

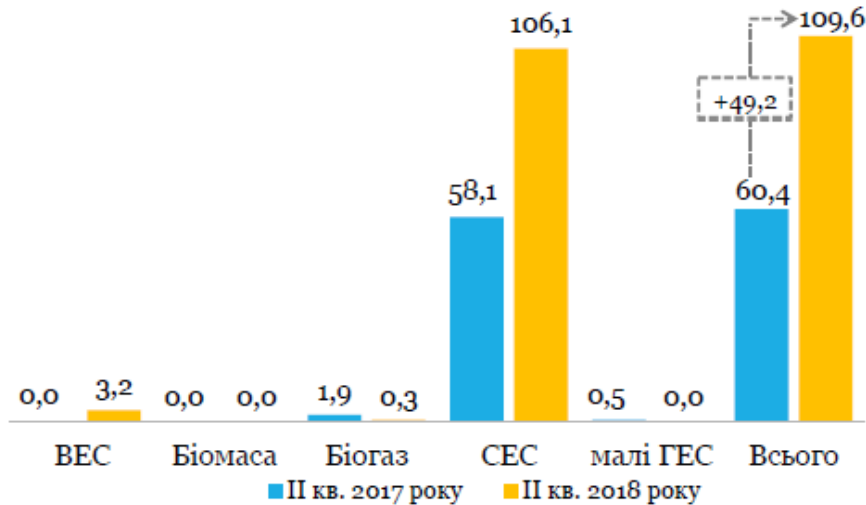


Компенсація нестабільності генерування вітрових і сонячних електростанцій

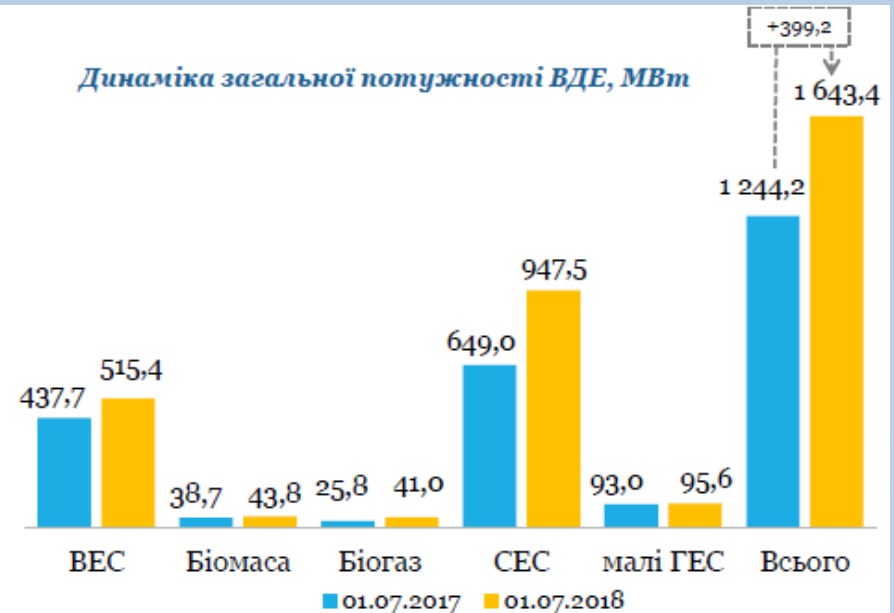
Лежнюк П. Д., Комар В.О., Кравчук С.В., Лесько В.О.
Вінницький національний технічний університет

Аналіз темпів збільшення генерування відновлювальних джерел енергії в Україні

Динаміка введення в експлуатацію нових потужностей, МВт



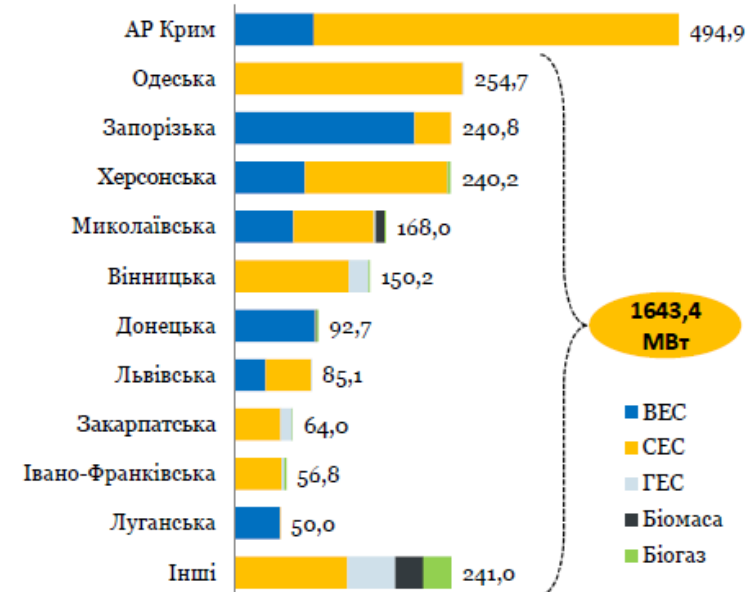
Динаміка загальної потужності ВДЕ, МВт



Потужність введена у 2 кварталі 2018, МВт



Загальна встановлена потужність, МВт



Оцінювання нестабільності генерування фотоелектричних станцій

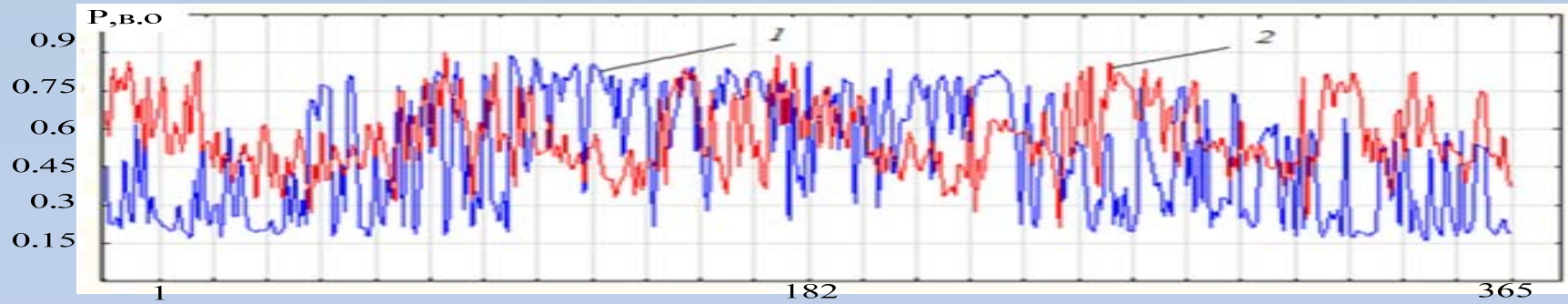


Рисунок 1 – Зміна потужності генерування ФЕС (1) та навантаження (2) протягом року в заданий проміжок часу доби

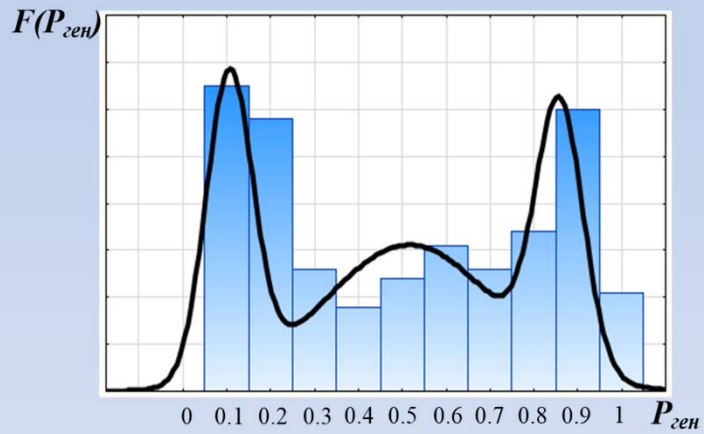


Рисунок 2 – Модель гаусової суміші для потужності генерування ФЕС

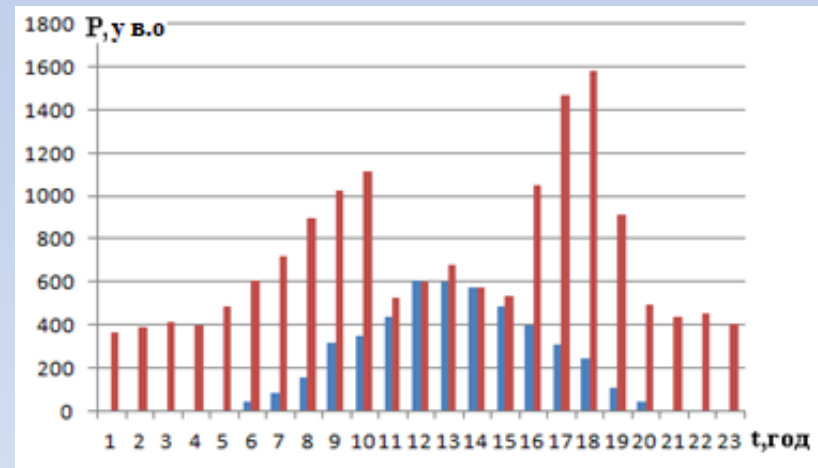
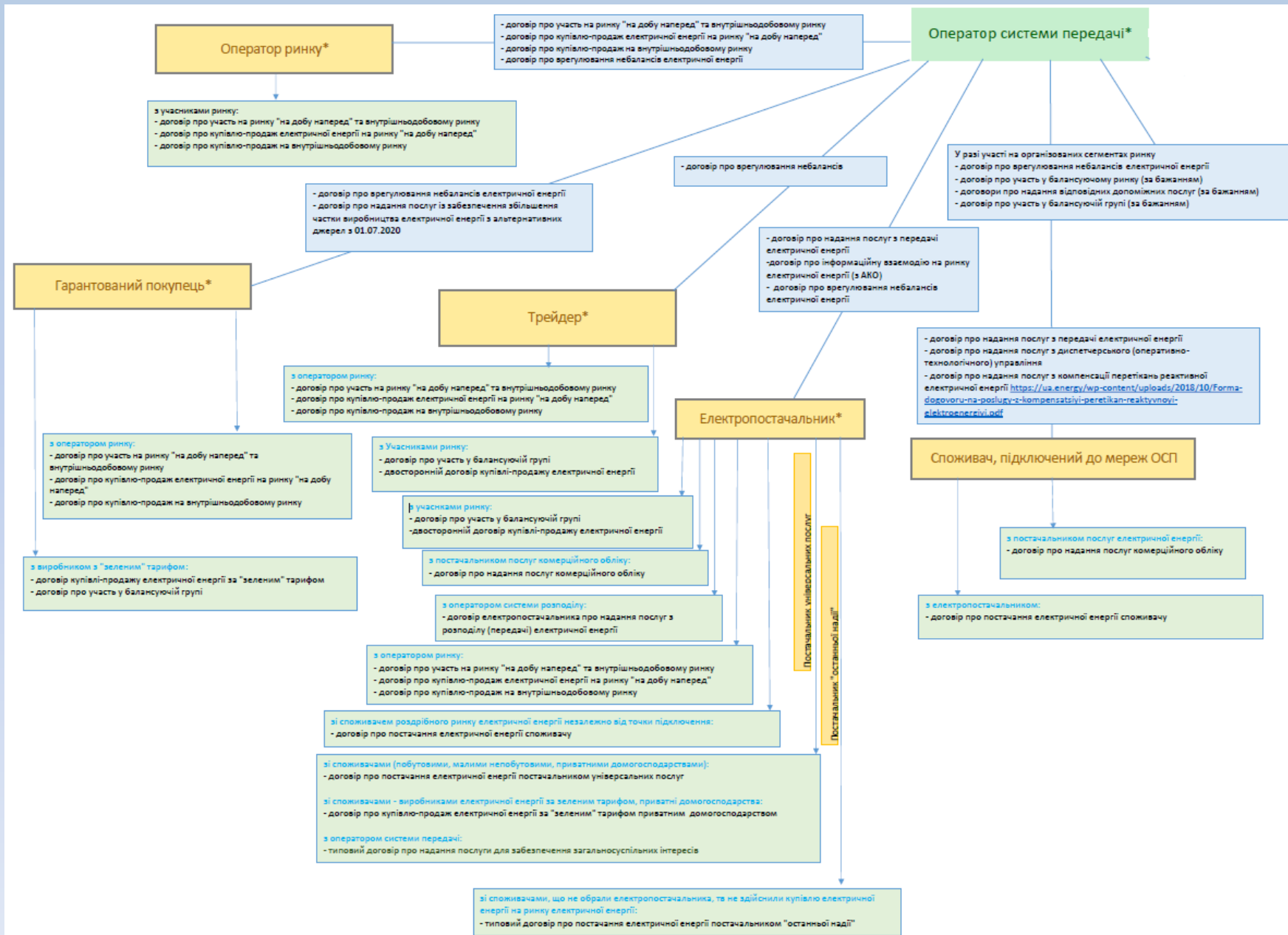


Рисунок 3 – Сумарний графік навантаження ТП (червоний) та графік генерування ФЕС (синій)

Аналіз сегменту “ринок на добу наперед” Закону України “Про ринок електричної енергії”



Дослідження впливу окремих метеопараметрів та їх сукупностей на функціонування ФЕС



Рисунок 1– Фотоелектрична станція 1.6кВт на будівлі ФЕЕЕМ ВНТУ



Рисунок 2 – Метеопост на ФЕС ВНТУ піранометр Kipp&Zonen

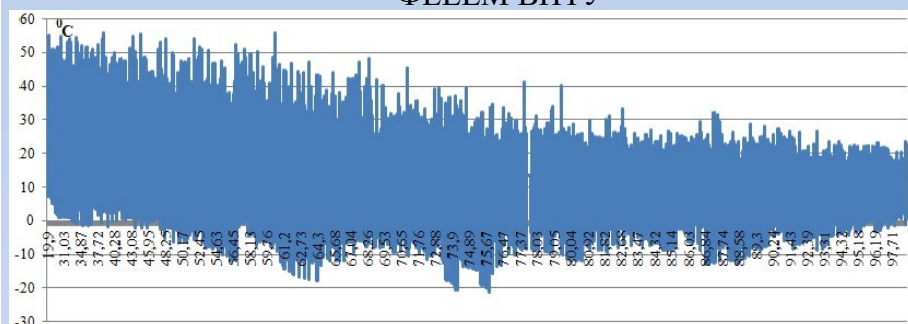


Рисунок 3 – Залежність температури панелі від вологості (протягом року)

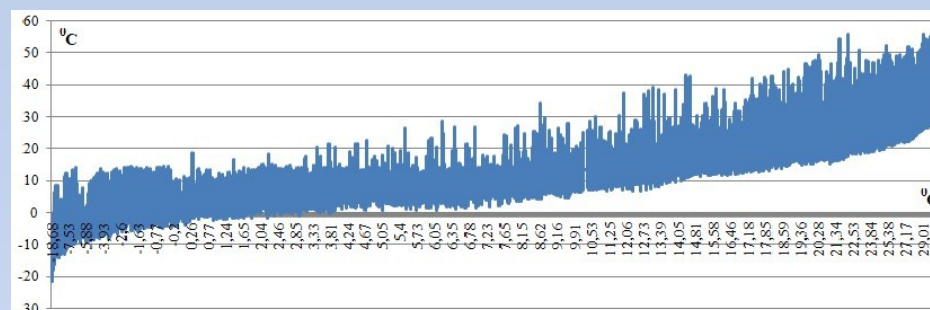


Рисунок 4 – Залежність температури панелі від температури навколишнього середовища(протягом року)

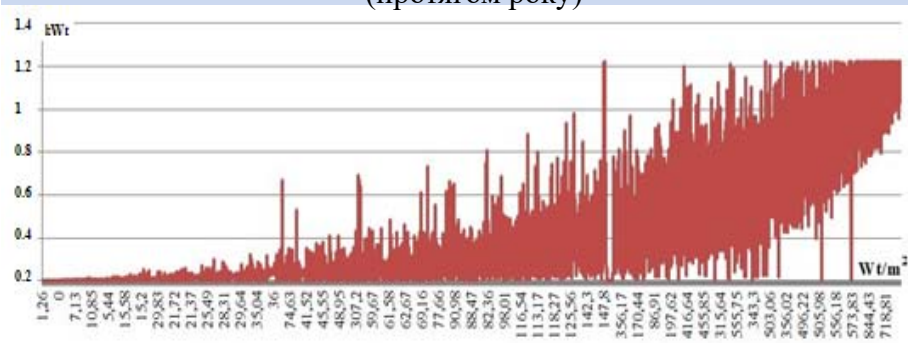


Рисунок 5– Залежність активної потужності від сонячної радіації на поверхні панелі (протягом року)

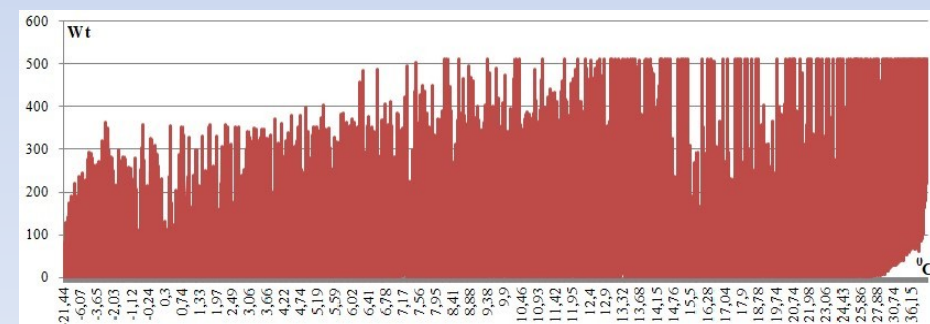


Рисунок 6 – Залежність активної потужності від температури панелі (протягом року)

Визначення основних метеопараметрів для побудови моделі 6 короткострокового прогнозування генерування ФЕС

Correlations (факт_метео_пороги)					
Marked correlations are significant at $p < .05000$					
N=44568 (Casewise deletion of missing data)					
Variable	Температура	Вологість	Радіація	Шв Вітру	Generation
Температура	1,000000	-0,591249	0,518259	0,029432	0,403010
Вологість	-0,591249	1,000000	-0,578834	-0,207019	-0,400646
Радіація	0,518259	-0,578834	1,000000	0,234122	0,930542
Шв Вітру	0,029432	-0,207019	0,234122	1,000000	0,227994
Generation	0,403010	-0,400646	0,930542	0,227994	1,000000

Рисунок 1 – Матриця коефіцієнтів кореляції метеопараметрів та генерування ФЕС

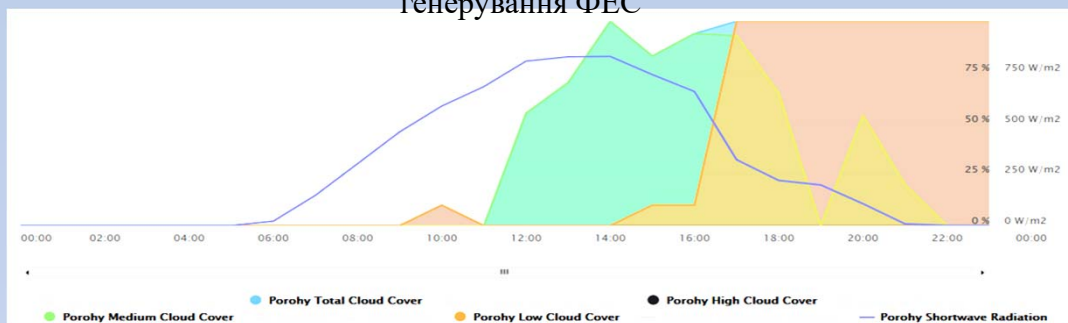


Рисунок 2 – Вплив різних рівнів хмарності на сонячну інсоляцію

N=1888 (Casewise deletion of missing data)					
Variable	Total Cloud Cover [sfc]	High Cloud Cover [high cld lay]	Medium Cloud Cover [mid cld lay]	Low Cloud Cover [low cld lay]	Shortwave Radiation [sfc]
Total Cloud Cover [sfc]	1,000000	0,431666	0,647244	0,842909	-0,643525
High Cloud Cover [high cld lay]	0,431666	1,000000	0,668955	0,207407	-0,287777
Medium Cloud Cover [mid cld lay]	0,647244	0,668955	1,000000	0,364117	-0,405079
Low Cloud Cover [low cld lay]	0,842909	0,207407	0,364117	1,000000	-0,671495
Shortwave Radiation [sfc]	-0,643525	-0,287777	-0,405079	-0,671495	1,000000

Рисунок 3 – Кореляційна матриця впливу різних рівнів хмарності на радіацію

N=44568 (Casewise deletion of missing data)			
Variable	Generation	Радіація	Cloudness_low
Generation	1,000000	0,930534	-0,207019
Радіація	0,930534	1,000000	-0,364122
Cloudness_low	-0,207019	-0,364122	1,000000

Рисунок 4 - Кореляційна матриця взаємовпливу сонячної інсоляції, виробітку електроенергії ФЕС та нижнього рівня хмарності

Досвід проведеної роботи показує, що серед метеопараметрів найбільш впливовими є сонячна інсоляція, температура, швидкість вітру та вологість. Проте, аналіз джерел та сервісів метеоданих, показав, що жоден з них не дає радіацію на поверхні землі (meteoblue, погодинно прогнозує на рівні іоносфери). Що стосується решти параметрів, то проведений кореляційний дозволяє визначити міру впливу кожного метеопараметра на загальний виробіток електроенергії ФЕС (рис.1).

Таким чином, відсутність даних щодо радіації на поверхні землі значно знижує точність прогнозу виробітку електроенергії ФЕС. Виникає логічне питання, яким чином враховувати хмарність при побудові моделі прогнозування. Оскільки наявність чотирьох вхідних параметрів (сонячна радіація, температура навколишнього середовища, швидкість вітру, вологість) забезпечує точність при підстановці фактичних даних на рівні 95%, то збільшення кількості додаткових входів в початкову модель, по-перше, ускладнить та збільшить кількість обчислень, по-друге, збільшать похибку погодинного прогнозу виробітку. Іншим варіантом для врахування стану неба за допомогою наявної інформації по хмарності Таким чином, на основі проведеного кореляційного аналізу можна зробити висновок, що хмарність важливий параметр, який опосередковано впливає на виробіток електроенергії на ФЕС та прямо впливає на рівень сонячної інсоляції на поверхні землі.

Виходячи з цього, пропонується використовувати стан неба (хмарність) при визначенні сонячної радіації на поверхні землі. За рахунок, такого уточнення радіації (з урахуванням хмарності) очікується підвищення точності моделі прогнозування.

Розроблення систем фільтрування вхідних даних для побудови моделі 7 прогнозування генерування ФЕС

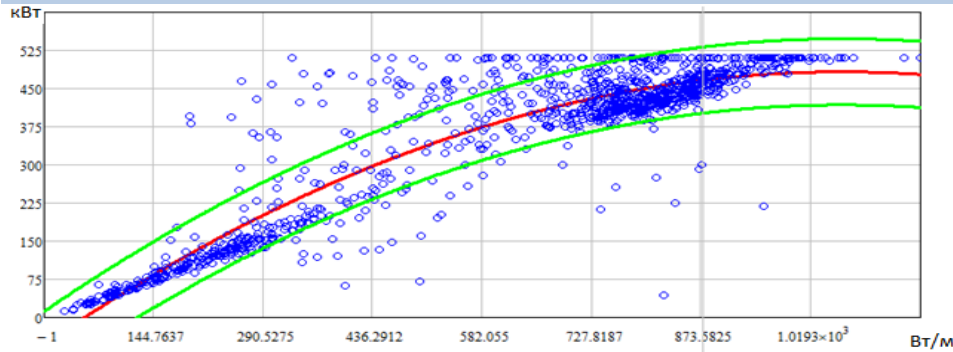


Рисунок 1 – Залежність зміни виробітку ФЕС від сонячної інсоляції

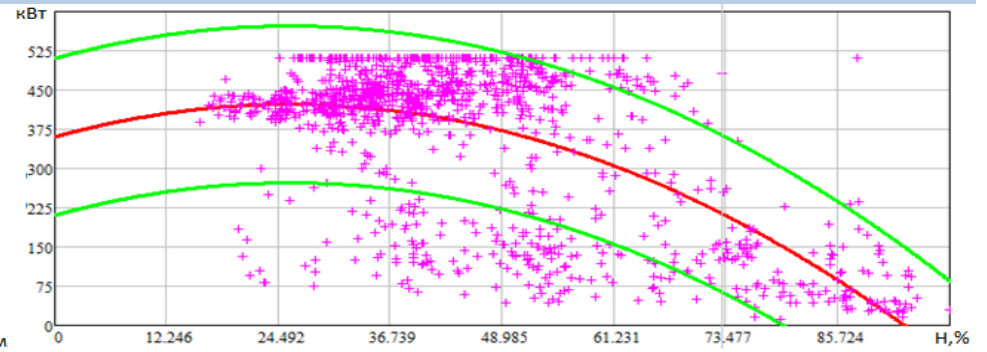


Рисунок 4 – Залежність зміни виробітку ФЕС від швидкості вітру

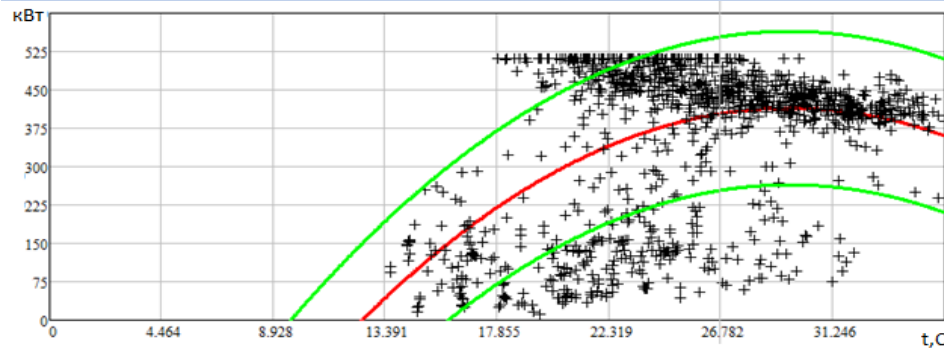


Рисунок 2 – Залежність зміни виробітку ФЕС від температури

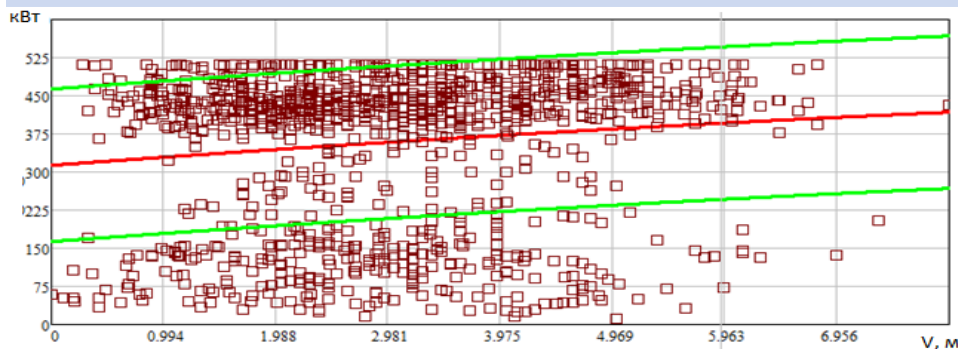


Рисунок 3 – Залежність зміни виробітку ФЕС від швидкості вітру

Запропонований підхід, можна застосовувати для величин, які мають значний коефіцієнт кореляції з вихідною потужністю генерування ФЕС (рис. 1) тобто, «сонячну радіацію», «температуру», «вологість», що стосується «швидкості вітру», дана величина слабокорельована з вихідною потужністю, тому апроксимувати дані вимірювань з великою точністю досить важко, навіть для декількох залежностей що утворять поле значень. Результати визначення поліноміальних залежностей наведені в таблиці

Год	Радіація	Температура	Шв. вітру	Вологість
5	$R(x) = 22 - 1.623x + 0.034x^2$	$T(x) = -8.5 + 2.6x + 0.099x^2$	$S(x) = 9.1 - 1.9x + 0.168x^2$	$H(x) = 1.7 - 0.38x + 0.01x^2$
6	$R(x) = 0.12 - 0.38x - 0.004x^2$	$T(x) = 5.46 + 1.7x - 0.054x^2$	$S(x) = 20.1 - 2x + 0.096x^2$	$H(x) = -66 + 2.1x + 0.02x^2$
7	$R(x) = 2.05 + 0.45x + 0.006x^2$	$T(x) = -2.84 + 4.7x - 0.044x^2$	$S(x) = 67.23 + 3.8x - 2.3x^2$	$H(x) = 67.2 + 3.8x - 2.25x^2$
8	$R(x) = -9.9 + 0.71x - 0.002x^2$	$T(x) = -249 + 32x - 0.611x^2$	$S(x) = 138.3 + 17.9x - 5.58x^2$	$H(x) = -226 + 13.9x - 0.11x^2$
9	$R(x) = -21.6 + 0.82x - 0.003x^2$	$T(x) = -576 + 64.4x - 1.185x^2$	$S(x) = 228.9 + 12.1x - 4.18x^2$	$H(x) = 113 + 9.1x - 0.104x^2$
10	$R(x) = -30.8 + 0.92x - 0.004x^2$	$T(x) = -999 + 104.1x - 1.968x^2$	$S(x) = 249.5 + 36.6x - 4.19x^2$	$H(x) = 193 + 9.8x - 0.125x^2$
11	$R(x) = -45.2 + 1x - 0.0047x^2$	$T(x) = -1137 + 116x - 2.17x^2$	$S(x) = 338.2 + 8.1x + 1.24x^2$	$H(x) = 312 + 7.9x - 0.118x^2$
12	$R(x) = -60.4 + 1.1x - 0.0049x^2$	$T(x) = -1110 + 113x - 2.07x^2$	$S(x) = 306.5 + 46x - 3.96x^2$	$H(x) = 331 + 7.6x - 0.117x^2$
13	$R(x) = -54.6 + 1.1x - 0.0052x^2$	$T(x) = -1142 + 113x - 2.07x^2$	$S(x) = 335.8 + 28.6x - 2.95x^2$	$H(x) = 353 + 6.6x - 0.112x^2$
14	$R(x) = -52.4 + 1.0x - 0.0047x^2$	$T(x) = -829.1 + 84.2x - 1.42x^2$	$S(x) = 313.2 + 16.5x - 0.42x^2$	$H(x) = 360.2 + 4.8x - 0.09x^2$
15	$R(x) = -25.3 + 0.8x - 0.0034x^2$	$T(x) = -508.4 + 53.0x - 0.83x^2$	$S(x) = 232.0 + 22.8x - 1.55x^2$	$H(x) = 315.9 + 2.9x - 0.07x^2$
16	$R(x) = -9.68 + 0.6x - 0.0023x^2$	$T(x) = -302.4 + 30.9x - 0.41x^2$	$S(x) = 187.8 + 10.9x - 1.61x^2$	$H(x) = 324.7 - 1.6x - 0.02x^2$
17	$R(x) = 1.74 + 0.56x - 0.0028x^2$	$T(x) = -213.6 + 23.6x - 0.37x^2$	$S(x) = 164.1 - 17.3x - 2.11x^2$	$H(x) = 148.4 + 1.3x - 0.03x^2$
18	$R(x) = 10.5 + 0.3x - 0.0055x^2$	$T(x) = -90.3 + 11.1x - 0.191x^2$	$S(x) = 48.2 + 12.3x - 1.784x^2$	$H(x) = 49 + 1.24x - 0.02x^2$
19	$R(x) = 3.26 + 0.3x - 0.0052x^2$	$T(x) = 6.18 + 11.1x - 0.017x^2$	$S(x) = 16.1 + 2.5x + 0.213x^2$	$H(x) = 3.5 + 0.66x - 0.005x^2$
20	$R(x) = -0.83 + 0.3x - 0.0042x^2$	$T(x) = -5.23 + 1.02x - 0.021x^2$	$S(x) = 6.17 + 0.27x + 0.23x^2$	$H(x) = 3.7 + 0.15x - 0.002x^2$
21	$R(x) = 0.35 - 0.34x + 0.018x^2$	$T(x) = -3.39 + 0.4x - 0.087x^2$	$S(x) = 0.77 + 0.34x - 0.081x^2$	$H(x) = 2.1 - 0.03x - 0.002x^2$

Розробка математичної моделі прогнозування погодинного генерування ФЕС

Запропоновані метеорологічні параметри використовуються, як вхідні дані для нейронної мережі. Оскільки нейронні мережі повинні адаптуватися до геолокації і мати можливість повторно навчатися для інших станцій, використовуємо алгоритм зворотного поширення помилки. Основна ідея цього методу полягає в поширенні сигналів помилок з мережевих виходів на його входи, у зворотному напрямку до прямого поширення сигналів в нормальному режимі роботи. Щоб мати можливість застосувати метод зворотного поширення помилки, передатна функція нейронів повинна бути диференційованою. Даний метод є модифікацією класичного методу градієнтного спуску. Нейронна мережа матиме наступний вигляд див. рис. 1

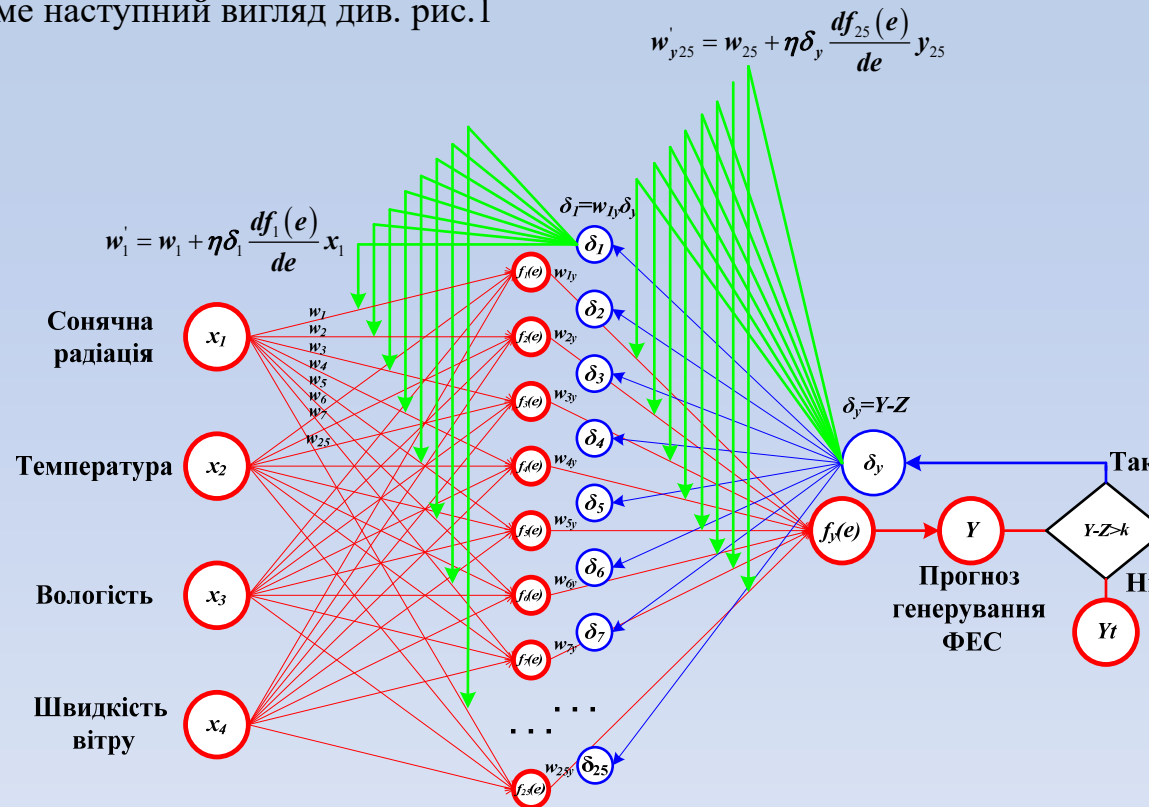


Рисунок 1– Нейронна мережа для прогнозування генерування ФЕС на наступну добу

Розробка програмної реалізації моделі погодинного прогнозування генерування ФЕС на добу наперед 9

Налаштування нейронної мережі

Оберіть ФЕС:

ФЕС Димерка

Оберіть сезон:

Весна

Оберіть Годину:

8

Learn Rate

0.25

Momentum

0.7

Розмір навчальної вибірки:

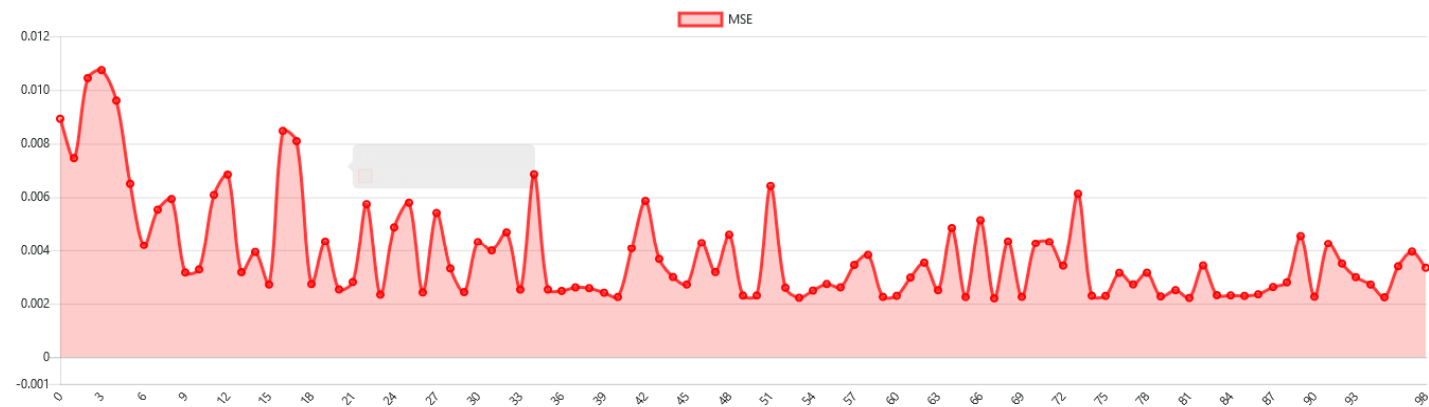
2019-March-01

2019-March-09

Навчити модель

Зміна помилки тренування мережі

Значення помилки - MSE



Розробка програмної реалізації моделі погодинного прогнозування генерування ФЕС на добу наперед

10

Прогноз погоди

Оберіть ФЕС:

ФЕС Димерка

Вибір дати прогнозу погоди:

2019-March-01

2019-March-04

Джерело прогнозу:

Meteoblue

Метеопараметри

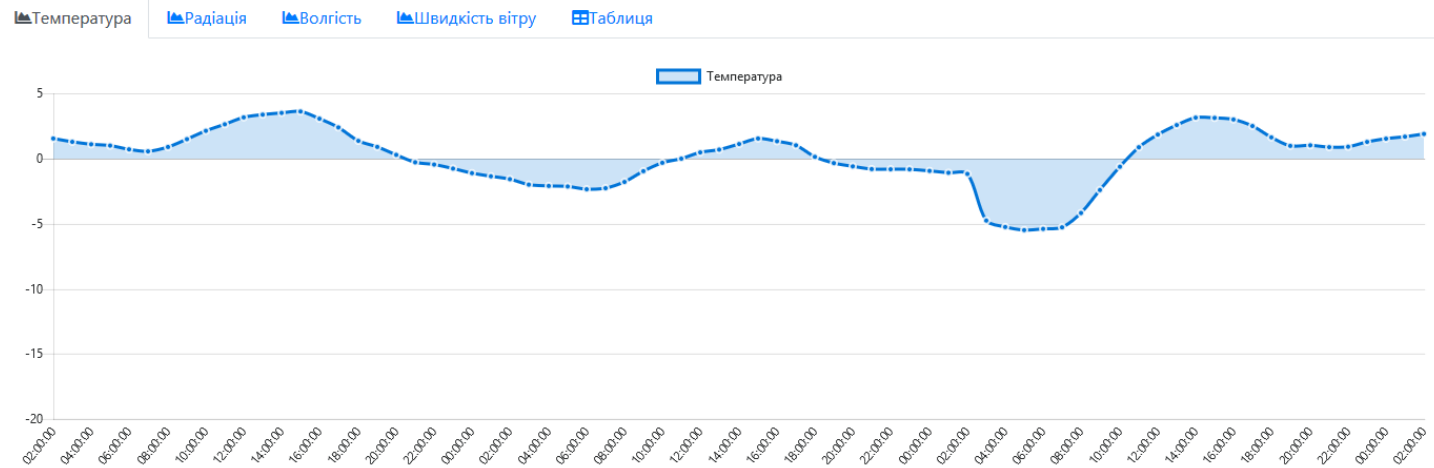
Сонячна Радіація

Температура

Швидкість вітру

Вологість

Обрати



Розробка програмної реалізації моделі погодинного прогнозування генерування ФЕС на добу наперед

11

Прогноз генерування ФЕС

Оберіть ФЕС:

ФЕС Велитон

Оберіть сезон:

Весна

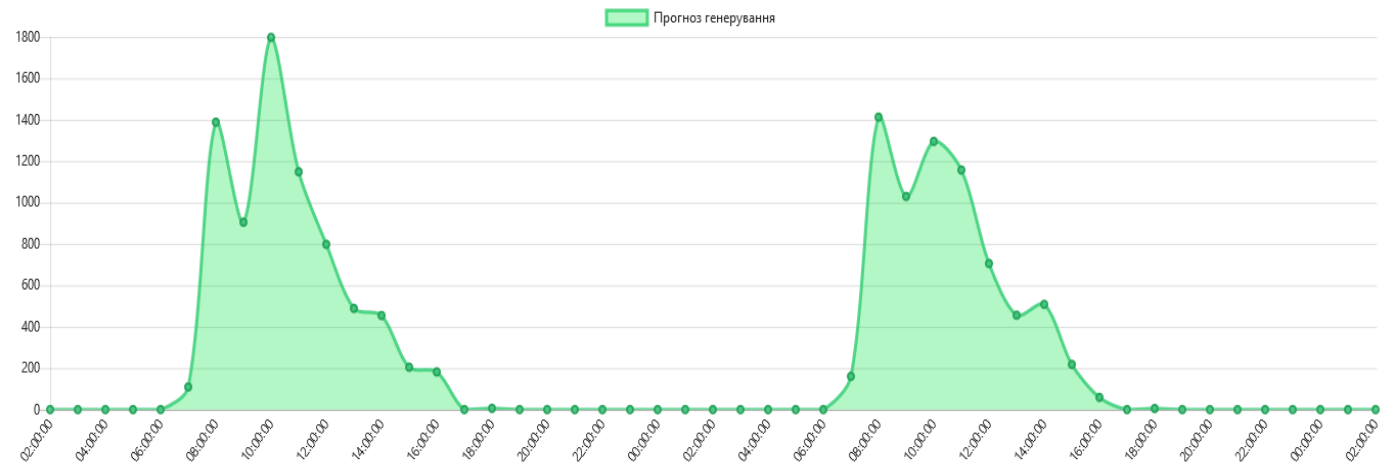
Оберіть дату:

2019-March-01

2019-March-03

Обрати

Генерування Таблица



Розробка програмної реалізації моделі погодинного прогнозування генерування ФЕС на добу наперед

12

Аналіз результатів прогнозування

Графіки факту генерування та результатів прогнозування

Оберіть дату:

2019-03-01

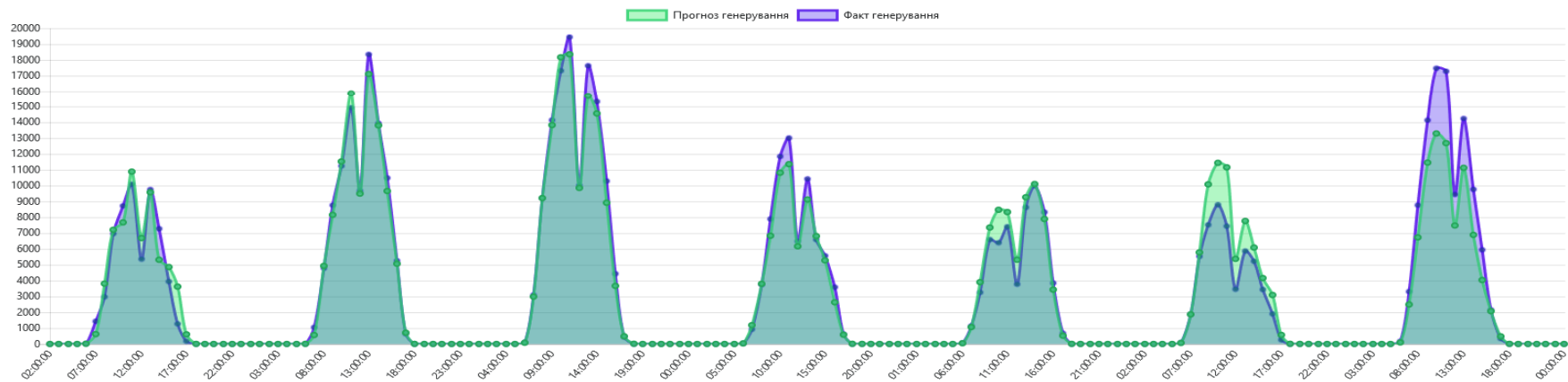


2019-03-08

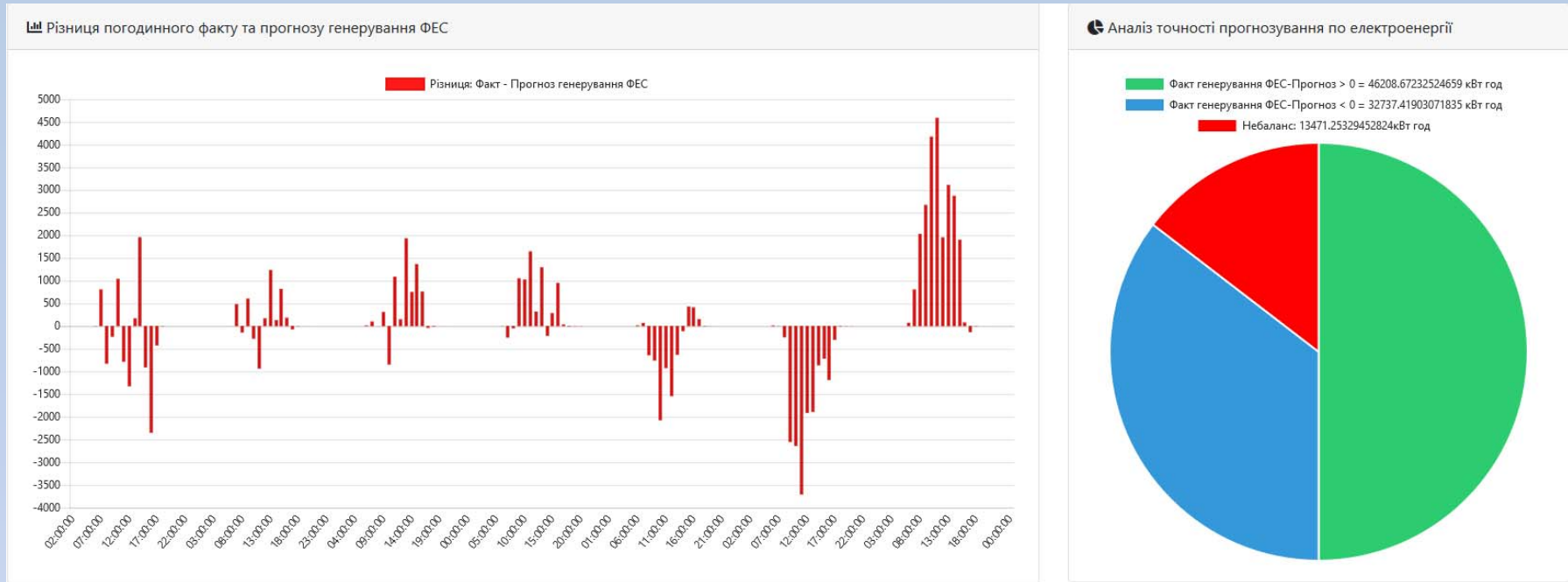


ФЕС Димерка, ФЕС Ставчан, ФЕС Велитон, ФЕС

Обрати



Розробка програмної реалізації моделі погодинного прогнозування генерування ФЕС на добу наперед 13



Чисельне представлення отриманого результату

Кількість електроенергії згенерованої за звітній період, кВт год	Кількість електроенергії прогнозованої за звітній період, кВт год	Кількість електроенергії, коли "Факт - Прогноз > 0", кВт год	Кількість електроенергії, коли "Факт - Прогноз < 0", кВт год	Модуль абсолютної похибки, "Факт - Прогноз", кВт год	Відносна похибка, %
563734.8000000002	550263.5467054716	46208.67232524659	32737.41903071835	78946.09135596493	14.004118843818922

1. Аналіз Закону України «Про ринок електричної енергії» дозволяє зробити висновок щодо необхідності розробки методів та засобів прогнозування погодинного генерування електроенергії на добу наперед.
2. Прогнозування має забезпечувати, в кінцевому рахунку, точність в межах 5%. Для забезпечення такої точності необхідно мати «якісні» дані щодо ретроспективи роботи фотоелектричної станції і відповідно точний прогноз метеопараметрів на добу наперед.
3. Проведений в роботі аналіз даних, виконаний з використанням сучасних засобів математичного аналізу, показав вплив на генеровану електричну енергію таких метеопараметрів як сонячна радіація на поверхні землі, температура навколишнього середовища, швидкість вітру та вологість. Досліджено вплив різних рівнів хмарності на потужність генерування. Серед розглянутих рівнів хмарності (верхній, середній, нижній), що умовно розділяються за висотою над землею, найбільше впливає нижній рівень хмарності, до якого можна віднести купчасті, дощові хмари. Саме вони в найбільшій мірі розмінюють сонячну радіацію.
4. На основі визначених метеопараметрів, розроблено метод погодинного прогнозу генерування фотоелектричних станцій на добу наперед. Такий метод, забезпечує точність погодинного прогнозу генерування ФЕС на рівні 80%.