

## СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ТА РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ, НАБЛИЖЕНИХ ДО РЕАЛІЙ ВОЄННОГО СЬОГОДЕННЯ

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

Проаналізовано розділ «Енергетична безпека» з «Проекту Плану відновлення України», запропонованого у 2022 році Національною радою з відновлення України, з яким можна ознайомитись за електронною адресою: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/restoration-and-development-of-infrastructure.pdf>. Встановлено, що детерміновані моделі процесу відновлення та розвитку енергетики України, які запропоновані в цьому Проекті у вигляді діаграм і трансформовані авторами в математичні структури за допомогою комп'ютерної програми, не відповідають реаліям воєнного сьогодення, а тому вимагають корекції. Показано, що для врахування реалій воєнного сьогодення у запропоновані детерміновані моделі необхідно вносити стохастичну складову, для реалізації якої доцільно використати методику генерації імпульсів стаціонарного «білого шуму» з параметрами, обчисленими за оцінками ступеня руйнації об'єктів енергетичної інфраструктури з використанням запропонованої у цій статті комп'ютерної програми. Обґрунтовано, що адекватнішими моделями процесу відновлення та розвитку електроенергетики України є авторегресійні моделі, порядок яких, визначається, враховуючи реальні терміни відновлення об'єктів енергетичної інфраструктури, а для визначення вагових коефіцієнтів застосовується методика Юла–Уокера з її реалізацією у вигляді комп'ютерної програми, розробленої авторами цієї статті, але розміщеної в попередній роботі, вказаній в списку використаної літератури до цієї статті під номером 7.

**Ключові слова:** Проект Плану, процес відновлення та розвитку, електроенергетика України, детерміновані математичні моделі, корекція, умови воєнного сьогодення, авторегресійна модель.

### Вихідні передумови та постановка задачі

В роботі [1], з планування відновлення та розвитку енергетики України, її автори запропонували три варіанти моделі для різних сценаріїв: сценарію максимуму економічної ефективності (СМЕЕ), референтного сценарію (РС) та сценарію кліматично нейтральної економіки (СКНЕ). Графічно моделі цих варіантів у вигляді діаграм показані на рис. 1 для відновлення та розвитку потужностей генерації електричної енергії, а на рис. 2 для відновлення та розвитку обсягів споживання електричної енергії.

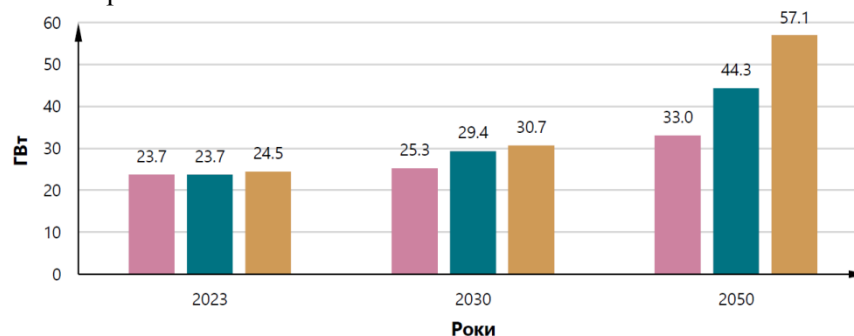


Рис. 1. Прогнозний максимум навантаження споживачів за сценаріями СМЕЕ, РС та СКНЕ на 2023, 2030 та 2050 роки (без урахування потужності технологій «Power-to-X»), який в задачі системного аналізу може бути прирівняним до прогнозного максимуму потужностей генерації електричної енергії усіма її джерелами

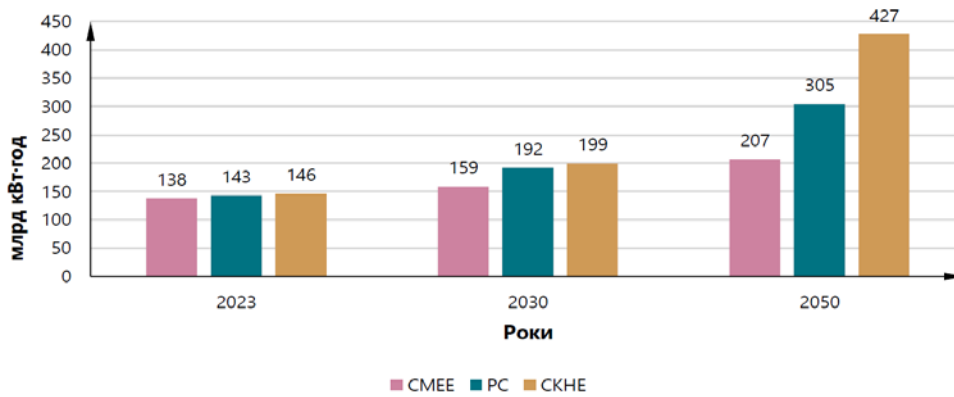


Рис. 2. Прогнозний попит на електричну енергію в Україні за сценаріями CMEE, PC та SKNE на 2023, 2030 та 2050 роки

І першим, що впадає у око, під час аналізу цих варіантів, є те, що вони запропоновані в детермінованій інтерпретації, що ніяк не узгоджується з реаліями воєнного сьогодення з його погано передбачуваними наслідками ворожих бомбардувань енергетичної інфраструктури України та не менш погано передбачуваними обсягами надходжень коштів і обладнання, необхідних для відновлення та подальшого розвитку цієї інфраструктури у воєнний та післявоєнний періоди, тривалість яких нині також є погано передбачуваною. А тому усі три варіанти моделей відновлення та розвитку енергетики України, що запропоновані в роботі [1], потребують корекції.

А другою очевидною обставиною є те, що вони стартують з 2023 року з урахуванням лише того, що (як показано на рис. 3, теж взятого з роботи [1] разом з цитатою) «близько 4 % генеруючої потужності зруйновано під час бойових дій, ще 35 % потужності знаходиться на окупованих територіях. Зокрема, найбільша в Європі АЕС (Запорізька) працює в енергосистемі України, але знаходиться під постійним тиском російських окупантів. Виробнича потужність цієї станції складає 6000 МВт, або 43 % від загальної потужності усіх українських атомних електростанцій. Загалом зруйновано або знаходяться на окупованих територіях близько 50 % теплової генерації, 30 % сонячної генерації та понад 90 % вітрогенерації», — кінець цитати.

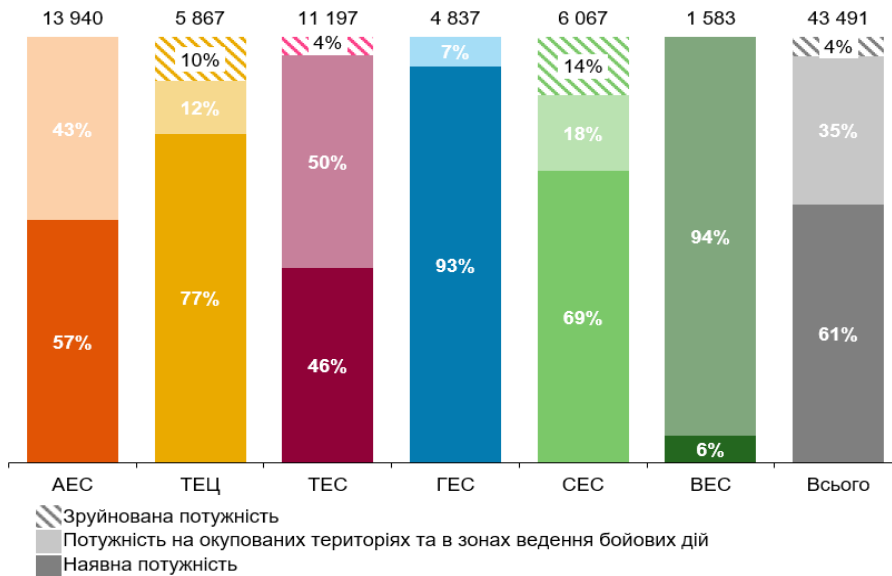


Рис. 3. Втрати енергетичної інфраструктури України станом на 2023 рік, що враховані під час моделювання сценаріїв CMEE, PC та SKNE в плані відновлення та розвитку енергетики України

Але, як відомо, нині від ЗАЕС в енергосистему України електроенергія не надходить зовсім і невідомо в якому стані вона повернеться в енергетичну інфраструктуру нашої держави після видворення російських окупантів.

А отже, і як це уже зазначено в нашій роботі [2] з посиланням на інформацію від Ольги Буславець [3], яку вона щотижня оновлює, стан енергетичної структури України у 2023 році був суттєво гіршим, ніж це враховано в роботі [1]. А тому моделі процесу відновлення та розвитку енергетики України, що запропоновані в роботі [1], потребують корекції ще і з цієї причини.

Тож метою цієї роботи є синтез математичних моделей процесу відновлення та розвитку електроенергетики України, наближених до реалій воєнного сьогодення.

### Розв'язання поставленої задачі

Почнемо розв'язання поставленої задачі з трансформації детермінованих моделей процесу відновлення та розвитку енергетики України, запропонованих в роботі [1] у формі діаграм, які для наочності і зручності у використанні відтворені нами на рис. 1 та рис. 2, в математичні моделі, виражені функціонально, які, як легко бачити з цих рисунків, мають параболічний характер, а ці параболи в загальному вигляді, якщо початок відліку у 2023 році прийняти за нуль по осі часу  $t$ , а час вимірювати в кварталах, можуть бути заданими у формі

$$y_i(t) = a_i + b_i t + c_i t^2, \quad i = 0, 1, 2 \quad (1)$$

для діаграми рис. 1 та у формі

$$w_i(t) = d_i + e_i t + g_i t^2, \quad i = 0, 1, 2 \quad (2)$$

для діаграми рис. 2.

У моделях (1), (2): індекс  $i = 0$  — варіант СМЕЕ, індекс  $i = 1$  — варіант РС, індекс  $i = 2$  — варіант СКНЕ,  $y_i$  — максимум навантаження споживачів, прирівняний до максимуму потужності генерації електроенергії усіма її джерелами, вимірюваної в ГВт,  $w_i$  — попит на електричну енергію усіма її споживачами, вимірюваний в млрд.кВт-год.

Оскільки математичні моделі (1), (2) задані в детермінованій формі, то для обчислення їхніх параметрів  $p_i = \{a_i, b_i, c_i, (i = 0, 1, 2)\}$  та параметрів  $q_i = \{d_i, e_i, g_i, (i = 0, 1, 2)\}$  по кожному з варіантів необхідно розв'язувати задачу інтерполяції [4], яка у нашому випадку зводиться до розв'язання системи трьох алгебраїчних рівнянь з трьома невідомими, заданими у формі

$$T p_i = y_i, \quad i = 0, 1, 2; \quad (3)$$

$$T q_i = w_i, \quad i = 0, 1, 2, \quad (4)$$

в яких (з урахуванням того, що по відношенню до 2023 року рік 2030, виражений в кварталах, становитиме  $(2030 - 2023) \cdot 4 = 28$ , а рік 2050, виражений в кварталах, становитиме  $(2050 - 2023) \cdot 4 = 108$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 28 & 28^2 \\ 1 & 108 & 108^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 28 & 784 \\ 1 & 108 & 11664 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$p_i = \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \end{bmatrix}, \quad i = 0, 1, 2; \quad q_i = \begin{bmatrix} d_i \\ e_i \\ g_i \end{bmatrix}, \quad i = 0, 1, 2; \quad (6)$$

$$y_0 = \begin{bmatrix} 23,7 \\ 25,3 \\ 33,0 \end{bmatrix}; \quad y_1 = \begin{bmatrix} 23,7 \\ 29,4 \\ 44,3 \end{bmatrix}; \quad y_2 = \begin{bmatrix} 24,5 \\ 30,7 \\ 57,1 \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$w_0 = \begin{bmatrix} 138,0 \\ 159,0 \\ 207,0 \end{bmatrix}; \quad w_1 = \begin{bmatrix} 143,0 \\ 192,0 \\ 305,0 \end{bmatrix}; \quad w_2 = \begin{bmatrix} 146,0 \\ 199,0 \\ 427,0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Як відомо, зокрема з роботи [4], розв'язок рівнянь (3), (4) має вигляд:

$$p_i = T^{-1} y_i, \quad i = 0, 1, 2; \quad (9)$$

$$q_i = T^{-1} w_i, \quad i = 0, 1, 2, \quad (10)$$

де  $T^{-1}$  — матриця, обернена до матриці  $T$ , заданої виразом (5).

Знаходити розв'язки (9), (10) матричних рівнянь (3), (4) пропонуємо за допомогою ком-

п'ютерної програми 1, написаної мовою Python з використанням методичних рекомендацій, наведених в роботі [5]. Ця комп'ютерна програма має такий вигляд:

### Програма 1

```
import sympy
from sympy import*
T=symbols('T')
p=symbols('p:3')
a=symbols('a:3')
b=symbols('b:3')
c=symbols('c:3')
y=symbols('y:3')
p0=Matrix([[a[0]], [b[0]], [c[0]]])
y0=Matrix([[23.7], [25.3], [33.0]])
p1=Matrix([[a[1]], [b[1]], [c[1]]])
y1=Matrix([[23.7], [29.4], [44.3]])
p2=Matrix([[a[2]], [b[2]], [c[2]]])
y2=Matrix([[24.5, 31.7, 57.1]])
T=Matrix([[1, 0, 0], [1, 28, 784],
[1, 108, 11664]])
T1=T**(-1)
p0=T1*y0
p1=T1*y1
p2=T1*y2
t= symbols('t')
y0t=Function('y0t')(t)
y1t=Function('y1t')(t)
y2t=Function('y2t')(t)
y0t=p0[0]+p0[1]*t+p0[2]*t**2
print(y0t)
y1t=p1[0]+p1[1]*t+p1[2]*t**2
print(y1t)
y2t=p2[0]+p2[1]*t+p2[2]*t**2
print(y2t)

q=symbols('q:3')
d=symbols('d:3')
e=symbols('e:3')
g=symbols('g:3')
w=symbols('w:3')
q0=Matrix([[d[0]], [e[0]], [g[0]]])
w0=Matrix([[138.0, 159.0, 207.0]])
q1=Matrix([[d[1]], [e[1]], [g[1]]])
w1=Matrix([[143.0, 192.0, 305.0]])
q2=Matrix([[d[2]], [e[2]], [g[2]]])
w2=Matrix([[146.0, 199.0, 427.0]])
q0=T1*w0
q1=T1*w1
q2=T1*w2
w0t=Function('w0t')(t)
w1t=Function('w1t')(t)
w2t=Function('w2t')(t)
w0t=q0[0]+q0[1]*t+q0[2]*t**2
print(w0t)
w1t=q1[0]+q1[1]*t+q1[2]*t**2
print(w1t)
w2t=q2[0]+q2[1]*t+q2[2]*t**2
print(w2t)
plot(w0t, w1t, w2t, (t, 0, 108))
runfile('C:/ProgramData/
Anaconda3/Lib/site-packages
/sympy/concrete/untitled5.py', wdir=
'C:/ProgramData/Anaconda3/Lib/site-
packages/sympy/concrete')
Кінець програми обчислення
```

$\text{plot}(y0t, y1t, y2t, (t, 0, 108))$  розв'язків (9), (10) записано конструкціями у формі (1.0)—(1.2) для математичної моделі, заданої в загальному вигляді виразом (1), та у формі (2.0)—(2.2) для математичної моделі, заданої в загальному вигляді виразом (2)

$$y0t = 0,000362103174603175*t**2 + 0,0470039682539683*t + 23,7; \quad (1.0)$$

$$y1t = -0,000160383597883598*t**2 + 0,208062169312169*t + 23,7; \quad (1.1)$$

$$y2t = 0,000558862433862434*t**2 + 0,241494708994709*t + 24,5; \quad (1.2)$$

$$w0t = -0,00138888888888889*t**2 + 0,78888888888889*t + 138,0; \quad (2.0)$$

$$w1t = -0,003125*t**2 + 1,8375*t + 143,0; \quad (2.1)$$

$$w2t = 0,00886243386243386*t**2 + 1,644708994709*t + 146,0 \quad (2.2)$$

Графічна інтерпретація цих розв'язків показана на рис. 4.

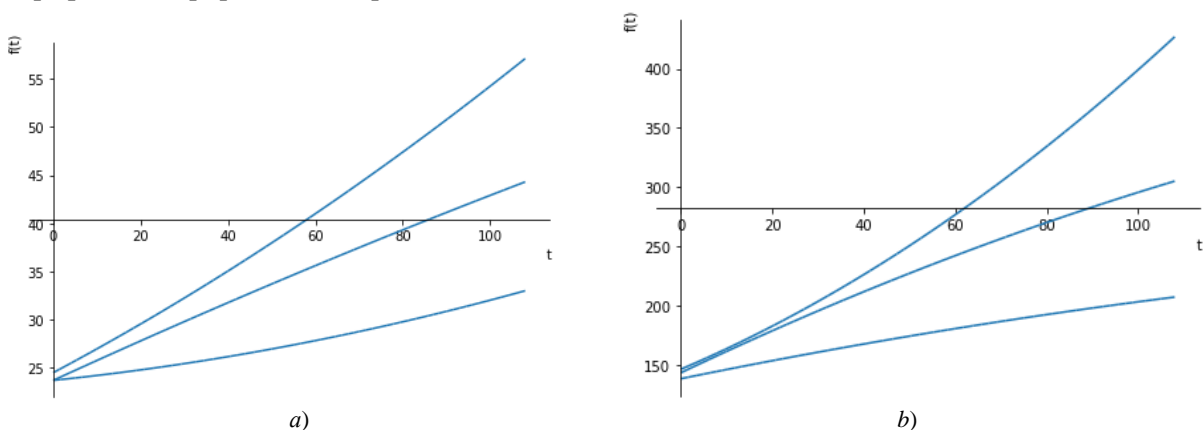


Рис. 4. Графіки математичних моделей прогнозного зростання *a* — максимуму навантаження споживачів; *b* — прогнозного зростання попиту на електричну енергію в Україні за сценаріями СМЕЕ, РС та СКНЕ на 2023, 2030 та 2050 роки

А далі звернемо увагу на рис. 3, перенесений нами з роботи [1].

З діаграм, показаних на цьому рисунку, випливає, що в планах відновлення і розвитку енергетики України на період до 2050 року враховано те, що станом на 2023 рік 39 % потужностей генерації електроенергії в Україні електроенергію не виробляли. Але, стартувавши від 61 % потужностей генерації електроенергії в Україні, які станом на 2023 рік виробляли електроенергію, в подальшому автори планів процесу відновлення та розвитку енергетики України заклали в ці плани детермінований характер цього процесу, що насправді не відповідає його стохастичному характеру, обумовленому тим, що руйнування енергетичної інфраструктури в умовах воєнного сьогодення продовжуватимуться і після 2023 року, як це показано в роботах Ольги Буславець, одна з яких, а саме робота [3], подана нами в списку використаної літератури. Більше того, стохастичний і водночас нестационарний характер процесу відновлення енергетики України матиме місце і після закінчення воєнних дій протягом досить тривалого часу, оскільки ті об'єкти, що були частково зруйновані і під час війни підтримувались в режимі, принаймні, хоча б часткової генерації і передачі електроенергії, необхідно буде вивести з експлуатації і замість них увести побудовані заново, що в умовах дефіциту коштів і необхідності імпортувати потрібне обладнання з інших країн зриватиме будь-які детерміновані терміни введення в експлуатацію цих об'єктів. А тому необхідно цю нестационарну стохастичність врахувати в моделях процесу відновлення та розвитку енергетики України, що, на наш погляд, можна реалізувати у вигляді концепції переходу від детермінованих моделей (1.0)—(1.2), (2.0)—(2.2) до авторегресійних моделей, викладенню основних етапів якої ми і розглянемо далі.

І на першому етапі реалізації цієї концепції ми деформуємо на відрізок часу  $T_{sp}$  детерміновані графіки, показані на рис. 4, введенням до них стохастичних складових у вигляді стаціонарного «білого шуму» з нульовим середнім, імпульси якого генеруватимуться комп'ютерною програмою, написаною мовою Python, в межах заданої нами полоси значень, додаткової до детермінанти у 39 %, тобто в межах від  $-1,185$  до  $+1,185$  для графіка на рис. 4a і в межах від  $-6,9$  до  $+6,9$  для графіка на рис. 4b.

Одразу ж зазначимо, що, виконуючи розрахунки цих меж, ми врахували інформацію з роботи [3] Ольги Буславець, згідно з якою втрати і потужності і споживаної електроенергії в бік їхнього збільшення складають у 2023 році додатково до детермінанти у 39 %, закладеної в моделі, що запропоновані авторами роботи [1], ще приблизно 10 %, а тому нижні межі полоси значень імпульсів стаціонарного «білого шуму» допустимо обчислювати зі співвідношень

$$y_{in} = -23,7 \frac{0,1}{2} = -1,185;$$

$$w_{in} = -138 \frac{0,1}{2} = -6,9,$$

а верхні межі — зі співвідношень

$$y_{iv} = +23,7 \frac{0,1}{2} = +1,185;$$

$$w_{iv} = +138 \frac{0,1}{2} = +6,9.$$

До цього ж першого етапу нашої концепції віднесемо і визначення часового відрізка  $T_{sp}$ , визначеного в кварталах, на якому буде здійснено спотворення стаціонарним «білим шумом» детермінованих моделей. Цей відрізок визначимо, беручи до уваги таке: вважатимемо, що війна з окупантами триватиме ще увесь 2024 та 2025 роки, а потім ще 5 років, тобто до 2030 року включно, потрібно буде в «зашумлених» умовах відновлювати зруйновану енергетику України. Тому моделювати процес після 2025 року варто теж у визначених на першому етапі умовах. Тож вважатимемо, що  $T_{sp} = 30$ .

Отже, спотворення графіків детермінованих моделей, розроблених авторами роботи [1], стаціонарним «білим шумом» на часовому відрізку  $T_{sp}$  у визначених нами за використання робіт Ольги Буславець межах  $[y_{in}, y_{iv}]$ ,  $[w_{in}, w_{iv}]$  є першим етапом реалізації нашої концепції синтезу математичних моделей процесу відновлення та розвитку електроенергетики України, наближених до реалій воєнного сьогодення. І цей перший етап нашої концепції реалізуємо комп'ютерною програмою 2, створеною авторами за використання мови Python. Ця комп'ютерна програма має такий вигляд:

*Програма 2*

```

import numpy
from numpy import*
Tsp=30
yin=-1.185;yiv=1.185
win=-6.9;wiv=6.9
t=linspace(0,30,31)
def f1(t):
    return 0.000362103174603175*t**2 + 0.0470039682539683*t + 23.7
def f2(t):
    return -0.000160383597883598*t**2 + 0.208062169312169*t + 23.7
def f3(t):
    return 0.000558862433862434*t**2 + 0.241494708994709*t + 24.5
def f4(t):
    return -0.00138888888888889*t**2 + 0.7888888888889*t + 138.0
def f5(t):
    return -0.003125*t**2 + 1.8375*t + 143.0
def f6(t):
    return 0.00886243386243386*t**2 + 1.644708994709*t + 146.0
f1vec=vectorize(f1)          g1=random.uniform(yin,yiv,31)
f11=f1vec(t)                g2=random.uniform(win,wiv,31)
f2vec=vectorize(f2)        f111=f11-g1
f22=f2vec(t)                f222=f22-g1
f3vec=vectorize(f3)        f333=f33-g1
f33=f3vec(t)                f444=f44-g2
f4vec=vectorize(f4)        f555=f55-g2
f44=f4vec(t)                f666=f66-g2
f5vec=vectorize(f5)        import matplotlib
f55=f5vec(t)                import matplotlib.pyplot as plt
f6vec=vectorize(f6)        plt.plot(t,f111,t,f222,t,f333)
f66=f6vec(t)                plt.plot(t,f444,t,f555,t,f666)

```

А на другому етапі реалізації нашої концепції ми пропонуємо замість детермінованих моделей використовувати для моделювання процесу відновлення та розвитку енергетики України авторегресійні моделі 3-го порядку, а оскільки, як видно з рис. 4, цей процес є не лише стохастичним, але і нестационарним, то його авторегресійні моделі синтезуватимемо у формі АРПКС(3,0,1), тобто у вигляді

$$y_i^*[k] = y_i[k] - y_i[k-1]; \quad y_i[k] = y_i[0] + \sum_{j=1}^k y_i^*[j],$$

$$k = 1, 2, \dots, N_{sp}, \quad j = 1, 2, \dots, k, \quad i = 0, 1, 2; \quad (11)$$

$$y_i^*[k] = p_{1i} y_i^*[k-1] + p_{2i} y_i^*[k-2] + p_{3i} y_i^*[k-3] + u_i;$$

$$w_i^*[k] = w[k] - w_i[k-1]; \quad w_i[k] = w_i[0] + \sum_{j=1}^k w_i^*[j],$$

$$k = 1, 2, \dots, N_{sp}, \quad j = 1, 2, \dots, k, \quad i = 0, 1, 2; \quad (12)$$

$$w_i^*[k] = q_{1i} w_i^*[k-1] + q_{2i} w_i^*[k-2] + q_{3i} w_i^*[k-3] + v_i[k],$$

використання яких при моделюванні після їхньої ідентифікації з нашого погляду точніше наблизитимуть процес прогнозування відновлення та розвитку енергетики України до реалій воєнного сьогодення та післявоєнної доби, а ніж детерміновані моделі цього процесу, що запропоновані в роботі [1] та трансформовані нами вище у відповідні детерміновані математичні конструкції (1.0)—(1.2), (2.0)—(2.2).

Щодо авторегресійних моделей (11), (12) зауважимо, що вагові коефіцієнти  $p_{1i}, p_{2i}, p_{3i}, q_{1i}, q_{2i}, q_{3i}$  в них потрібно визначати з використанням методики Юла–Уокера, теорія якої викладена у роботі [6], а приклад застосування — у роботі [7]. Що ж до імпульсів «білого шуму»,  $u_i, v_i$ , то їх потрібно генерувати у діапазоні значень, що задаються новими межами

$[y_{ina}, y_{iva}]$ ,  $[w_{ina}, w_{iva}]$ , які потрібно визначати теж за методикою Юла–Уокера. А вибір нами 3-го порядку авторегресій (11), (12) обумовлений тим, що за квартального відліку часу відновлення об'єктів енергетичної інфраструктури в аналізованому кварталі залежатиме і від того, в якому стані ці об'єкти були в трьох попередніх кварталах, адже для відновлення суттєво зруйнованих джерел теплової генерації ремонтно-відновлювальні роботи можуть тривати упродовж часу в межах до трьох кварталів.

Наводити комп'ютерну програму мовою Python для реалізації другого етапу нашої концепції на сторінках цієї статті ми не будемо, оскільки вона уже створена у вигляді програми 32 у нашій роботі [7], тож для ідентифікації регресійних моделей (11), (12) і прогнозування потужностей генерації та витрат електроенергії в роки після 2030 року доцільно використовувати саме цю комп'ютерну програму, замінивши в ній масиви вхідних даних масивами, що позначені у нашій програмі 2 символами f111, f222, f333, f444, f555, f666, за використання яких побудовані графіки на рис. 5.

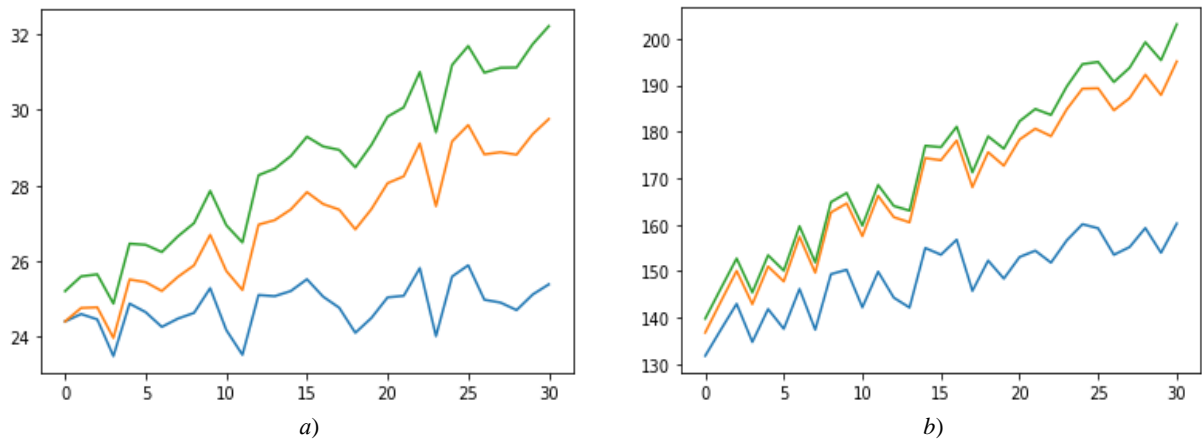


Рис. 5. Графіки математичних моделей процесу зростання: *a* — прогнозного максимуму навантаження споживачів; *б* — прогнозного попиту на електричну енергію в Україні за сценаріями СМЕЕ, РС та СКНЕ на період з 2023 по 2030 роки, адаптовані до реалій воєнного сьогодення

Не виключено, що в процесі ремонтно-відновлювальних робіт дисперсія стохастичної складової процесу відновлення та розвитку енергетики України після 2030 року почне зменшуватись, тобто цей процес перейде в розряд гетероскедастичних, що вимагатиме корегування авторегресійних моделей (11), (12), але внесення цих коректив буде предметом уже іншої статті.

## Висновки

В результаті виконаного нами дослідження встановлено:

1. Детерміновані моделі процесу відновлення та розвитку енергетики України, запропоновані в роботі [1] у вигляді діаграм і трансформовані нами в математичні структури за допомогою комп'ютерної програми 1, не відповідають реаліям воєнного сьогодення, а тому вимагають корекції;

2. Для врахування реалій воєнного сьогодення у запропоновані детерміновані моделі необхідно вносити стохастичну складову, реалізація якої доцільна за використання комп'ютерної програми генерації імпульсів стаціонарного «білого шуму» з параметрами, обчисленими за оцінками ступеня руйнації об'єктів енергетичної інфраструктури, з використанням запропонованої нами комп'ютерної програми 2;

3. Адекватнішими моделями процесу відновлення та розвитку енергетики України є авторегресійні моделі, порядок яких визначається з урахуванням реальних термінів відновлення об'єктів енергетичної інфраструктури, а для визначення вагових коефіцієнтів застосовується методика Юла–Уокера з її реалізацією у вигляді комп'ютерної програми, яка в нашій роботі [7], розміщена під номером 32.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Національна рада з відновлення України, «Проект Плану відновлення України». Розділ «Енергетична безпека», 2022, 164 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/restoration-and-development-of-infrastructure.pdf>.

[2] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, і Д. О. Шалагай, «Перші два етапи системного аналізу плану відбудови енергетики України в напрямку інтеграції в неї відновлювальних джерел», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 42-47,

2023. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-168-3-47-54>.

[3] Ольга Буславець, 28 лютого 2023. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.facebook.com/olhabuslavets/posts/pfbid0jCwzcCNaLCCSHx93MMerV9KLS7Tn8Fny7wJWwffZSgoYJq7pCbVgNKz9ttZGwWPI>.

[4] Р. Н. Кветний та ін., *Методи та алгоритми комп'ютерних обчислень. Теорія і практика*, підруч. Вінниця: ВНТУ, 2023, 280 с. ISBN 978-966-641-924-1.

[5] Б. І. Мокін, В. Б. Мокін, і О. Б. Мокін, *Навчальний посібник для опанування студентами способів розв'язання задач з функціонального аналізу мовою Python. Частина 1*. Вінниця: ВНТУ, 2022, 124 с. ISBN 978-966-641-892-3.

[6] Б. І. Мокін, В. Б. Мокін, і О. Б. Мокін, *Функціональний аналіз, адаптований до прикладних задач в галузі інформаційних технологій*, навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2020, 192 с. ISBN 978-966-641-926-5

[7] Б. І. Мокін, В. Б. Мокін, і О. Б. Мокін, *Навчальний посібник для опанування студентами способів розв'язання задач з функціонального аналізу мовою Python. Частина 2*. Вінниця: ВНТУ, 2023, 144 с. ISBN 978-966-641-926-5.

Рекомендована кафедрою системного аналізу та інформаційних технологій ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 1.12.2023

**Мокін Борис Іванович** — академік НАПН України, д-р техн. наук, професор, професор кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, e-mail: [borys.mokin@gmail.com](mailto:borys.mokin@gmail.com) ;

**Шалагай Дмитро Олександрович** — аспірант кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, e-mail: [d.shalagai@gmail.com](mailto:d.shalagai@gmail.com) .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**B. I. Mokin<sup>1</sup>**  
**D. O. Shalagai<sup>1</sup>**

## **Synthesis of Mathematical Models of the Process of Recovery and Development of Electrical Energy of Ukraine, Approached to the Realities of Today's Military**

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

*Analysis of the section "Energy security" from the "Project of the Recovery Plan of Ukraine" proposed in 2022 by the National Council for the Recovery of Ukraine was carried out, the Project is accessible at: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/restoration-and-development-of-infrastructure.pdf>. It was established that the deterministic models of the process of recovery and development of the energy industry of Ukraine, proposed in the "Project of the Recovery Plan of Ukraine" in the "Energy Security" section in the form of diagrams and transformed by us into mathematical structures with the help of a computer program, do not correspond to the realities of the present military situation, and therefore require correction; it is shown that in order to take into account the realities of the military present in the proposed deterministic models, it is necessary to introduce a stochastic component, for the implementation of which it is advisable to use the method of generating pulses of stationary "white noise" with parameters calculated according to estimates of the degree of destruction of energy infrastructure objects using the computer program, proposed in this paper; it is substantiated that the more adequate models of the process of restoration and development of the power industry of Ukraine are autoregression models, the order of which is determined based on the real terms of restoration of energy infrastructure objects, and the Yule-Walker method is used to determine the weighting factors with its implementation in the form of a computer program developed by the authors of this article, but placed in the previous author's work, indicated in the list of used literature for this article under number 7.*

**Keywords:** draft plan, process of recovery and development, electric power industry of Ukraine, deterministic mathematical models, correction, conditions of the military situation, autoregression model.

**Mokin Borys I.** — Academician of NAPS of Ukraine, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of System Analysis and Information Technologies, e-mail: [borys.mokin@gmail.com](mailto:borys.mokin@gmail.com) ;

**Shalagai Dmytro O.** — Post-Graduate Student of the Chair of System Analysis and Information Technologies, e-mail: [d.shalagai@gmail.com](mailto:d.shalagai@gmail.com)