

Інформаційна технологія ідентифікації змін емоційного стану людини за мімічними проявами для систем, що відповідають вимогам безпеки

Калита Олег, Олександр Бармак, 2023 рік

1. Model of the facial emotions expressions based on grouping classes of feature vectors / O. Barmak, O. Kalyta, Iu. Krak, E. Manziuk, V. Kuznetsov. Intellectual Systems of Decision Making and Problem of Computational Intelligence (ISDMCI-2021) : Lecture Notes in Data Engineering, Computational Intelligence, and Decision Making. Vol. 1246. (Zalizniy Port, Ukraine, 25–29 May 2020). Cham : Springer Nature, Inc., 2021. P. 65–76 (Scopus). URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-54215-3_5
2. Kalyta O. Information technology of facial emotion recognition for visual safety surveillance. Computer systems and information technologies. 2022. No. 1(6). P. 54–61. URL: <https://doi.org/10.31891/csit-2022-1-7>
3. Facial emotion recognition for photo and video surveillance based on machine learning and visual analytics / O. Kalyta et al. Applied Sciences. 2023. Vol. 13, no. 17. P. 9890. URL: <https://doi.org/10.3390/app13179890>



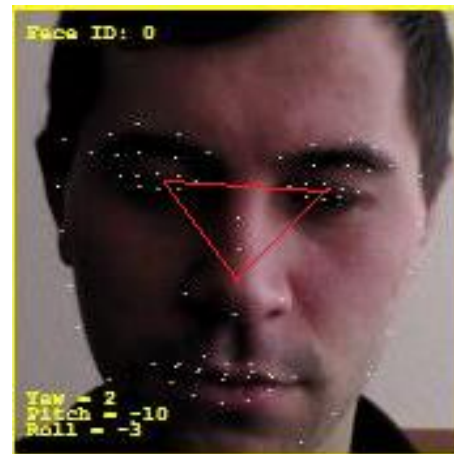
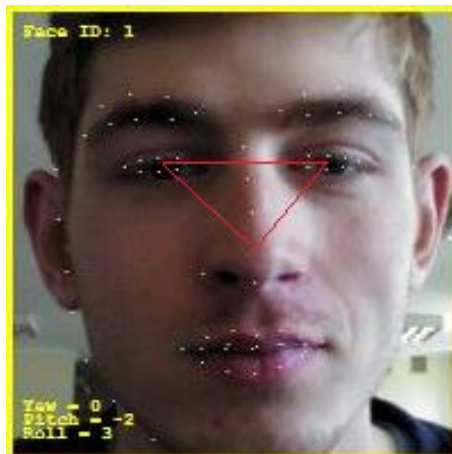
Актуальність теми

- Упродовж останніх років, сфера розроблення інформаційних систем, що відповідають вимогам безпеки, стрімко зростає.
- Актуальною проблемою в цій сфері є здатність точно ідентифікувати та інтерпретувати людську поведінку, зокрема емоційні стани людей у локалізованій групі, що є вкрай важливим для ефективного оцінювання загроз та реагування на них.
- Розпізнавання емоцій за мімічними проявами людини є потенційним рішенням цієї проблеми, з огляду на його здатність виявляти та інтерпретувати невербальні сигнали.
- Отже, з огляду на вище викладене, актуальною науковою задачею є розроблення інформаційної технології (ІТ) ідентифікації змін емоційного стану людини за мімічними проявами, яке забезпечить покращення ефективності виявлення аномальної поведінки в натовпі для систем, що відповідають вимогам безпеки.

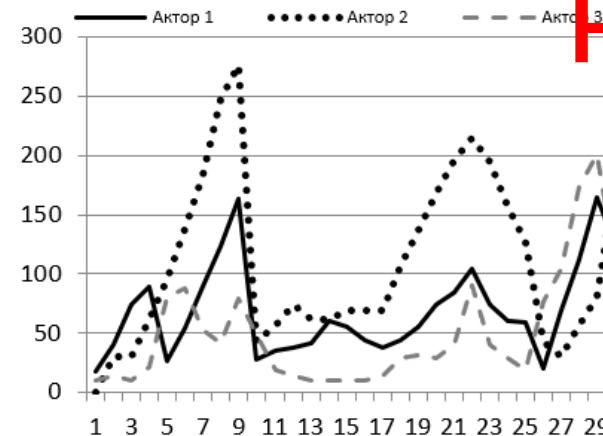


Модель подання мімічних проявів

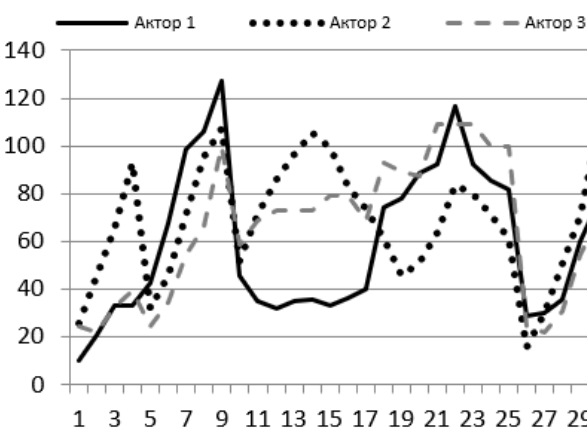
НН1



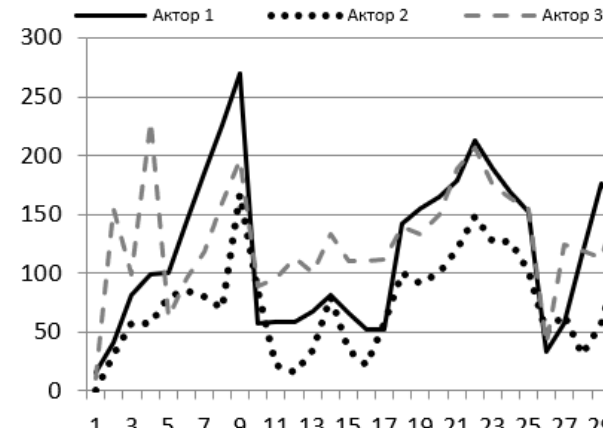
а)



б)



в)

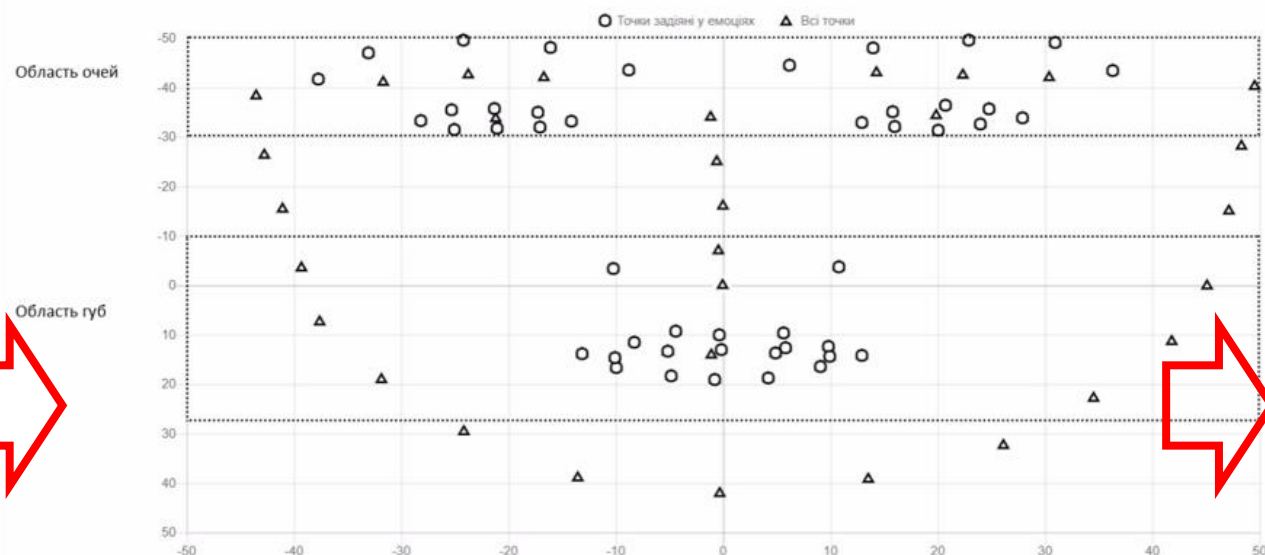


г)

Графіки зміщення специфічних точок-особливостей для базових людських емоцій: а) «Злість»; б) «Страх»; в) «Радість»; г) «Сум»

Модель подання мімічних проявів

НН1



Точки-особливості обличчя, що відповідають за міміку емоцій

Візуальний аналіз якісних характеристик для кожної ділянки обличчя

Ділянка обличчя		Якісні характеристики ділянок обличчя				
		без змін	трохи опущені	опущені	трохи підняті	підняті
Брови			×			
Очі	Верхні повіки					
	Зовнішні кутики очей		×	×	×	
Губи	Кутик губ		×			
	Нижня частина верхньої губи					
	Верхня частина нижньої губи					



Подання мімічних проявів емоцій якісними характеристиками

Ознаки	Ділянки обличчя	Злість	Страх	Радість	Сум
x_1	Очі	примружені	розплющені	нормальні	нормальні
x_2	Губи	нормальні	нормальні	розтягнуті	зжаті
x_3	Брови	опущені	підняті	підняті	опущені

НН1

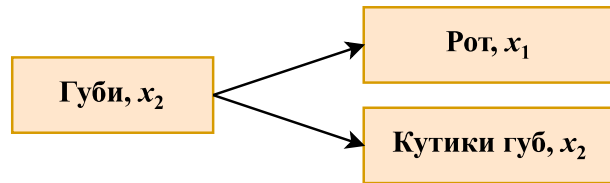
$$\mathbf{X} = (x_i)_{i=1}^3$$

Очі, x_1

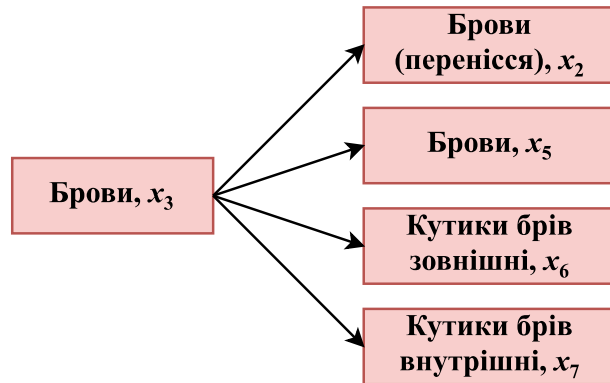
Група м'язів навколо очей

$$\mathbf{X} = (x_i)_{i=1}^7$$

Очі, x_3



Група м'язів навколо рота



Група м'язів навколо брів

Якісна характеристика ознак мімічних проявів у розрізі емоційних станів (1)

#	Якісна ознака	Злість	Критерій зміни	Страх	Критерій зміни	Радість	Критерій зміни
x_1	Рот	закритий	[0;0.3]	привідкритий	[0.3;0.7]	привідкритий або відкритий	[0.6;1]
x_2	Кутики губ	припідняті	[0.3;0.7]	опущені	[0;0.3]	підняті	[0.7;1]
x_3	Очі	примружені	[0;0.2]	широко розкриті	[0.5;1]	примружені або розкриті	[0.2;0.5]
x_4	Брови (перенісся)	зведені до перенісся	[0;0.3]	розведені	[0.7;1]	нормальні	[0.3;0.7]
x_5	Брови	опущені	[0;0.3]	підняті вверх	[0.7;1]	припідняті вверх або нормальні	[0.3;0.7]
x_6	Кутики брів зовнішні	опущені	[0;0.3]	зовнішні підняті вверх	[0.6;1]	припідняті вверх або нормальні	[0.3;0.7]
x_7	Кутики брів внутрішні	опущені	[0;0.3]	внутрішні підняті вверх	[0.6;1]	припідняті вверх або нормальні	[0.3;0.7]

Якісна характеристика ознак мімічних проявів у розрізі емоційних станів (2)

#	Якісна ознака	Нейтральний стан	Критерій зміни	Сум	Критерій зміни
x_1	Рот	закритий	[0;0.3]	закритий	[0;0.3]
x_2	Кутики губ	опущені	[0;0.3]	опущені	[0;0.3]
x_3	Очі	примружені або розкриті	[0.2;0.5]	примружені	[0;0.3]
x_4	Брови (перенісся)	нормальні	[0.3;0.7]	зведені до перенісся або нормальні	[0.1;0.5]
x_5	Брови	нормальні	[0.3;0.7]	опущені або нормальні	[0.2;0.6]
x_6	Кутики брів зовнішні	нормальні	[0.3;0.7]	опущені або нормальні	[0.2;0.6]
x_7	Кутики брів внутрішні	нормальні	[0.3;0.7]	опущені або нормальні	[0.2;0.6]

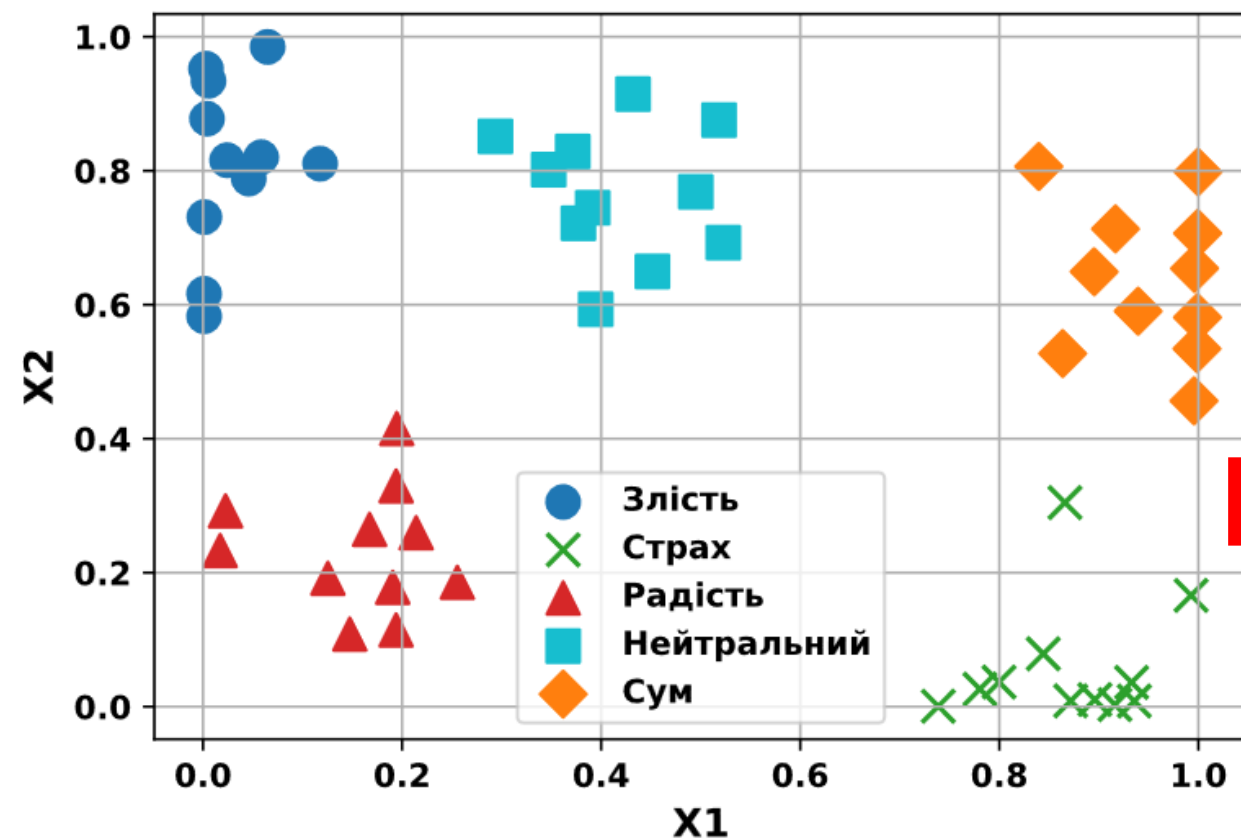
Розроблене подання мімічних проявів у розрізі емоційних станів слугує основою для синтезу моделі, за якою буде проводитися ідентифікація:

$$f: P \rightarrow \langle \mathbf{X}, \mathbf{W} \rangle,$$

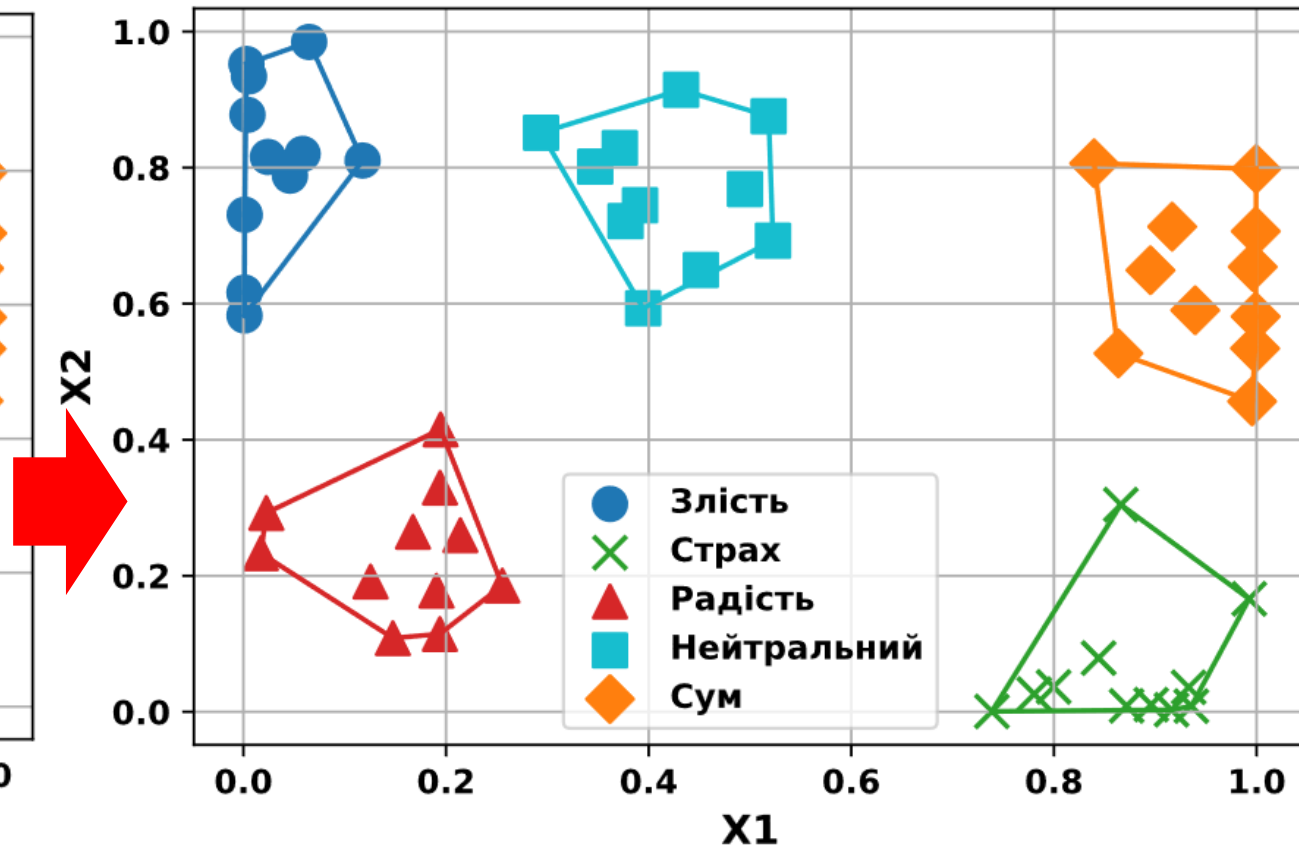
де P – матриця пікселів вхідного зображення обличчя людини; \mathbf{X} – вектор ознак мімічних проявів емоцій на обличчі людини, $\mathbf{X} = (x_i)_{i=1}^7$, \mathbf{W} – вектор ваг моделі ідентифікації емоційного стану на обличчі людини.

Валідація моделі подання мімічних проявів

НН1



Візуалізація емоційних станів «Злість», «Страх», «Радість», «Нейтральний» та «Сум» в результаті застосування MDS



Візуалізація класів емоційних станів «Злість», «Страх», «Радість», «Нейтральний» та «Сум» та кусково-лінійні роздільники цих класів

Метод геометричної інтерпретації

НН2

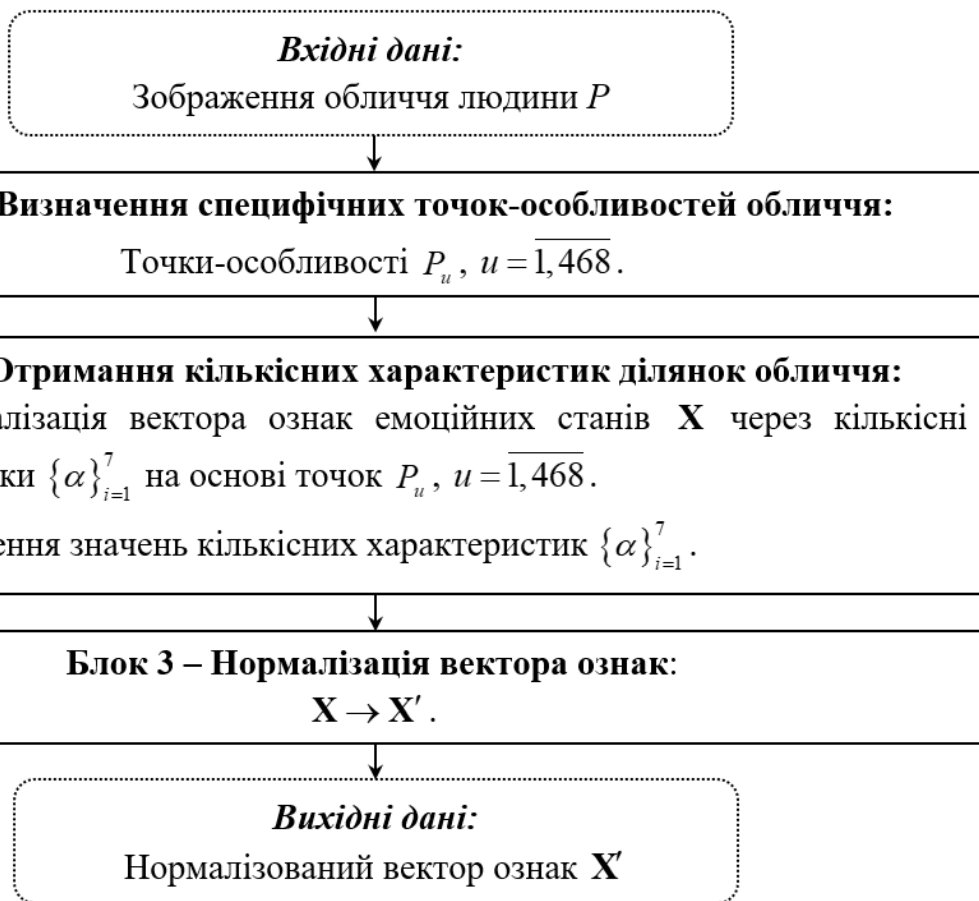


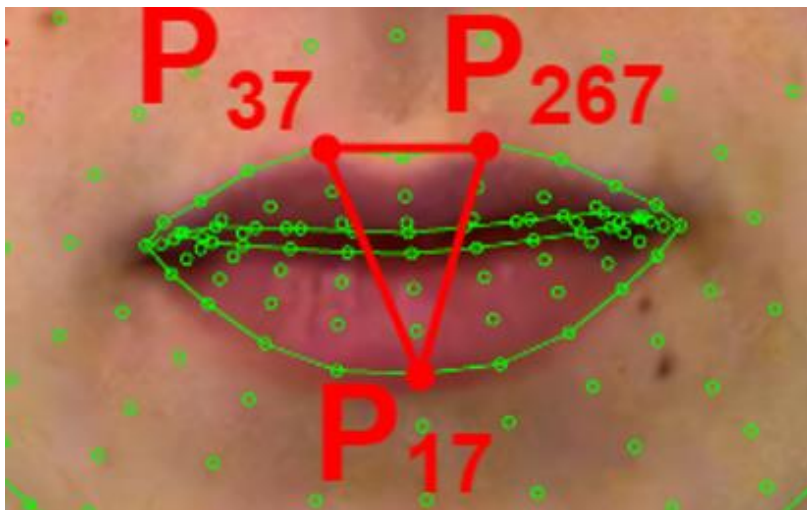
Схема методу геометричної інтерпретації ділянок обличчя

Подання мімічних проявів емоцій якісними характеристиками

№	Частина обличчя	Стан	Ознака	Тип характеристики
α_1	Рот	Відкритий / Закритий / Закритий або привідкритий	$\alpha_1 \in \{0..1\}$, 0 – закритий, 1 – відкритий	Трикутник, що описує рот
α_2	Кутики губ	Опущені / підняті	$\alpha_2 \in \{0..1\}$, 0 – опущені, 1 – підняті	Відношення відрізків до кутиків губ
α_3	Очі	Широко розкриті / розкриті (норм) / примружені	$\alpha_3 \in \{0..1\}$, 0 – примружені (майже закриті), 1 – широко розкриті	Чотирикутник, що описує ліве око
α_4	Брови (перенісся)	Зведені до перенісся / нормальні	$\alpha_4 \in \{0..1\}$, 0 – норм, 1 – зведені	Чотирикутник, що описує перенісся
α_5	Брови	Підняті вверх / нормальні	$\alpha_5 \in \{0..1\}$, 0 – норм, 1 – підняті	Трикутник, що описує верхню частину обличчя до брів
α_6	Кутики брів зовнішні	Підняті / нормальні	$\alpha_6 \in \{0..1\}$, 0 – норм, 1 – підняті	Відрізок до зовнішнього кутика брів
α_7	Кутики брів внутрішні	Підняті / нормальні	$\alpha_7 \in \{0..1\}$, 0 – норм, 1 – підняті	Відрізок до внутрішнього кутика брів

Метод геометричної інтерпретації

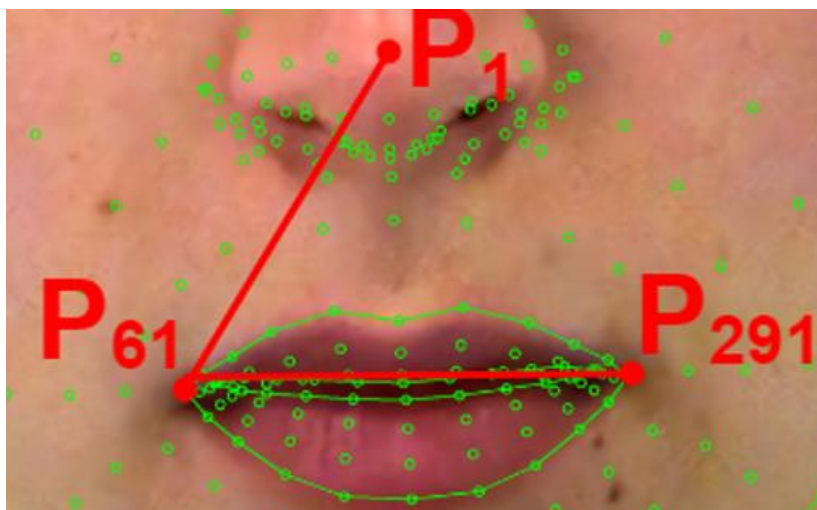
НН2



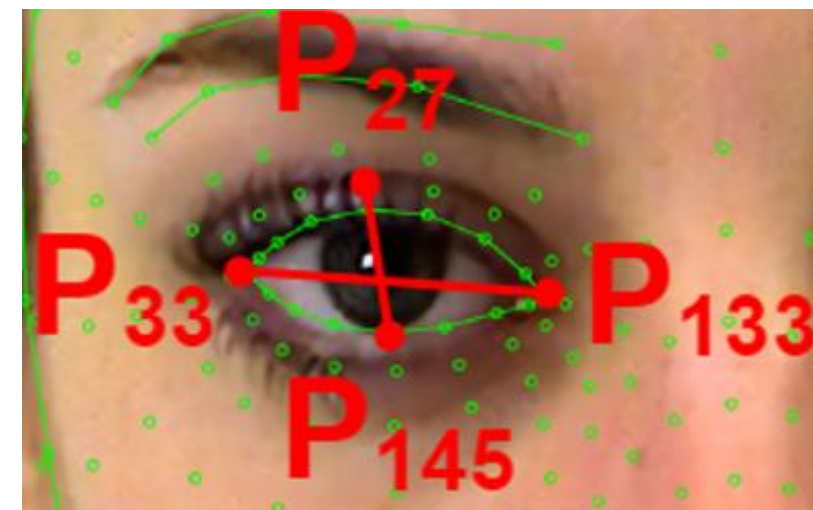
α_1

$$= \sqrt{p_0(p_0 - \overline{P_{17}P_{37}})(p_0 - \overline{P_{37}P_{267}})(p_0 - \overline{P_{267}P_{17}})},$$

$$p_0 = \frac{\overline{P_{17}P_{37}} + \overline{P_{37}P_{267}} + \overline{P_{267}P_{17}}}{2}$$



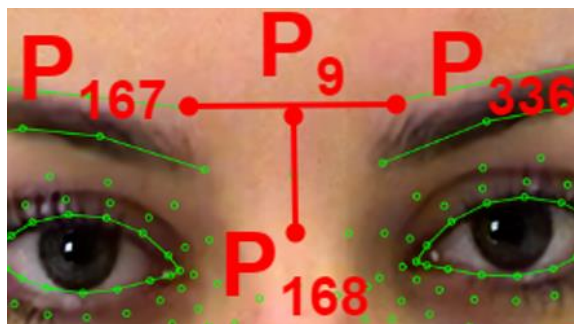
$$\alpha_2 = \frac{3\overline{P_1P_{61}}}{\overline{P_{61}P_{291}}}.$$



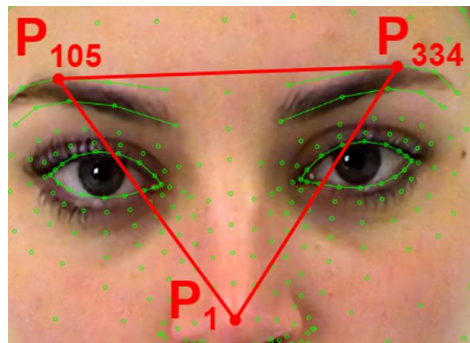
$$\alpha_3 = \overline{P_{27}P_{145}} \cdot \overline{P_{33}P_{133}}.$$

Метод геометричної інтерпретації

НН2



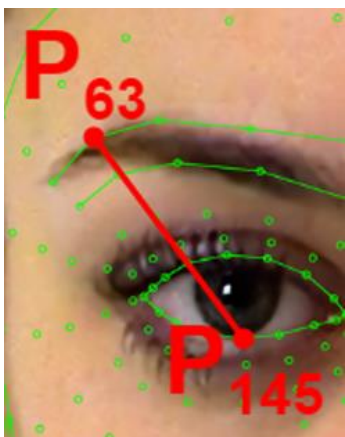
$$\alpha_4 = \overline{P_9 P_{168}} \cdot \overline{P_{107} P_{336}}$$



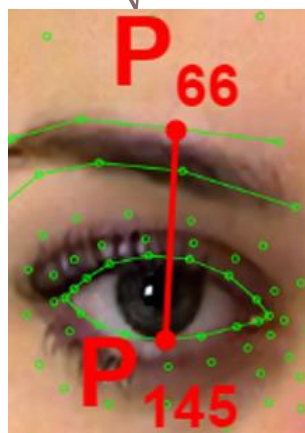
$$\alpha_5 = \sqrt{p_0(p_0 - \overline{P_1 P_{105}})(p_0 - \overline{P_{105} P_{334}})(p_0 - \overline{P_{334} P_1})},$$



$$x_i' = \frac{\alpha_i - \alpha_{i\min}}{\alpha_{i\max} - \alpha_{i\min}}, \quad i = \overline{1,7}$$



$$\alpha_6 = \overline{P_{63} P_{145}}$$



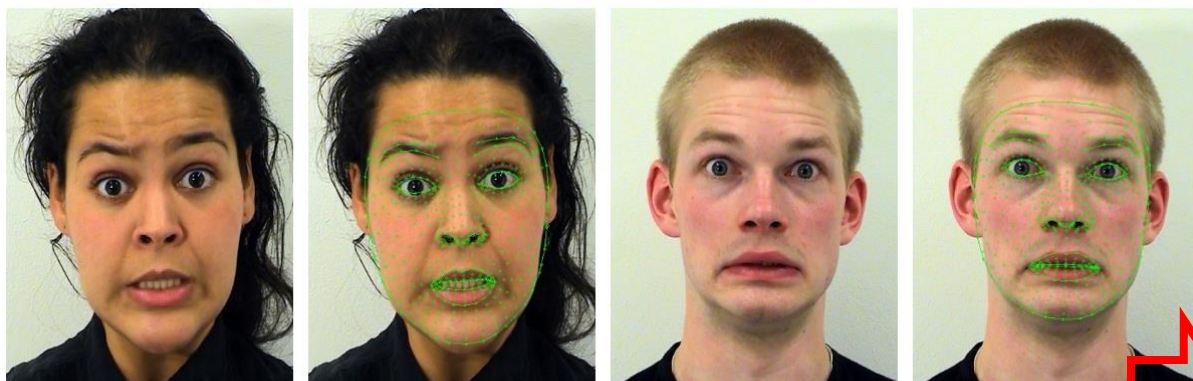
$$\alpha_7 = \overline{P_{66} P_{145}}$$

Демонстрація методу геометричної інтерпретації

НН2

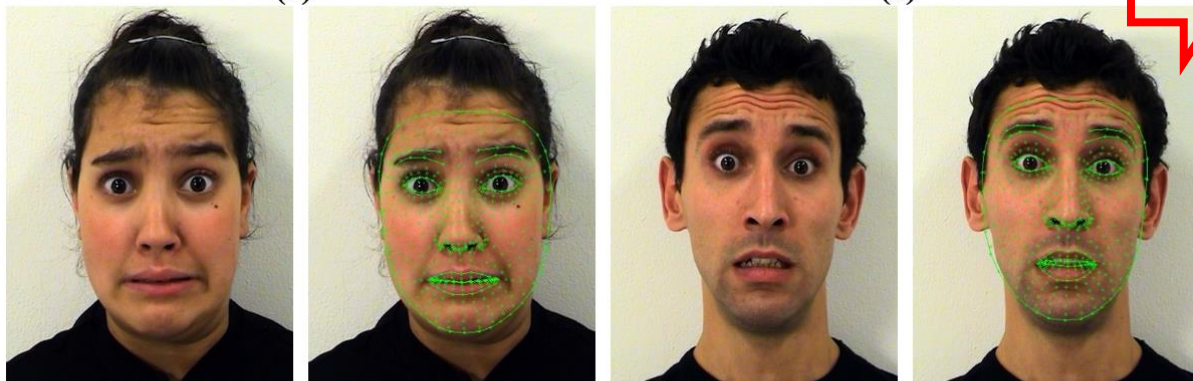
Подання мімічних проявів емоційних станів через кількісні характеристики за запропонованою ІТ на основі методу інтерпретації

Ознака	Поєднання точок-особливостей	Тип характеристики	Характеристика
x_1	$\Delta P_{17}P_{37}P_{267}$	Трикутник, що описує рот	α_1
x_2	$\overline{P_1P_{61}}$ та $\overline{P_{61}P_{291}}$	Відношення відрізків до кутиків губ	α_2
x_3	$\overline{P_{27}P_{145}}$ та $\overline{P_{33}P_{133}}$	Чотирикутник, що описує ліве око	α_3
x_4	$\overline{P_9P_{168}}$ та $\overline{P_{107}P_{336}}$	Чотирикутник, що описує перенісся	α_4
x_5	$\Delta P_1P_{105}P_{334}$	Трикутник, що описує верхню частину обличчя до брів	α_5
x_6	$\overline{P_{63}P_{145}}$	Відрізок до зовнішнього кутика брів	α_6
x_7	$P_{66}P_{145}$	Відрізок до внутрішнього кутика брів	α_7



(а)

(б)



(в)

(г)

Приклад визначення точок-особливостей на обличчі різних моделей з кодовою назвою: (а) F09fear, (б) M03fear, (в) F10fear та (г) M10fear

Демонстрація методу геометричної інтерпретації НН2

Подання мімічних проявів емоційних станів через характеристики $\{\alpha\}_{i=1}^7$ для

розглядуваних зображень

Харак- теристики	F09fear	M03fear	F10fear	M10fear	$\alpha_{i_{\min}},$ $i = \overline{1,7}$	$\alpha_{i_{\max}},$ $i = \overline{1,7}$
α_1	0,00395	0,00029	0,00111	0,00217	0,01701	0,00004
α_2	0,00294	0,00190	0,00248	0,00234	0,00504	0,00106
α_3	0,00161	0,00085	0,00013	0,00073	0,00835	0,00001
α_4	0,00987	0,00814	0,00800	0,00823	0,01015	0,00469
α_5	0,14079	0,11993	0,11986	0,12639	0,14079	0,08129
α_6	0,14791	0,12797	0,12995	0,13153	0,14791	0,09699
α_7	0,13097	0,11078	0,11262	0,12031	0,13097	0,06756

Нормалізовані значення вектор ознак \mathbf{X}' для розглядуваних зображень

Елементи вектора ознак \mathbf{X}'	F09fear	M03fear	F10fear	M10fear
x'_1	0,2303	0,0631	0,0145	0,1254
x'_2	0,4720	0,3564	0,2124	0,3224
x'_3	0,1923	0,0146	0,1011	0,0861
x'_4	0,9495	0,6061	0,6327	0,6482
x'_5	1	0,6483	0,6495	0,7580
x'_6	1	0,6473	0,6086	0,6784
x'_7	1	0,7107	0,6816	0,8319

Метод гіперплощинної класифікації

ННЗ

Вхідні дані:
 $x(i) \in \mathbb{R}^m, i = \overline{1, n}$

1. Візуалізація, $\mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^2$

2. Мануальне розділення на класи у \mathbb{R}^2

3. Обернене відображення, $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^m$

3. Визначення коефіцієнтів гіперплощини

Вихідні дані:
 W, b

а)

Вхідні дані:
 $x \in \mathbb{R}^m, W, b$

Класифікація

Вихідні дані:
належність до класу

б)

Вхідними даними методу є множина n точок у просторі ознак: $x(i) \in \mathbb{R}^m, i = \overline{1, n}, m$ – кількість ознак.

На **кроці 1** методу виконується візуалізація вхідних даних у двовірний простір: $\mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^2$. В результаті отримуємо множину точок: $x'(i) \in \mathbb{R}^2, i = \overline{1, n}$.

На **кроці 2** безпосередньо реалізується візуальна аналітика, а саме:

1) у просторі \mathbb{R}^2 візуально оцінюється спроможність розділення навчальної вибірки за запропонованою моделлю векторного простору;

2) будуються людиною лінії (при такій можливості), що розділяють груповані хмари точок (класи) $x'(i) \in \mathbb{R}^2, i = \overline{1, n}$;



Схема методу гіперплощинної класифікації емоційного стану за мімічними проявами: а) навчання, б) класифікація



Метод гіперплощинної класифікації

ННЗ

Вхідні дані:
 $x(i) \in \mathbb{R}^m, i = \overline{1, n}$

1. Візуалізація, $\mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^2$

2. Мануальне розділення на класи у \mathbb{R}^2

3. Обернене відображення, $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^m$

3. Визначення коефіцієнтів гіперплощини

Вихідні дані:
 W, b

а)

Вхідні дані:
 $x \in \mathbb{R}^m, W, b$

Класифікація

Вихідні дані:
належність до класу

б)

3) запам'ятовуються координати початку і кінця цих ліній;

4) за неможливості розділити отримані класи однією лінією, формуються кусково-неперервні лінії (кінець однієї лінії є початком другої);

5) для кожної лінії, крім двох точок початку і кінця, отримуються ще $m - 2$ точки, що знаходяться рівномірно між точками початку та кінця.

У підсумку, отримується множина нових точок $x'^L(i, j) \in \mathbb{R}^2, i = \overline{1, l}, j = \overline{1, m}$, де l -кількість ліній, що i є результатом візуальної аналітики.

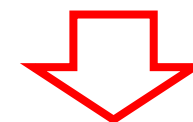


Схема методу гіперплощинної класифікації емоційного стану за мімічними проявами: а) навчання, б) класифікація



Метод гіперплощинної класифікації

ННЗ

Вхідні дані:
 $x(i) \in \mathbb{R}^m, i = \overline{1, n}$

1. Візуалізація, $\mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^2$

2. Мануальне розділення на класи у \mathbb{R}^2

3. Обернене відображення,
 $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^m$

3. Визначення коефіцієнтів гіперплощини

Вихідні дані:
 W, b

а)

Вхідні дані:
 $x \in \mathbb{R}^m, W, b$

Класифікація

Вихідні дані:
належність до класу

б)

На **кроці 3** проводимо обернене відображення $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^m$ (аналогічно кроку 1), для множин точок: $x'(i), x'^L(k, j) \in \mathbb{R}^2, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, k = \overline{1, l}$, в результаті якого отримуємо множину $x^L(k, j) \in \mathbb{R}^m, j = \overline{1, m}, k = \overline{1, l}$.

На **кроці 4**, за множиною точок $x^L(k, j) \in \mathbb{R}^m, j = \overline{1, m}, k = \overline{1, l}$ формуємо систему рівнянь гіперплощини, яка проходить через m точок. Таких систем буде стільки, скільки ліній у \mathbb{R}^2 . Для i -ої гіперплощини система алгебраїчних рівнянь матиме вигляд:

$$\begin{cases} w_1 x_1^L(i, 1) + w_2 x_2^L(i, 1) + \dots + w_m x_m^L(i, 1) + b = 0; \\ w_1 x_1^L(i, 2) + w_2 x_2^L(i, 2) + \dots + w_m x_m^L(i, 2) + b = 0; \\ \dots \\ w_1 x_1^L(i, m) + w_2 x_2^L(i, m) + \dots + w_m x_m^L(i, m) + b = 0. \end{cases}$$

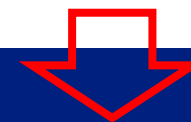


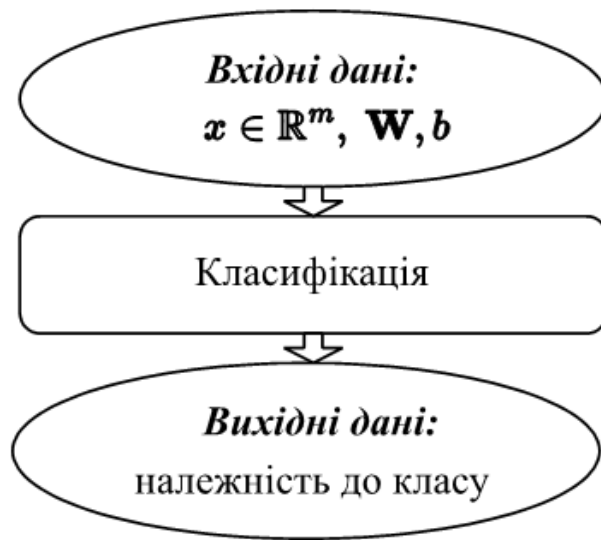
Схема методу гіперплощинної класифікації емоційного стану за мімічними проявами: а) навчання, б) класифікація

Метод гіперплощинної класифікації

ННЗ



а)



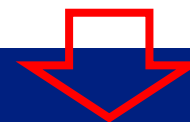
б)

Класифікація проходить за отриманим вектором вагових коефіцієнтів гіперплощини W . Лінійний класифікатор $d(X')$ визначається так:

$$d(X^*) = W^T X^* + b,$$

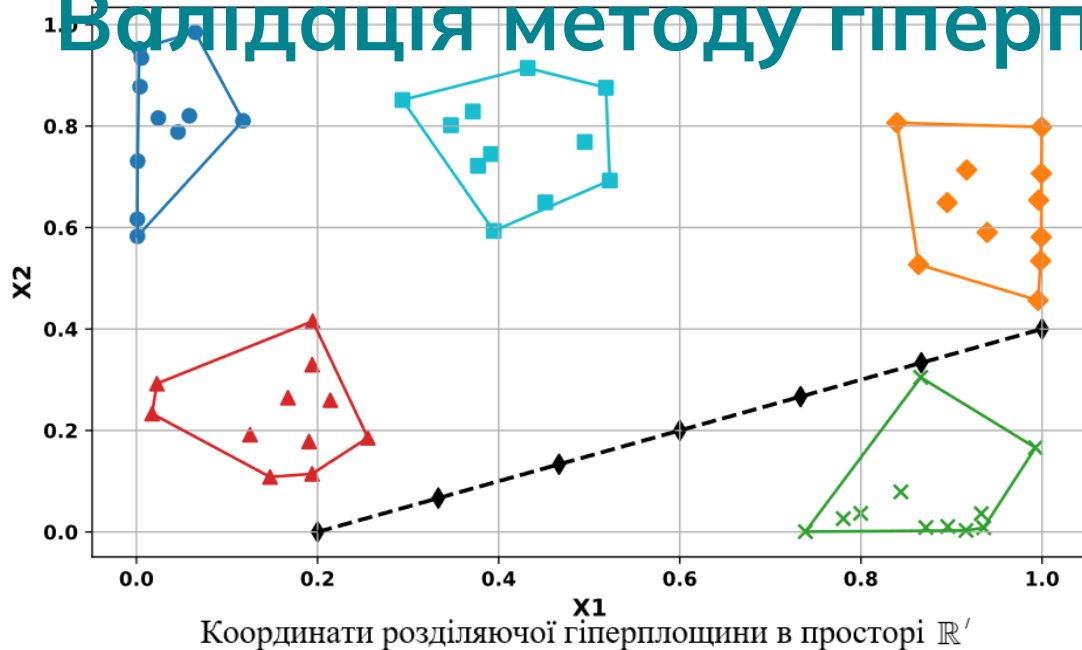
де $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*, 1)^T$ – нормалізований вектор ознак, який визначає образ об'єкту класифікації, $W = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T$ – вектор вагових коефіцієнтів гіперплощинного класифікатора, b – вільний коефіцієнт.

Вихідними даними методу гіперплощинної класифікації є результат класифікатора. Належність до класу визначається правилом відношення до класифікатора, тобто визначається розташування об'єкту відносно лінії класу.



Валідація методу гіперплощинної класифікації

ННЗ



Точки лінії	x_1^L	x_2^L	x_3^L	x_4^L	x_5^L	x_6^L	x_7^L
1	0,053	0,457	0,012	0,366	0,266	0,053	0,724
2	0,064	0,676	0,355	0,408	0,990	0,161	0,794
3	0,352	0,793	0,781	0,460	0,899	0,598	0,636
4	0,077	0,124	0,478	0,154	0,813	0,738	0,381
5	0,590	0,114	0,654	0,873	0,653	0,214	0,226
6	0,295	0,788	0,355	0,644	0,537	0,146	0,426
7	0,900	0,329	0,184	0,325	0,492	0,214	0,500

В результаті застосування методу гіперплощинної класифікації емоційного стану за мімічними проявами отримано вагові коефіцієнти розділяючої гіперплощини:

$$W = \begin{pmatrix} 0,005565 & 0,002142 & 0,027011 & 0,004986 \\ -0,0047 & -0,01164 & -0,03891 & 0,028614 \end{pmatrix}.$$

За визначеними ваговими коефіцієнтами побудовано лінійний класифікатор:

$$d(X') = 0,005565x'_1 + 0,002142x'_2 + 0,027011x'_3 + 0,004986x'_4 - 0,0047x'_5 - 0,01164x'_6 - 0,03891x'_7 + 0,028614.$$

Лінійний класифікатор використано в ІТ для класифікації емоційних проявів, і як наслідок, ідентифікації змін емоційного стану за мімічними проявами для систем, що відповідають вимогам безпеки.



Узагальнена схема використання розробленої ІТ

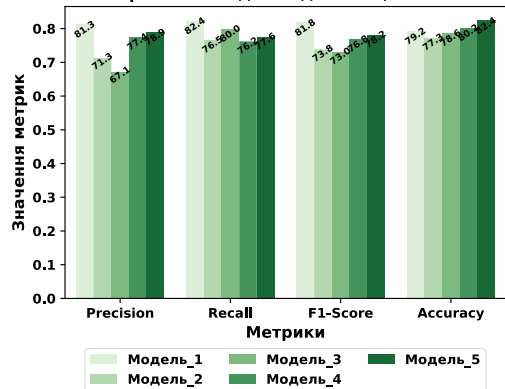
НН4



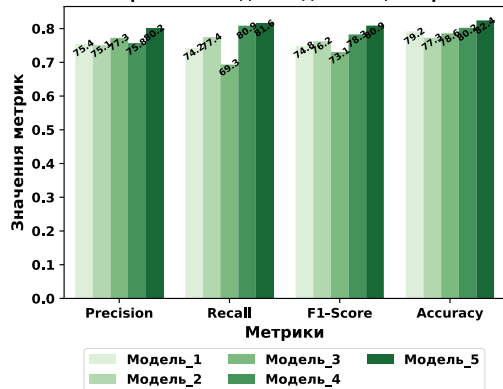
Тестування ІТ. Зростаюча шкала

НН4

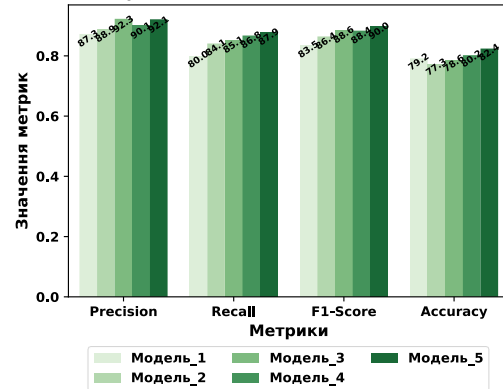
Порівняння моделей для емоції: Злість



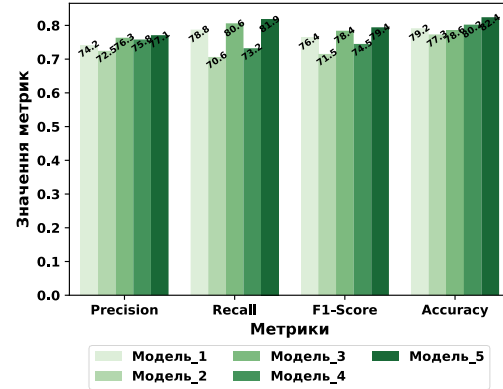
Порівняння моделей для емоції: Страх



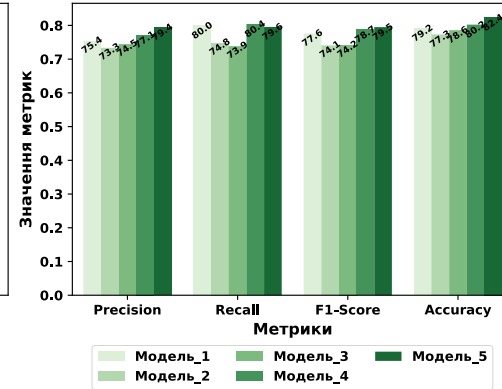
Порівняння моделей для емоції: Радість



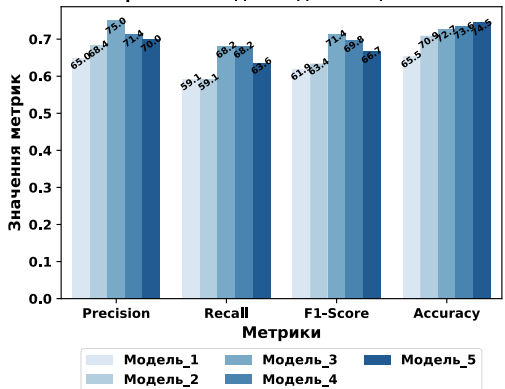
Порівняння моделей для емоції: Нейтр.



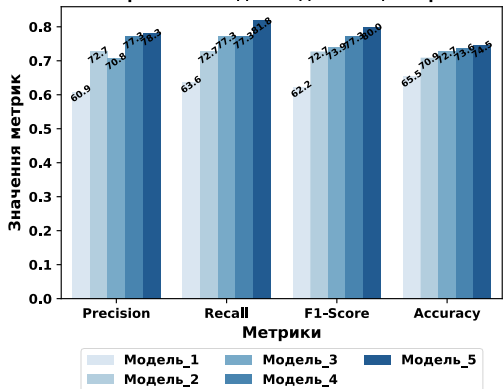
Порівняння моделей для емоції: Сум



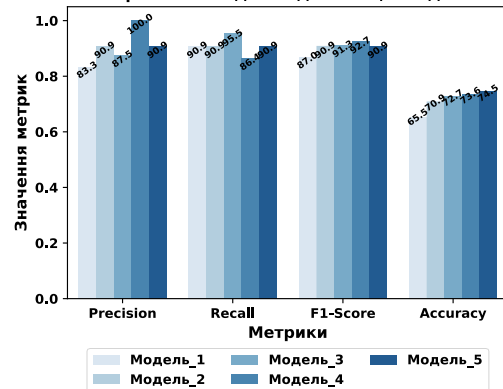
Порівняння моделей для емоції: Злість



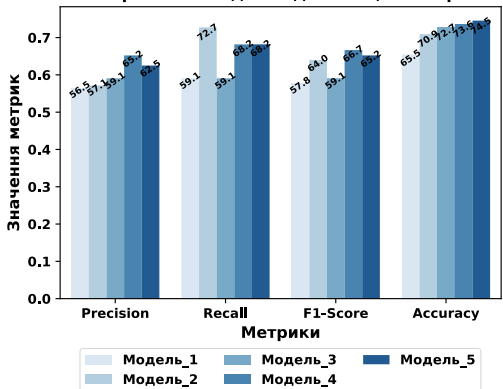
Порівняння моделей для емоції: Страх



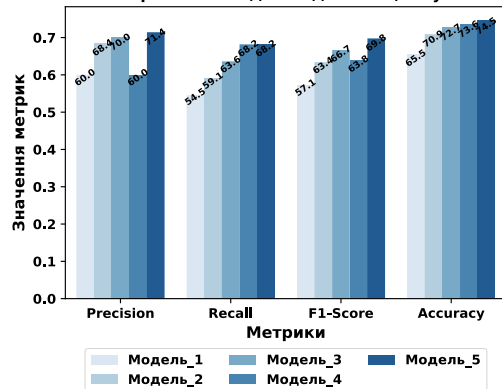
Порівняння моделей для емоції: Радість



Порівняння моделей для емоції: Нейтр.

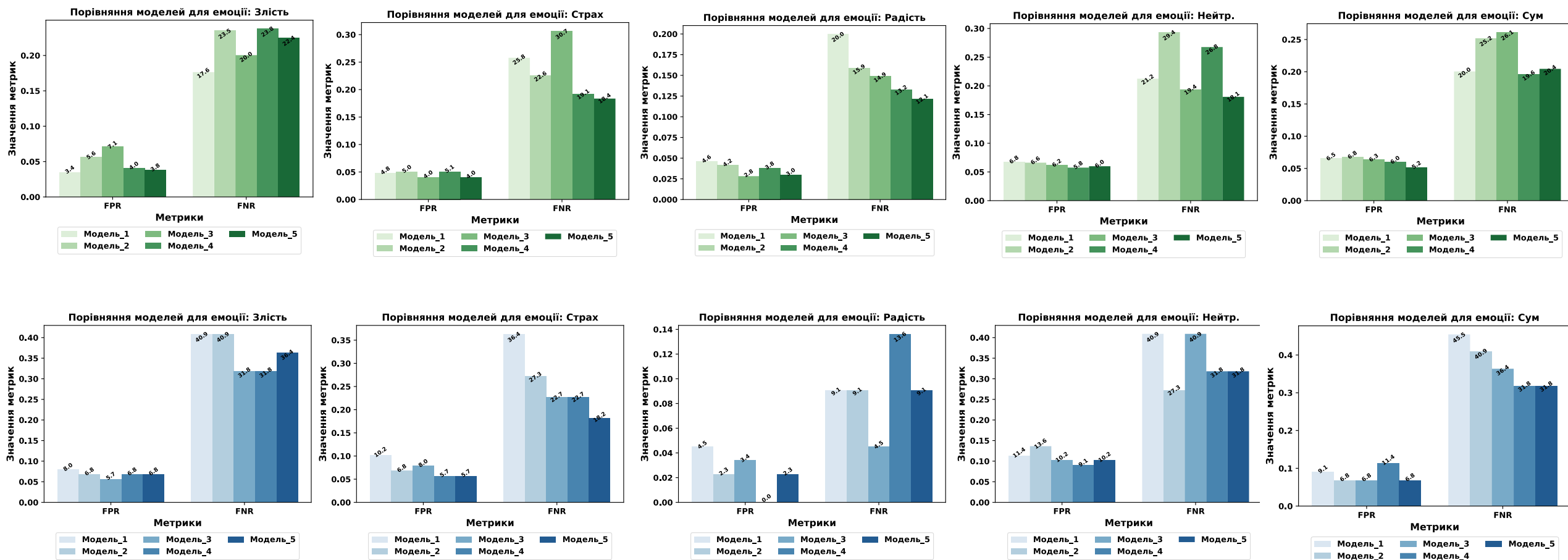


Порівняння моделей для емоції: Сум



Тестування ІТ. Спадає шкала

НН4



Тестування ІТ. Порівняння з state of the art

НН4

Оцінювання ІТ порівняно з сучасними підходами за зростаючою шкалою

Набір даних	Рейтинг моделей	Середнє значення Accuracy	Середнє значення Precision	Середнє значення Recall	Середнє значення F1-Score
FER+small	I місце	<i>IT</i> (82,42%)	<i>IT</i> (81,54%)	<i>IT</i> (81,71%)	<i>IT</i> (81,60%)
	II місце	<i>Модель 4</i> (80,23%)	<i>Модель 4</i> (79,24%)	<i>Модель 4</i> (79,50%)	<i>Модель 4</i> (79,33%)
	Різниця	↑ 2,20%	↑ 2,30%	↑ 2,21%	↑ 2,26%
ADFES-small	I місце	<i>IT</i> (74,55%)	<i>Модель 4</i> (74,78%)	<i>IT</i> (74,55%)	<i>IT</i> (74,51%)
	II місце	<i>Модель 4</i> (73,64%)	<i>IT</i> (74,62%)	<i>Модель 4</i> (73,64%)	<i>Модель 4</i> (74,04%)
	Різниця	↑ 0,91%	↓ 0,16%	↑ 0,91%	↑ 0,47%

Оцінювання ІТ порівняно з сучасними підходами за спадною шкалою

Набір даних	Рейтинг моделей	FPR	FNR
FER+small	I місце	<i>IT</i> (4,37%)	<i>IT</i> (18,29%)
	II місце	<i>Модель 4</i> (4,93%)	<i>Модель 4</i> (20,50%)
	Різниця за модулем	↑ 0,55%	↑ 2,21%
ADFES-small	I місце	<i>IT</i> (6,36%)	<i>IT</i> (25,45%)
	II / III місце	<i>Модель 4</i> (6,59%)	<i>Модель 4</i> (26,36%)
	Різниця за модулем	↑ 0,23%	↑ 0,91%