

Б. І. Мокін¹
Д. О. Шалагай¹
О. В. Мазурук¹

СИНТЕЗ НАБЛИЖЕНИХ ДО РЕАЛІЙ ВОЄННОГО СЬОГОДЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ТА РОЗВИТКУ ДЖЕРЕЛ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ

¹Вінницький національний технічний університет

Продовжено аналіз розділу «Енергетична безпека» з «Проекту Плану відновлення України», запропонованого у 2022 році Національною радою з відновлення України, з яким можна ознайомитись за електронними координатами: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/restoration-and-development-of-infrastructure.pdf> в частині відновлення та розвитку відновлювальних джерел електроенергетики (ВДЕ). Встановлено, що табличні моделі процесів відновлення та розвитку ВДЕ України класів ГЕС, ГАЕС та СЕС, запропоновані в «Проекті Плану відновлення України» в розділі «Енергетична безпека», що трансформовані нами в детерміновані математичні моделі за допомогою комп'ютерної програми, лише стосовно процесів у ВДЕ класів ВЕС та БіоЕС можуть бути використані для прогнозування, а стосовно ВДЕ класів ГЕС, ГАЕС та СЕС не відповідають реаліям воєнного сьогодення та перших післявоєнних років. Запропоновано доповнити детерміновані моделі ВДЕ класів ГЕС, ГАЕС та СЕС стохастичними складовими з використанням методики генерації імпульсів стаціонарного білого шуму з параметрами, обчисленими за оцінками ступеня руйнації об'єктів ВДЕ України класів ГЕС, ГАЕС та СЕС. Обґрунтовано, що адекватними моделями процесу відновлення та розвитку об'єктів ВДЕ України класів ГЕС, ГАЕС та СЕС є авторегресійні моделі 2-го порядку, для визначення вагових коефіцієнтів в яких застосовується методика Юла–Уокера з її реалізацією у вигляді комп'ютерної програми, розробленої авторами цієї статті, але розміщеної в авторській роботі, вказаній в списку використаної літератури до цієї статті під номером 6. Доведено, що математичні моделі процесів обмеження генерації електроенергії об'єктами СЕС, ВЕС та БіоЕС, графічно задані в «Проекті Плану відновлення України» в розділі «Енергетична безпека» в умовах воєнного сьогодення та перших післявоєнних років не мають під собою об'єктивного підґрунтя.

Ключові слова. Проект плану, процес відновлення та розвитку, ВДЕ класів ГЕС, ГАЕС, СЕС, ВЕС, БіоЕС, умови воєнного сьогодення, корекція детермінованих моделей, авторегресійні моделі

Вихідні передумови та постановка задачі

В роботі [1] опубліковано «Проект Плану відновлення України. Енергетика», розроблений у 2022 році Національною радою з відновлення України.

В нашій роботі [2] з метою наближення до реалій воєнного сьогодення «Проекту Плану відновлення України. Енергетика» в частині, присвяченій електроенергетиці, розробленій робочою групою з «Енергетичної безпеки», здійснено синтез математичних моделей процесу відновлення та розвитку електроенергетики України в цілому з урахуванням стохастичного характеру цього процесу.

У цій же роботі, знову ж таки з метою наближення до реалій воєнного сьогодення «Проекту Плану відновлення України. Енергетика» в частині, присвяченій електроенергетиці, авторами здійснено синтез математичних моделей процесу відновлення та розвитку джерел відновлювальної електроенергетики (ВДЕ) України, які ще до початку воєнної інтервенції з боку сусідньої агресивної держави, розпочатої у лютому 2022 року, вносили уже помітний вклад в електроенергетику України, що в перспективі лише зростатиме.

Цю задачу ми розв'язуватимемо з використанням низки даних, таблиць та графіків, що характеризують ВДЕ, взятих з роботи [1]. Але як ВДЕ ми розглядатимемо не лише сонячні електростанції (СЕС), вітрові електростанції (ВЕС) та біогазові електростанції (БіоЕС), як це визначено в роботі [1], але і гідралічні електростанції (ГЕС) та гідроакumuлюючі електростанції (ГАЕС), які в роботі [1] до складу ВДЕ не включені, а розглядаються окремо від ВДЕ, хоча за своєю природою є такими.

Отже, почнемо виклад нашого матеріалу з повторення оприлюдненої в роботі [1] інформації, що станом на 31.12.2021 року Україна мала 56,247 ГВт генеруючих електроенергію потужностей, із яких 11,2 % припадало на ГЕС та ГАЕС, а 14,5 % припадало на ВЕС, СЕС та БіоЕС, причому пікова потужність ГЕС та ГАЕС становила 4837 МВт плюс 192,9 МВт додавали ще й мікро-, міні- та малі ГЕС, а пікова потужність ВЕС, СЕС та БіоЕС становила відповідно 1528 МВт, 6365,3 МВт та 254,2 МВт. А у 2022 році планувалось увести в дію ще 152 МВт другої черги на Ташлицькій ГАЕС, 972 МВт третьої черги на Дністровській ГАЕС, а також наростити на 1,54 МВт потужності ВЕС, СЕС та БіоЕС. Але війна, яку розпочали у лютому 2022 року російські агресори, не лише зупинила плановий приріст генеруючих потужностей ВДЕ, але й, як показано у тій-таки роботі [1], привела станом на 2023 рік, яким починається нульовий в часі відлік процесу розвитку джерел ВДЕ згідно з «Проектом Плану відновлення України. Енергетика», до втрат уже наявних генеруючих потужностей в розмірі 7 % від 4837 МВт стосовно ГЕС та ГАЕС, в розмірі 32 % від 8067 МВт стосовно СЕС та в розмірі 94 % від 1583 МВт стосовно ВЕС.

Як впливає з даних табл. 1, взятої з роботи [1], через втрати, викликані бомбардуванням та окупацією об'єктів електроенергетичної інфраструктури, навіть песимістичний варіант нарощення потужностей ГЕС та ГАЕС, обумовлений в «Проекті Плану відновлення України. Енергетика», реалізованим бути не може, особливо ще й на фоні додаткових втрат, про які йдеться в роботах Ольги Буславець, одна з яких увійшла до списку використаної літератури як [3].

Таблиця 1

Можливості розвитку генерувальних потужностей великої гідроенергетики за сценаріями, ГВт

Сценарії	2023	2025	2030	2035	2040	2050
Песимістичний, зокрема:	6,75	6,85	6,85	7,25	7,25	7,25
ГЕС	4,8	4,9	4,9	5,0	5,0	5,0
ГАЕС	1,99	1,99	1,99	2,25	2,25	2,25
Оптимістичний, зокрема:	6,75	7,15	8,6	9,82	10,24	10,37
ГЕС	4,8	4,9	5,2	5,45	5,87	6,0
ГАЕС	1,99	2,25	3,4	4,37	4,37	4,37

А як впливає з даних табл. 2, теж взятої з роботи [1], через ті самі причини навіть песимістичний варіант нарощення потужностей ВЕС, СЕС та БіоЕС, обумовлений в «Проекті Плану відновлення України. Енергетика», теж реалізованим бути не може.

Таблиця 2

Можливості розвитку відновлюваної енергетики за сценаріями, ГВт*

Сценарії	2023	2025	2030	2035	2040	2050
Песимістичний						
СЕС	6,8	7,2	8,2	8,2	9,2	13
ВЕС	2,8	3,3	4,3	4,7	4,4	7
Станції на біопаливі	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
Оптимістичний						
СЕС	8,25	9,2	12	18,5	35,3	58,6
ВЕС	3,5	5,2	8	11,7	20	32
Станції на біопаливі	0,3	0,9	2,4	3,9	5,2	7,9

Примітка. * — сценарні можливості розвитку малої гідроенергетики, що також відноситься до відновлюваної енергетики

На рис. 1 ці песимістичні варіанти, що запропоновані в таблицях 1 та 2, за допомогою ППП numpy та графічного редактора matplotlib, створених мовою Python, нами продемонстровані графічно, для чого використано комп'ютерну програму 1, розроблену з використанням рекомендацій, викладених в роботі [4]. Отже.

Програма 1:

```

import numpy as np
L1=[0,2,7,12,17,27]
x=np.array(L1)
L2=[4.8,4.9,4.9,5.0,5.0,5.0]
def f1(x):
    return L2
f1(x)
L3=[1.99,1.99,1.99,2.25,2.25,2.25]
def f2(x):
    return L3
f2(x)
L4=[6.75,6.83,6.83,7.25,7.25,7.25]
def f3(x):
    return L4
f3(x)
L5=[6.8,7.2,8.2,8.2,9.2,13.0]
def f4(x):
    return L5
f4(x)
L6=[2.8,3.3,4.3,4.7,4.4,7.0]
def f5(x):
    return L6
L7=[0.25,0.3,0.35,0.4,0.45,0.5]
def f6(x):
    return L7
f6(x)
import matplotlib.pyplot as plt
plt.plot(x,f1(x),x,f2(x),x,f3(x))
plt.plot(x,f4(x),x,f5(x),x,f6(x))
Кінець програми 1.

```

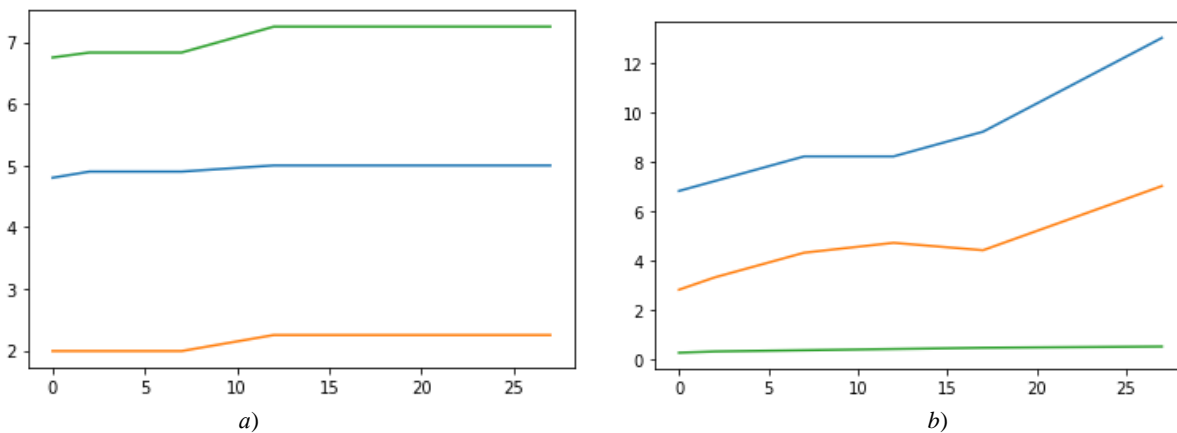


Рис. 1. Графіки процесів песимістичного розвитку потужностей: *a* — ГЕС, ГАЕС; *b* — СЕС, ВЕС, БіоЕС в ГВт за 27 років в період з 2023 по 2050 роки

Оскільки СЕС і ВЕС для балансування режимів роботи електроенергетичної системи взимку в ранковому та вечірньому піках навантаження використані бути не можуть, бо темно і в морозну погоду, як правило, немає вітру, то вироблену ними електроенергію в години, коли світить сонце і дме вітер, що приводить до профіциту електроенергії в електроенергетичній системі у ці години потрібно акумулювати у вигляді, придатному для використання під час пікових навантажень на електроенергетичну систему. В «Проекті Плану відновлення України. Енергетика» пропонується використовувати в якості технологій акумуляції електроенергії, виробленої на СЕС та ВЕС, технологію “Power to Power” у варіанті “Power to Gas”, за якою шляхом електролізу вода розкладається на водень і кисень, що зберігаються в об’ємних ємностях біля теплових електростанцій, здатних працювати з використанням водню як палива замість природного газу. В підтвердження такого висновку приведемо цитату з роботи [1]: «Це робить недоцільним використання технологій перенесення потужності типу “Power to Power” (технології, на кшталт, ГАЕС, СНЕ та подібних), а єдиною можливістю ліквідації профіцитів енергії є або обмеження потужності ВДЕ, або впровадження технологій типу “Power-to-X”. Тому, більша частина цього «надлишку» в цих сценаріях використовується для виробництва «зеленого» водню, який за прийнятих припущень використовується для виробництва електричної енергії» — кінець цитати.

В цьому ж «Проекті Плану відновлення України. Енергетика» прогнозується, яким може бути профіцит електроенергії по роках у період з 2023 по 2050 роки, що відображають графіки, котрі перенесені нами з роботи [1] на наш рис. 2.

Цими графіками ми завершуємо вступну частину нашої статті і перейдемо до розв’язання задачі синтезу математичних моделей процесу відновлення та розвитку джерел відновлювальної електроенергетики України з урахуванням реалій воєнного сьогодення, тобто запропонуємо варіант наближення «Проекту Плану відновлення України. Енергетика» в частині, присвяченій ВДЕ, який

враховуватиме стохастичний характер цього процесу та додаткові втрати ВДЕ, зумовлені їхніми інтенсивними бомбардуваннями російськими окупантами.

Розрахункові обсяги обмежень виробництва електричної енергії на ВЕС та СЕС та використання профіцитів електричної енергії (за допомогою технологій «Power to Gas») за сценаріями

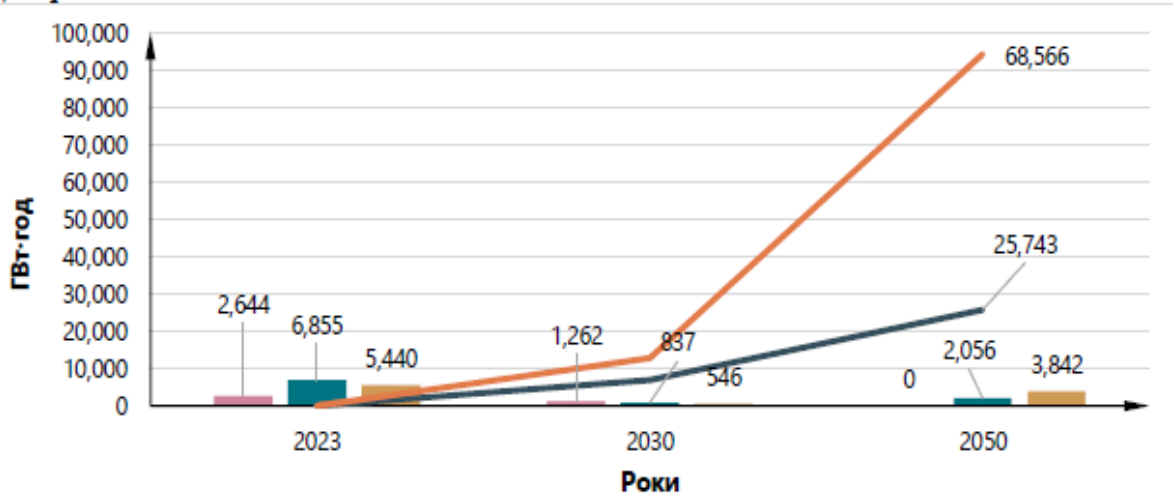


Рис. 2. Графіки процесів нарощення виробництва електроенергії ВДЕ (верхня ламана) та використання частини її для виробництва «зеленого водню» (нижня ламана)

Розв'язання поставленої задачі

Як і в роботі [2], вважатимемо, що війна України з агресивним сусідом триватиме і у 2024 році і у 2025 році, що вносить стохастичну складову у плани відновлення і того, що було в електроенергетичній структурі України до війни, і того, що у ці воєнні роки уже після руйнації було відновлено. Вважатимемо також, що і в подальший період процес відновлення і розвитку ВДЕ міститиме стохастичну складову, обумовлену і процесами розмінування об'єктів і під'їздів до них, і процесами невчасного надходження потрібного обладнання з-за кордону, і проблемами в забезпеченні відновлювальних робіт необхідними коштами та високопрофесійними кадрами.

Отже, за ідеологією роботи [2] розглядатимемо процес відновлення і розвитку ВДЕ, починаючи з нульової відмітки часу у 2023 році, в стохастичному варіанті. Але, якщо в роботі [2], синтезуючи моделі процесу відновлення та розвитку електроенергетики України взагалі, ми кінцеву точку цього процесу визначали 2030 роком, то, синтезуючи моделі процесу відновлення і розвитку ВДЕ, ми з врахуванням прогностичних особливостей, визначених в роботі [1] і показаних нами на графіках, поданих на рис. 1 та 2, як кінцеву точку процесу визначимо 2033 рік. А це в разі вимірювання часу в кварталах, дозволяє нам, синтезуючи математичні моделі у період з 2023 по 2033 роки, використовувати 41 точку на осі часу.

А далі введемо умову, що в 2033 році сумарні потужності ГЕС, ГАЕС, СЕС, ВЕС та БіоЕС досягнуть рівня, закладеного в роботі [1], який, враховуючи графіки рис. 1, можна оцінити, як

$$\begin{cases} P_{ГЕС(\kappa)} = 5,0 \text{ ГВт} = y_{1\kappa}, \\ P_{ГАЕС(\kappa)} = 2,3 \text{ ГВт} = y_{2\kappa}, \\ P_{СЕС(\kappa)} = 8,3 \text{ ГВт} = y_{3\kappa}, \\ P_{ВЕС(\kappa)} = 4,6 \text{ ГВт} = y_{4\kappa}, \\ P_{БіоЕС(\kappa)} = 0,5 \text{ ГВт} = y_{5\kappa}. \end{cases} \quad (1)$$

А щодо сумарних потужностей ГЕС, ГАЕС, СЕС, ВЕС та БіоЕС у початковому 2023 році, то з урахуванням інформації, наведеної в роботі [1] і повтореної нами у вступній частині статті, про рівні і втрати цих потужностей, що викликані, починаючи з лютого, бомбардуваннями та окупаці-

єю агресивною сусідньою державою, їх можна вважати такими:

$$\begin{cases} P_{ГЕС(n)} = 4,44 \text{ ГВт} = y_{1n}, \\ P_{ГАЕС(n)} = 1,86 \text{ ГВт} = y_{2n}, \\ P_{СЕС(n)} = 4,3 \text{ ГВт} = y_{3n}, \\ P_{ВЕС(n)} = 0,1 \text{ ГВт} = y_{4n}, \\ P_{БіоЕС(n)} = 0,18 \text{ ГВт} = y_{5n}. \end{cases} \quad (2)$$

З графіків, показаних на рис. 1, легко бачити, що коефіцієнти k_i , $i = 1, 2, \dots, 5$ приростів потужностей ГЕС, ГАЕС, СЕС, ВЕС та БіоЕС на відрізьку часу з 2023 по 2033 роки, вираженому у кварталах, можна знайти, використавши вираз

$$k_i = \frac{1}{41}(y_{ik} - y_{in}), \quad i = 1, 2, \dots, 5. \quad (3)$$

Тож, підставляючи відповідні значення з виразів (1), (2) у вираз (3), знайдемо, що

$$k_1 = 0,016; k_2 = 0,011; k_3 = 0,1; k_4 = 0,11; k_5 = 0,01. \quad (4)$$

Отже, з урахуванням характеру кривих, зображених на рис. 1, та виразів (2), (3) наближено в детермінованому варіанті на відрізьку часу з 2023 по 2033 роки, вираженому у кварталах, прирости потужностей ГЕС, ГАЕС, СЕС, ВЕС та БіоЕС можна відобразити моделями

$$\begin{cases} y_1(t) = 4,44 + 0,016t, \\ y_2(t) = 1,86 + 0,011t, \\ y_3(t) = 4,3 + 0,10t, \\ y_4(t) = 0,1 + 0,11t, \\ y_5(t) = 0,18 + 0,01t. \end{cases} \quad (5)$$

А для визначення діапазонів Δ_i , $i = 1, 2, \dots, 5$ та нижньої і верхньої меж m_{i1} , m_{i2} формування імпульсів білого шуму, за допомогою щоквартального підмішування яких у вигляді дискретних стохастичних функцій $x_i(t_n)$, $i = 1, 2, \dots, 5$; $n = 0, 1, 2, \dots, 40$ з нульовим середнім до моделей (5), заданих у дискретному часі, трансформуватимемо неперервні детерміновані моделі (5) в дискретні стохастичні моделі $w_i[n]$, скористаємось оцінками додаткових втрат Ольги Буславець, один з варіантів яких можна взяти з роботи [3] і задати в межах 10 % від тієї потужності ГЕС, ГАЕС, яку ці ВДЕ мали у 2023 році, та задати в межах 30 % від тієї потужності СЕС, ВЕС та БіоЕС, яку ці ВДЕ мали у 2023 році, та які визначені нами у виразах (2). Тож матимемо:

$$\Delta_1 = 0,444; \Delta_2 = 0,186; \Delta_3 = 1,29; \Delta_4 = 0,03; \Delta_5 = 0,054; \quad (6)$$

$$\begin{cases} [m_{11}, m_{12}] = [-0,222; 0,222], [m_{21}, m_{22}] = [-0,093; 0,093], \\ [m_{31}, m_{32}] = [-0,645; 0,645], [m_{41}, m_{42}] = [-0,015; 0,015], \\ [m_{51}, m_{52}] = [-0,027; 0,027], \end{cases} \quad (7)$$

$$w_i[n] = y_i[n] - x_i[n], \quad i = 1, 2, \dots, 5; n = 0, 1, 2, \dots, 40. \quad (8)$$

Графічну реалізацію моделей (7) здійснимо за допомогою комп'ютерної програми, створеної мовою Python, яка подається нижче у вигляді програми 2.

Програма 2:

```

import numpy
from numpy import*
N=40
m11=-0.222;m21=-0.093;
m31=-0.645;m41=-0.015;
m51=-0.027;m12=0.222;
m22=0.093;m32=0.645;
m42=0.015;m52=0.027;
t=linspace(0,N,N+1)
def y1(t):
return 4.44+0.016*t
y1vec=vectorize(y1)
y11=y1vec(t)
def y2(t):
return 1.86+0.011*t
y2vec=vectorize(y2)
y22=y2vec(t)
def y3(t):
return 4.30+0.10*t
y3vec=vectorize(y3)
y33=y3vec(t)
def y4(t):
return 0.10+0.11*t
y4vec=vectorize(y4)
y44=y4vec(t)
def y5(t):
return 0.18+0.01*t
y5vec=vectorize(y5)
y55=y5vec(t)
g1=random.uniform(m11,m12,41)
g2=random.uniform(m21,m22,41)
g3=random.uniform(m31,m32,41)
g4=random.uniform(m41,m42,41)
g5=random.uniform(m51,m52,41)
y111=y11-g1
y222=y22-g2
y333=y33-g3
y444=y44-g4
y555=y55-g5
import matplotlib
import matplotlib.pyplot as plt
plt.plot(t,y111,t,y222)
plt.plot(t,y333,t,y444,t,y555)

```

Кінець програми 2.

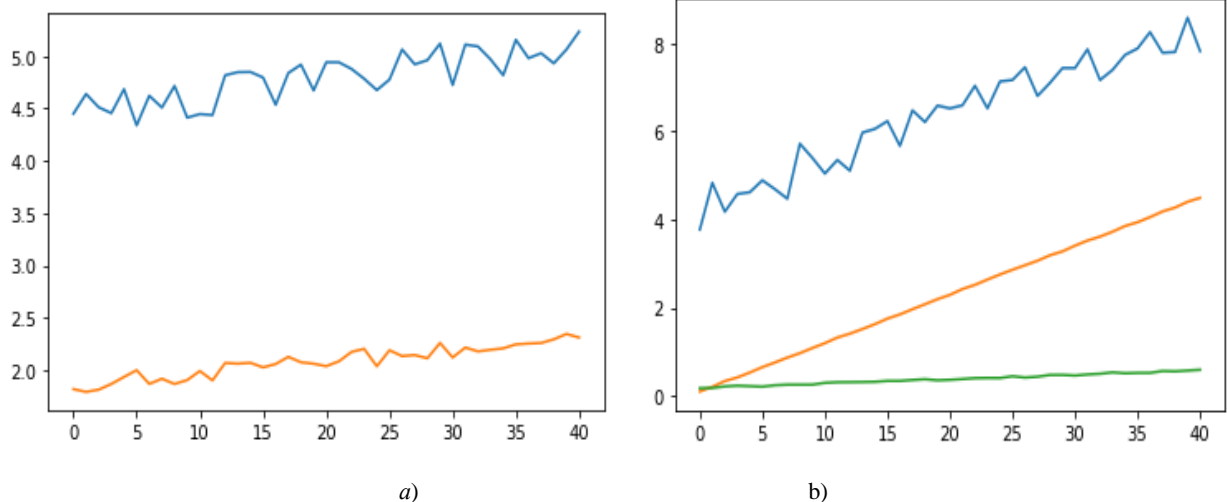


Рис. 3. Графіки процесів песимістичного характеру стосовно відновлення та розвитку потужностей
 а — ГЕС, ГАЕС; б — СЕС, ВЕС, БіоЕС в ГВт в період з 2023 по 2033 роки з урахуванням воєнного сьогодення

Аналізуючи графіки, показані на рис. 3, бачимо, що для прогнозування процесів відновлення та розвитку потужностей ВЕС і БіоЕС у період з 2023 по 2033 роки в разі вимірювання цих потужностей у ГВт, а час у кварталах — можна використовувати детерміновані математичні моделі $y_4(t)$ та $y_5(t)$, що задані відповідними функціями у множині (5), оскільки вони є трендами із зовсім незначними стохастичними складовими.

Але з цих же графіків, зображених на рис. 3, видно, що для прогнозування процесів відновлення та розвитку потужностей ГЕС, ГАЕС та СЕС у цей же період та у тих же умовах необхідно замість детермінованих моделей $y_1(t)$, $y_2(t)$, $y_3(t)$ використовувати авторегресійні моделі 2-го порядку. А оскільки ці процеси є не лише стохастичним, але і нестационарними, то ці авторегресійні моделі потрібно синтезуватимемо у формі АРПКС(2,0,1), тобто у такому вигляді:

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

$$k = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, k, i = 0, 1, 2, 3;$$

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

Вагові коефіцієнти p_{1i}, p_{2i} авторегресійних моделей (9) потрібно визначати з використанням методикою Юла–Уокера, приведеної з прикладами використання у роботах [5], [6]. Слід зауважити, що імпульси білого шуму u в авторегресійних моделях (9) потрібно генерувати у діапазоні значень, що задаються новими межами $[y_{ina}, y_{iva}]$, які потрібно визначати теж за методикою Юла–Уокера. Що ж до вибору нами другого порядку авторегресій (9), то він обумовлений тим, що при квартальному відліку часу відновлення об'єктів ВДЕ енергетичної інфраструктури в кварталі, що аналізується, на наш погляд, залежатиме лише від того, в якому стані ці об'єкти були в двох попередніх кварталах, адже для відновлення зруйнованих бомбардуваннями окремих елементів ВДЕ ремонтно-відновлювальні роботи, зазвичай, тривають не довше двох кварталів.

Приводити комп'ютерну програму мовою Python для ідентифікації авторегресійних моделей (9) та їхнє використання в задачах прогнозування, на наш погляд, немає сенсу, оскільки вона уже створена у вигляді програми 32 у нашій роботі [6], в яку потрібно лише внести нові масиви вхідних даних, що задані у цій статті у вигляді $y111, y222, y333$.

Що ж до моделювання процесу обмеження зростання потужностей СЕС, ВЕС та БіоЕС (верхня ламана на рис. 2) та їхнього використання для вироблення водню за технологією “Power to Gas” (нижня ламана на рис. 2), то для них нині будувати авторегресійні моделі немає сенсу, оскільки, по-перше, краще цього обмеження не вводити взагалі, а навпаки — вводити цих потужностей якомога більше, адже за наявності можливості експортувати електроенергію в інші країни Європи, будь-який надлишок електроенергії, виробленої на ВДЕ, можна вигідно продати в якусь з цих країн. А по-друге, про початок вироблення водню за технологією “Power to Gas” в Україні в умовах воєнного сьогодення не доводиться навіть мріяти, тож відхилення нижньої ламаної, зображеної на рис. 2, від нуля в околі 2025 року, навряд чи відповідатиме реаліям цього року і навряд чи ми бачитимемо швидке лінійне наростання після 2025 року цієї ламаної до значень, прогнозованих на 2030 рік. Ось коли технологія “Power to Gas” вироблення «зеленого» водню в Україні буде хоча б започаткованою і набуде хоча б визначеності у темпах зростання, тоді можна буде і створювати моделі прогнозування наслідків введення цієї технології.

Висновки

В результаті виконаного дослідження встановлено, що табличні моделі процесів відновлення та розвитку ВДЕ класів ГЕС, ГАЕС та СЕС в Україні, що запропоновані в роботі [1] і трансформовані нами в математичні моделі за допомогою комп'ютерної програми 1, не відповідають реаліям воєнного сьогодення та перших післявоєнних років.

Запропоновано в синтезовані детерміновані моделі внести стохастичну складову, для реалізації якої доцільно використати комп'ютерну програму генерації імпульсів стаціонарного «білого шуму» з параметрами, обчисленими за оцінками ступеня руйнації об'єктів ВДЕ класів ГЕС, ГАЕС та СЕС в Україні з використанням запропонованої у цій статті комп'ютерної програми 2.

Установлено, що адекватними моделями процесів відновлення та розвитку ВДЕ класів ГЕС, ГАЕС та СЕС в Україні є авторегресійні моделі 2-го порядку, для визначення вагових коефіцієнтів яких потрібно застосовувати методикою Юла–Уокера з її реалізацією у вигляді комп'ютерної програми, яка в нашій роботі [6] має номер 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, і Д.О. Шалагай, «Синтез математичних моделей процесу відновлення та розвитку електроенергетики України, наближених до реалій воєнного сьогодення», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 6-13, 2023. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-171-6-6-13>.

[3] Ольга Буславець, 28 лютого 2023. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.facebook.com/olhabuslavets/posts/pfbid0jCwzcCNALCCSHx93MMeRv9KLS7Tn8Fny7wJWwffZSzoYJq7pCbVgNKz9ttZGwWPI>.

[4] 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.

[5] 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

[6] 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 28.08.2023

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

Шалагай Дмитро Олександрович — аспірант кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, e-mail: d.shalagai@gmail.com ;

Мазурук Олег Володимирович — аспірант кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, e-mail: omazuruk3@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

B. I. Mokin¹
D. O. Shalagai¹
O.V. Mazuruk¹

Synthesis of Mathematical Models of the Process of Recovery and Development of Sources of Renewable Energy in Ukraine Close to the Realities of Today's Warfare

¹Vinnitsia National Technical University

The analysis of the "Energy Security" section from the "Ukraine Recovery Plan" proposed in 2022 by the National Recovery Council of Ukraine, accessible at the provided electronic coordinates, continues with a focus on the recovery and development of renewable energy sources (RES), the Project is accessible at: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/restoration-and-development-of-infrastructure.pdf>. It was found that the tabular models of the processes of recovery and development of RES in Ukraine, specifically for hydroelectric power stations (HPS), nuclear power plants (NPPs), and solar power plants (SPPs), proposed in the "Ukraine Recovery Plan" within the "Energy Security" section and transformed by us into the deterministic mathematical models using computer software, are only applicable for forecasting in case of wind power stations (WPS) and bioenergy stations (BioPS). In contrast, RES classes such as HPS, NPPs, and SPPs, do not correspond to the realities of today's warfare and the first post-war years. It is suggested to enhance the deterministic models of RES classes HPS, NPPs, and SPPs with stochastic components using the technique of generating impulses of stationary white noise with parameters calculated according to the estimates of the degree of destruction of RES facilities in Ukraine for HPS, NPPs, and SPPs classes. It is substantiated that adequate models for the process of recovery and development of RES facilities in Ukraine for HPS, NPPs, and SPPs are second-order autoregressive models, where the Yule-Walker method is used to determine the weight coefficients, implemented as a computer program developed by the authors of this article, but located in the author's work listed in the bibliography of this article under number 6. It has been proved that the mathematical models of the processes of limiting electricity generation by SPPs, WPS, and BioPS, graphically presented in the "Ukraine Recovery Plan" in the "Energy Security" section under the conditions of today's warfare and the first post-war years, lack the objective basis.

Keywords: Project of the plan, process of restoration and development, RES of HPPs, PSPPs, SPPs, WPPs, BioPPs classes, under the conditions of wartime, correction of deterministic models, autoregressive models.

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 ;

Shalagai Dmytro O. — Post-Graduate Student of the Chair of System Analysis and Information Technologies, e-mail: d.shalagai@gmail.com ;

Mazuruk Oleh V. — Post-Graduate Student of the Chair of System Analysis and Information Technologies, e-mail: omazuruk3@gmail.com