r_s = f(m_R, s_R)$ представлена на рис. 5. За розрахунковими даними (рис. 6) маємо: $r_s = 18,9709$ при $m_R = 20 \gg s_R = 0,1$.

```
smartplot3d[mR,sR,rs](rs=mR^3/(exp(RootOf(erf((1/2)
*_Z*sqrt(2)/sqrt(ln((mR^2+sR^2)/mR^2))-1))
*_sqrt(mR^2+sR^2)+mR^2))
```



[18.9709438503362762, [mR = 20., sR = 0.1000000000000000]]

Рис. 5. Функція $r_s = f(m_R, s_R)$, яка відповідає мінімальній імовірності ризику

```
Optimization[Interactive](mR^3/(exp(RootOf(erf((1/2)
*_Z*sqrt(2)/sqrt(ln((mR^2+sR^2)/mR^2))-1))
*_sqrt(mR^2+sR^2)+mR^2))
```

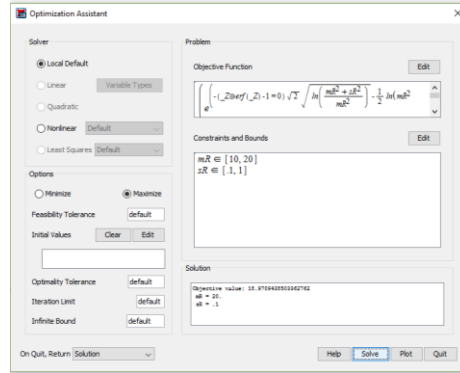


Рис. 6. Кількісна оцінка максимального відсотку за кредитом при $m_R = 20 \gg s_R = 0,1$

У граничному випадку $s_R \rightarrow 0$ отримуємо асимптотичне співвідношення:

$$r_s = \frac{m_R^2}{m_R + 1} + O(s_R) \text{ при } s_R \rightarrow 0. \quad (9)$$

3) На рис. 7 при мінімальній імовірності ризику $P_b \rightarrow 0$ представлені залежності $s_{Ri} = f(m_R, r_{si})$ при фіксованому значенні відсотку за кредитом r_{si} ($i = 1, 2, 3$): $r_{s1} = 10$; $r_{s2} = 15$; $r_{s3} = 20$. Наведені дані дають оцінки області зміни параметрів m_R і s_R , в якій при фіксованому відсотку за кредитом мінімізується ймовірність банкрутства.

4) На рис. 8 проілюстровані залежності $r_{si} = f(m_{Ri}, s_R)$ при мінімальній імовірності ризику $P_b \rightarrow 0$ і фіксованому значенні математичного сподівання ефективності інвестицій m_{Ri} ($i = 1, 2, 3$): $m_{R1} = 20$; $m_{R2} = 25$; $m_{R3} = 30$. Представлені області ілюструють зв'язок s_R і r_s щодо мінімізації ймовірності банкрутства при фіксованому математичному сподіванні ефективності інвестицій.

5) Чисельна оцінка максимального ризику $P_b \rightarrow 1$ при значенні відсотку за кредитом $r_s = 10\%$ представлена на рис. 9. За розрахунковими даними, при $m_R = 10,1780$, $s_R = 1,0000$ ймовірність банкрутства вже є практично достовірною подією.

```
smartplot[mR, sR]([ 1/2-(1/2)*erf((1/2)*ln(mR^2*(mR-10)/(10*sqrt(mR^2+sR^2))))/sqrt(ln(sqrt(mR^2+sR^2)/mR))=0, 1/2-(1/2)*erf((1/2)*ln(mR^2*(mR-15)/(15*sqrt(mR^2+sR^2))))/sqrt(ln(sqrt(mR^2+sR^2)/mR))=0, 1/2-(1/2)*erf((1/2)*ln(mR^2*(mR-20)/(20*sqrt(mR^2+sR^2))))/sqrt(ln(sqrt(mR^2+sR^2)/mR))=0 ])
```

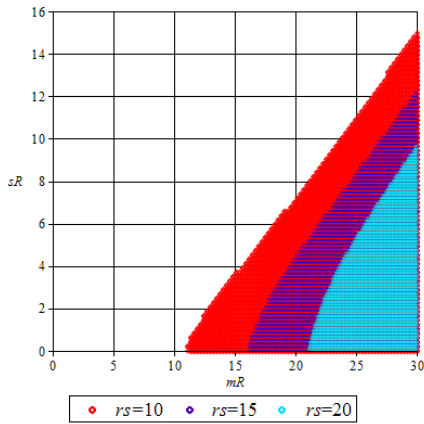


Рис. 7. Функції $s_{Ri} = f(m_R, r_{Si})$, за яких мінімізується ймовірність банкрутства

```
smartplot[rs, sR]([ 1/2-(1/2)*erf((1/2)*ln(20^2*(20-rs)/(rs*sqrt(20^2+sR^2))))/sqrt(ln((1/20)*sqrt(20^2+sR^2)))=0, 1/2-(1/2)*erf((1/2)*ln(25^2*(25-rs)/(rs*sqrt(25^2+sR^2))))/sqrt(ln((1/25)*sqrt(25^2+sR^2)))=0, 1/2-(1/2)*erf((1/2)*ln(30^2*(30-rs)/(rs*sqrt(30^2+sR^2))))/sqrt(ln((1/30)*sqrt(30^2+sR^2)))=0 ])
```

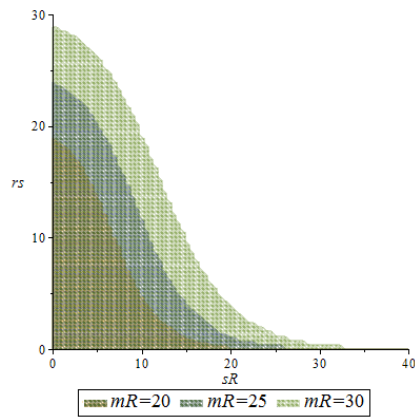
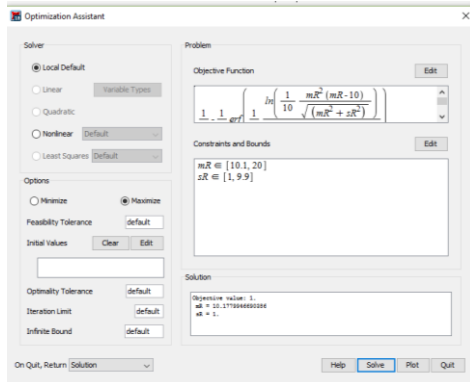


Рис. 8. Функції $r_{Si} = f(m_{Ri}, s_R)$, за яких мінімізується ймовірність банкрутства

Графічну оцінку максимального ризику при $r_s = 10\%$ надано на рис. 10.

```
Optimization[Interactive](1/2-(1/2)*erf((1/2)*ln(mR^2*(mR-10)/(10*sqrt(mR^2+sR^2))))/sqrt(ln(sqrt(mR^2+sR^2)/mR))=0, 1/2-(1/2)*erf((1/2)*ln(mR^2*(mR-15)/(15*sqrt(mR^2+sR^2))))/sqrt(ln(sqrt(mR^2+sR^2)/mR))=0, 1/2-(1/2)*erf((1/2)*ln(mR^2*(mR-20)/(20*sqrt(mR^2+sR^2))))/sqrt(ln(sqrt(mR^2+sR^2)/mR))=0 ])
```



[1., [mR = 10.1779946690386, sR = 1.]]

Рис. 9. Кількісна оцінка максимального ризику

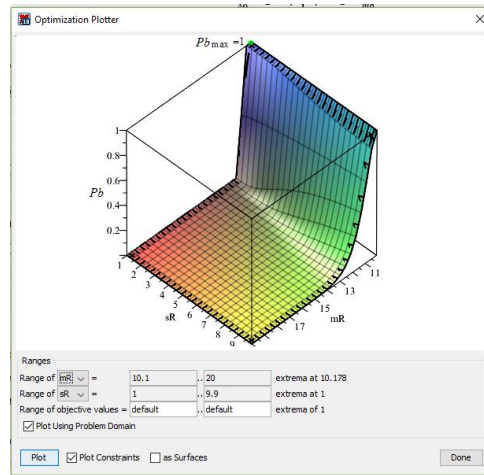


Рис. 10. Графічна оцінка максимального ризику при значенні відсотку за кредитом $r_s = 10\%$

При збільшенні кредитного відсотку ймовірність банкрутства закономірно збільшується і швидко прямує до 1 відповідно до асимптотичного розкладення: при :

$$P_b = 1 + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{m_R - r_s}{m_R \ln(m_R - r_s)} e^{-\left(\frac{m_R \ln(m_R - r_s)}{\sqrt{2}(m_R - r_s)}\right)^2} + \\ + O\left(\left(\frac{m_R - r_s}{\ln(m_R - r_s)}\right)^3 e^{-\left(\frac{m_R \ln(m_R - r_s)}{\sqrt{2}(m_R - r_s)}\right)^2}\right). \quad (10)$$

Зі співвідношень (2), (7) можна отримати вирази для функції ймовірності уникнення банкрутства P_{ub} :

– без урахування закону розподілу випадкової величини ефективності інвестицій R :

$$P_{ub} \begin{cases} \geq 1 - \left(\frac{s_R}{m_R - r_s}\right)^2 & \text{при } m_R - r_s \geq s_R; \\ = 0 & \text{при } m_R - r_s \leq s_R \end{cases} \quad (11)$$

– за умови логнормального розподілу випадкової величини ефективності інвестицій R :

$$P_{ub} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{\frac{1}{2} \frac{\ln \frac{m_R^2 (m_R - r_s)}{r_s \sqrt{m_R^2 + s_R^2}}}{\sqrt{\ln \frac{\sqrt{m_R^2 + s_R^2}}{m_R}}}}{\right). \quad (12)$$

Аналіз співвідношень (11), (12) може бути проведений по аналогічній розробленій вище схемі для функції ймовірності банкрутства P_b .

Висновки. Закон розподілу випадкової величини ефективності інвестицій суттєво впливає на ймовірність банкрутства (уникнення банкрутства) при інвестуванні за рахунок узятого під процент кредиту. Отже, щоб мінімізувати ризик банкрутства під час інвестування за рахунок кредитних коштів, при оцінці ефективності інвестицій необхідно враховувати їх закон розподілу.

Розроблена цифрова модель оцінки інвестиційного ризику в галузі енергетики дозволяє за допомогою сучасних цифрових технологій моделювати ризикові ситуації, визначати ефективність інвестицій із наданням їм адекватної кількісної оцінки та обирати оптимальну стратегію для зменшення ризику до прийнятного рівня. Модель дозволяє автоматизувати процес оцінки ризиків, що

значно скорочує час аналізу та підвищує точність прогнозування потенційних загроз. В цілому, запропонований підхід дозволяє інтегрувати цифрові технології у процес аналізу ризиків, що є важливим етапом у розвитку енергетичного сектору на засадах цифрової трансформації.

Результати дослідження дозволяють формувати більш точні прогнозні моделі, які можуть бути використані для подальшого вдосконалення методології управління ризиками в енергетичній галузі, враховуючи нестабільність ринкових умов.

Розроблений інструмент комплексного алгоритму оцінки інвестиційного ризику може бути застосований енергетичними компаніями, фінансовими аналітиками та державними структурами для обґрунтування інвестиційних стратегій.

Практична реалізація результатів дослідження сприятиме мінімізації фінансових втрат та підвищенню рівня безпеки інвестицій в енергетичному секторі, що є важливим кроком у розвитку сталої енергетичної системи в умовах повоєнного відновлення України.

Перелік посилань

1. Тарасовський, Ю. (2024). Збитки та втрати енергосектору України через війну перевищили \$56 млрд – KSE Institute. *Forbes Ukraine*. <https://forbes.ua/news/zbitki-ta-vtrati-energosektoru-ukraini-cherez-viynu-perevishchili-56-mlrd-kse-institute-10062024-21678>
2. Олексів, І. Б., & Дрібнюк, А. М. (2023). Аналіз сучасних інструментів інвестування у відновлювальну енергетику України. *Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення і проблеми розвитку*, 5(2), 315–325. <https://doi.org/10.23939/smeu2023.02.315>
3. Савченко, М. В., & Романець, Т. П. (2024). Інвестиції у відновлювальну енергетику: світові тренди та сучасні інструменти. *Бізнес Інформ*, 3, 23–30. <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2024-3-23-30>
4. Денисюк, С. П., Белоха, Г. С., Чернечук, І. С., & Лисий, В. В. (2022). Світові тенденції впровадження відновлюваних джерел енергії та особливості їх реалізації при відновленні економіки України. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 4, 7–23. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2022.273360>
5. Пріб, К. А. (2021). Інвестування в розвиток відновлюваних джерел енергії. *Наукові записки НаУКМА. Економічні науки*, 6(1), 111–116. <https://doi.org/10.18523/2519-4739.2021.6.1.111-116>
6. Ярьсько, Р. С. (2013). Сутність та класифікація ризиків інвестиційної діяльності енергетичних підприємств. *Інвестиції: практика та досвід*, 20, 62–64.
7. Бояринова, К. О., & Степанчук, К. С. (2023). Економіко-математичне моделювання інвестиційної привабливості альтернативної енергетики України в умовах воєнного стану. *Ефективна економіка*, 11. <https://doi.org/10.32702/2307-2105.2023.11.30>
8. Заярна, Н. М., & Гузеєва, А. А. (2006). Інвестиційний ризик та його кількісна оцінка. *Науковий вісник НЛТУ*, 16(6), 282–285.
9. Литвин, З. (2011). Деякі аспекти аналізу ризиків інвестиційних проектів. *Економічний аналіз*, 8(1), 432–434.
10. Ярьсько, Р. С. (2015). Синергетичний вплив ризиків інвестиційного проекту у розрізі видів електрогенерації. *Економічний вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*, 12, 253–258.
11. Крамарев, Г. В. (2013). Ризики при інвестуванні в чисту енергетику. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Економічні проблеми сталого розвитку», присвяченої пам'яті проф. Балацького О. Ф., І. Сумський державний університет*, 135–137.

12. Національна рада з відновлення України від наслідків війни (2022). *Проект Плану відновлення України. Матеріали робочої групи «Енергетична безпека»*. <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/energy-security.pdf>
13. Барковський, В. В., Барковська, Н. В., & Лопатін, О. К. (2010). *Теорія ймовірностей та математична статистика*. Центр учбової літератури.
14. Старушенко, Г. А., & Фургало, Д. Ю. (2023). Цифрова модель ризик-менеджменту оцінки ефективності інвестицій. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Цифрова трансформація та диджитал технології для сталого розвитку всіх галузей сучасної освіти, науки і практики»*, 3, Міжнародна академія прикладних наук (Польща), 236–243.
15. Шірінян, Е. А. (2024). *Розвиток ринку банківських послуг в Україні*. (Дис. доктора філософії у галузі управління та адміністрування). Державний податковий університет Міністерства фінансів України, Ірпінь.
16. Abramowitz, M., & Stegun, I. A. (Eds.). (1965). *Handbook of Mathematical Functions, with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. New York: Dover Publications.

ABSTRACT

Purpose. The purpose of the research is to develop a digital model and design a comprehensive algorithm for assessing investment risk in the energy sector to determine investment efficiency and minimize the risk of bankruptcy when investing with borrowed funds at an interest rate.

The methods. From a mathematical perspective, the digital model is based on the application of Chebyshev's inequality, generalized considering the lognormal distribution of the random variable of investment efficiency. A rigorous mathematical apparatus is used in combination with probabilistic estimates and an asymptotic approach. The numerical analysis of the risk model was carried out using the professional mathematical software Maple 18.

Findings. A digital model for investment risk assessment has been created and a comprehensive algorithm for its analysis has been developed, which consists of the following key stages: quantitative assessment of the minimum probability of risk; determination of the limiting value of the loan interest rate under the condition of the minimum probability of risk; evaluation of the range of variation in the mathematical expectation and standard deviation of investment efficiency, where the probability of bankruptcy is minimized; estimation of the range of variation in the standard deviation of investment efficiency and the loan interest rate that minimizes the probability of bankruptcy; numerical and asymptotic determination of the maximum risk. Quantitative estimates of bankruptcy probability have been obtained and graphically illustrated based on variations in the parameters of the lognormal distribution of the random variable of investment efficiency.

The originality. A digital model and a comprehensive algorithm for its evaluation have been developed, integrating modern methods of mathematical modelling and digital technologies. Analytical relationships and numerical estimates of risk probability have been obtained, allowing for the minimization of bankruptcy risk under credit investment conditions.

Practical implementation. The research results can be used to assess investment risks in real energy sector projects, which will contribute to increasing the efficiency of decision-making regarding investment strategies.

Keywords: investment risk, digital model, bankruptcy probability, Chebyshev's inequality, lognormal distribution, loan interest rate, mathematical software Maple 18.