

```
## Warning in grepl(db, input): input string 43 is invalid in this locale
## Warning in grepl(db, input): input string 44 is invalid in this locale
## Warning in grepl(db, input): input string 45 is invalid in this locale
## Warning in grepl(db, input): input string 48 is invalid in this locale
## Warning in grep("^\\\\\\bibliography.+", input, value = TRUE): input
string 43 is invalid in this locale
## Warning in grep("^\\\\\\bibliography.+", input, value = TRUE): input
string 44 is invalid in this locale
## Warning in grep("^\\\\\\bibliography.+", input, value = TRUE): input
string 45 is invalid in this locale
## Warning in grep("^\\\\\\bibliography.+", input, value = TRUE): input
string 48 is invalid in this locale
## Warning in grep("^\\\\\\bibliography.+", input, value = TRUE): input
string 53 is invalid in this locale
```

РОЗДІЛ 1

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ ТА АРХІТЕКТУР

Для проведення чисельних експериментів, що наведені у підрозділах 1.1, 1.2 та 1.3 було обрано такі критерії оцінки:

- RMSE (Root Mean Squared Error, середньоквадратична похибка),
- SMAPE (Symmetric Mean Absolute Percentage Error, симетрична абсолютнона процентна похибка),

що обчислюються за формулами

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y(k) - \hat{y}(k))^2}, \quad (1.1)$$

та

$$\text{SMAPE} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{|y(k) - \hat{y}(k)|}{|y(k) + \hat{y}(k)|} \quad (1.2)$$

відповідно, де y – шуканий сигнал, \hat{y} – вихідний сигнал системи.

1.1. Моделювання розширенного нейро-фаззі нейрона

Датасет для першого експерименту (фазовий портрет наведено на рис. 1.1) було сгенеровано за формулою

$$\sin(k + \sin(2k)) \text{ для } k \in [1, 600]. \quad (1.3)$$

Результати експерименту наведено у таблиці нижче, а також проілюстровано залежність точності прогнозу від порядку висновування (рис. 1.2) та кількості функцій належності (рис. 1.3).

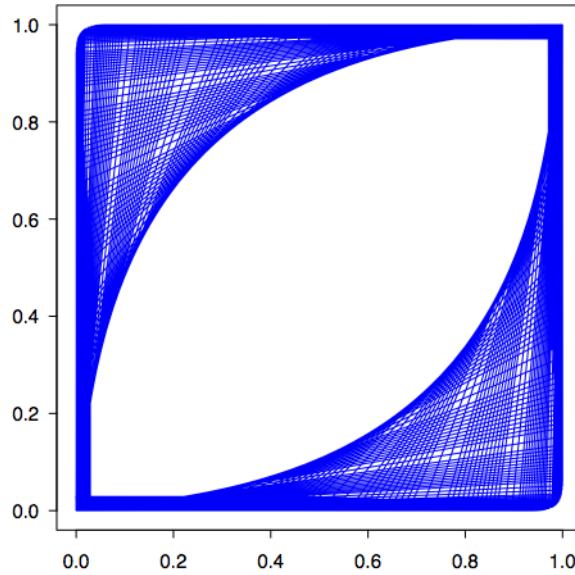


Рис. 1.1 – Фазовий портрет штучно сгенерованого датасету

Отже, як видно з таблиці 1.1 та рис. 1.4, можна зробити висновок, що точність прогнозу розширеного нео-фаззі нейрону вища від точності звичайного нео-фаззі нейрону (ENFN з нульовим порядком висновування).

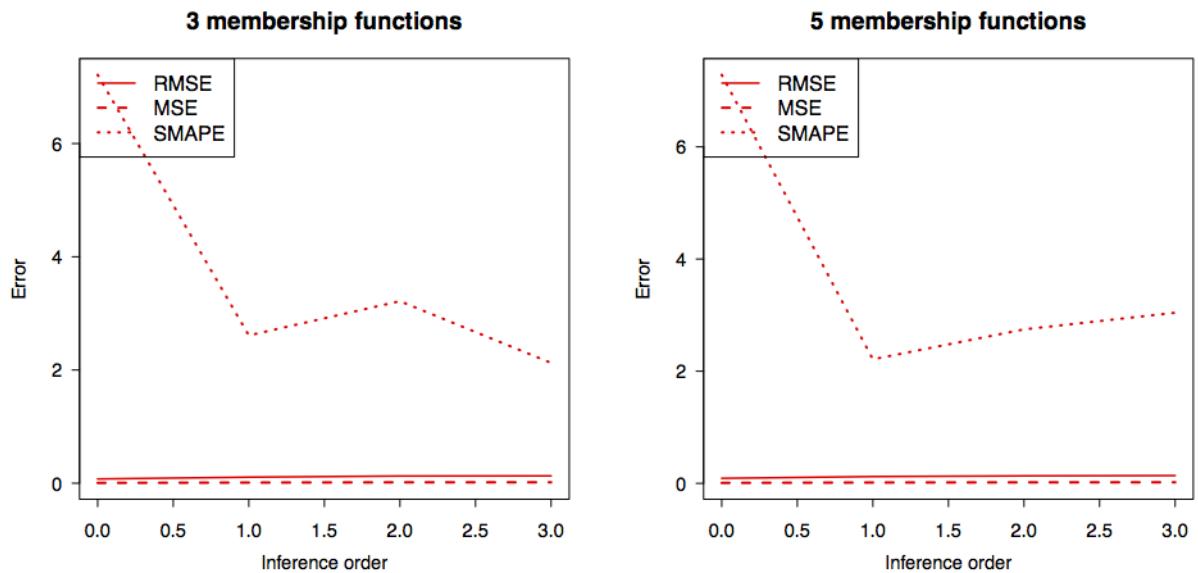


Рис. 1.2 – Похибка прогнозу розширеного нео-фаззі нейрону від порядку висновування (для трьох та п'яти функцій належності)

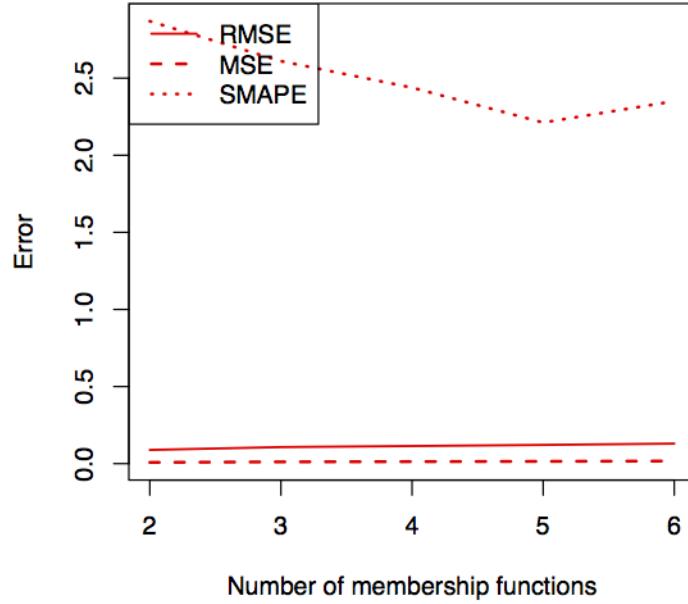


Рис. 1.3 – Похибка прогнозу розширенного нео-фаззі нейрону від кількості функцій належності (порядок висновування - 2)

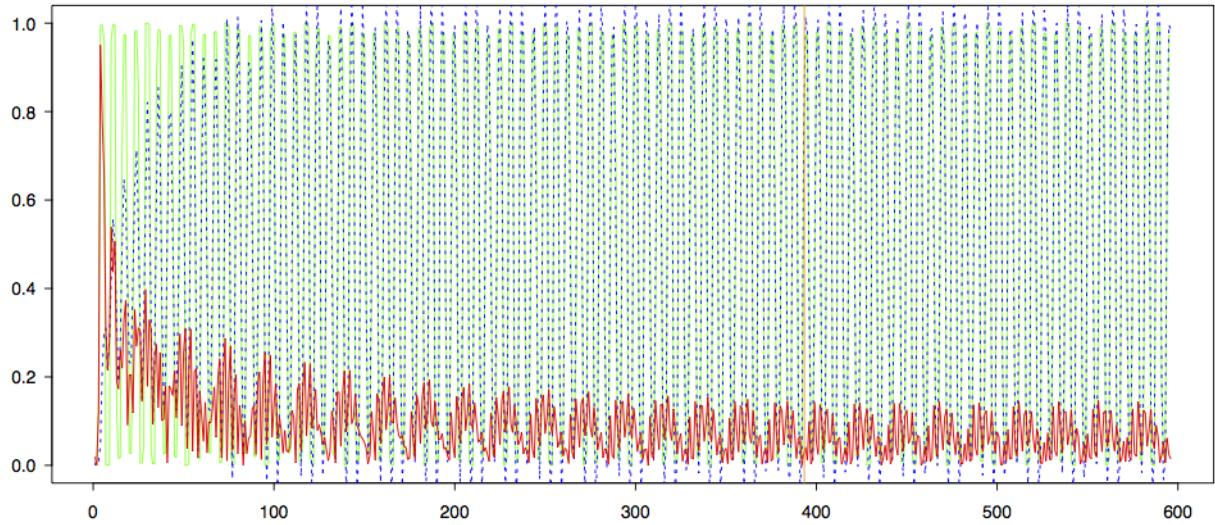


Рис. 1.4 – Прогноз розширенного нео-фаззі нейрону з 3 трикутними функціями належності, що реалізує нечітке висновування 3-ого порядку (зелена лінія – шуканий сигнал, синя пунктирна лінія – прогноз розширенного нео-фаззі нейрону, червона лінія – похибка; жовтобагряна вертикальна лінія позначає закінчення тренувальної частини датасету)

Таблиця 1.1 – Точність прогнозу розширенного нео-фаззі нейрону на штучно сгенерованому датасеті

Нечітке висновування 0 порядку			
Функції належності		RMSE	SMAPE
	3	0.07593154138757	7.2130842903092
	4	0.0816015155371995	3.74330006151476
	5	0.0899940897089563	7.28423693259539
	6	0.098548606433121	4.97414996889677
Нечітке висновування I порядку			
Функції належності		RMSE	SMAPE
	3	0.107342623622113	2.61031587883906
	4	0.114302161682684	2.43845462677015
	5	0.121556611017793	2.21187746150696
	6	0.129922583600673	2.3504927587044
Нечітке висновування II порядку			
Функції належності		RMSE	SMAPE
	3	0.127570672613453	3.21603084937958
	4	0.121809301731276	2.49191939755954
	5	0.134120568445479	2.74555892364861
	6	0.146724724859333	2.39716069975922
Нечітке висновування III порядку			
Функції належності		RMSE	SMAPE
	3	0.130173960343431	2.12509843555904
	4	0.154580667425542	2.17237774290269
	5	0.139334351692536	3.04236918521622
	6	0.150497843534837	2.43818195954604

Для подальшої апробації розширеного нео-фаззі нейрону розглянемо задачу прогнозування хаотичного ряду, що описується диференціальним рівнянням Мекі-Гласса [147 vik]:

$$y'(t) = \frac{0.2(t - \tau)}{1 + y^{10}(t - \tau)} - 0.1y(t), \quad (1.4)$$

при цьому значення часового ряду в кожній точці обчислене за допомогою методу Рунге-Кутта четвертого порядку. Часовий крок прийнятий рівним 0.1, початкові умови: $x(0) = 1.2$.

Традиційно завдання прогнозування полягає у визначенні $x(t+6)$ х часового ряду (5.2) з параметром затримки 17 по значеням $x(t+18)$, $x(t+12)$, $x(t+6)$ і $x(t)$. Перед початком обробки отриманий часовий ряд нормувався таким чином, щоб його значення лежали в інтервалі $[0, 1]$ (область визначення трикутних функцій належності та кубічних сплайнів, що використовуються у синапсах розширеного нео-фаззі нейрону).

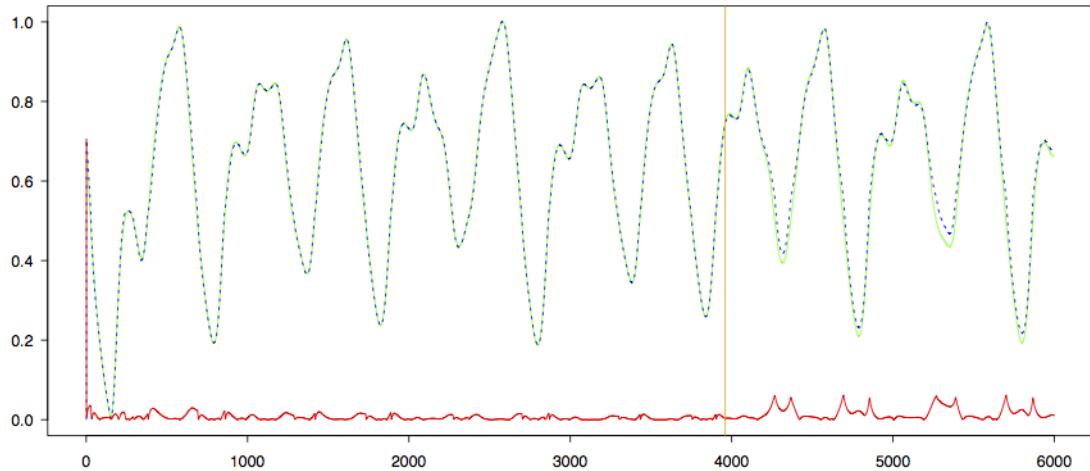


Рис. 1.5 – Прогнозування хаотичного часового ряду Мекі-Гласса розширенним нео-фаззі нейроном з 3 трикутними функціями належності, що реалізує нечітке висновування 3-ого порядку (зелена лінія – шуканий сигнал, синя пунктирна лінія – сигнал на виході нейрону, червона лінія – похибка; жовто-багряна вертикальна лінія позначає закінчення тренувальної частини датасету)

На рис.1.5 зображений результат прогнозування розширеного нео-фаззі нейрона з трьома функціями належності, що реалізує нечітке висновування 3-ого порядку. Для порівняння на рис. 1.6 наведено прогнозування традиційного нео-фаззі нейрона (що реалізує нечітке висновування нульового порядку) з аналогічними функціями належності (3 трикутні функції належності).

Таблиця 1.2 – Точність прогнозу ряду Мекі-Глассу розширеним нео-фаззі нейроном від порядку висновування та кількості функцій належності

Нечітке висновування 0 порядку			
	Функції належності	RMSE	SMAPE
	3	0.143482904587951	0.325353000527264
	4	0.106294989490131	0.264501060116694
	5	0.094578207548207	0.259630642224594
	6	0.094578207548207	0.259630642224594
Нечітке висновування I порядку			
	Функції належності	RMSE	SMAPE
	3	0.0491962584140483	0.136034984261077
	4	0.0300830061654526	0.0978878141219238
	5	0.0312245619190396	0.10776716206662
	6	0.0277981639612314	0.0989376310206592
Нечітке висновування II порядку			
	Функції належності	RMSE	SMAPE
	3	0.0227629037042365	0.0658002874902031
	4	0.0295377560571133	0.108260856276106
	5	0.0283735498990618	0.0946515030316458
	6	0.0251818186025806	0.0847398989365615
Нечітке висновування III порядку			
	Функції належності	RMSE	SMAPE
	3	0.0221516072948077	0.0622040928066835
	4	0.0261638552968437	0.0827913036508308
	5	0.0274818416982828	0.114797690969503
	6	0.0237394982902305	0.0846415828789446

На рис. 1.7 показана залежність похибки від порядку висновування розширенних нео-фаззі нейронів з трьома та п’ятьма дзвонуватими функціями належності.

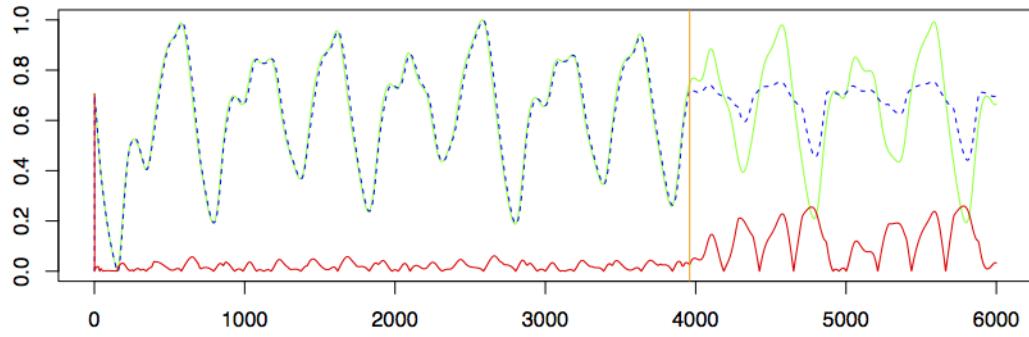


Рис. 1.6 – Прогнозування хаотичного часового ряду Мекі-Гласса традиційним нео-фаззі нейроном з 3 трикутними функціями належності (зелена лінія – шуканий сигнал, синя пунктирна лінія – сигнал на виході нейрону, червона лінія – похибка; жовтобагряна вертикальна лінія позначає закінчення тренувальної частини датасету)

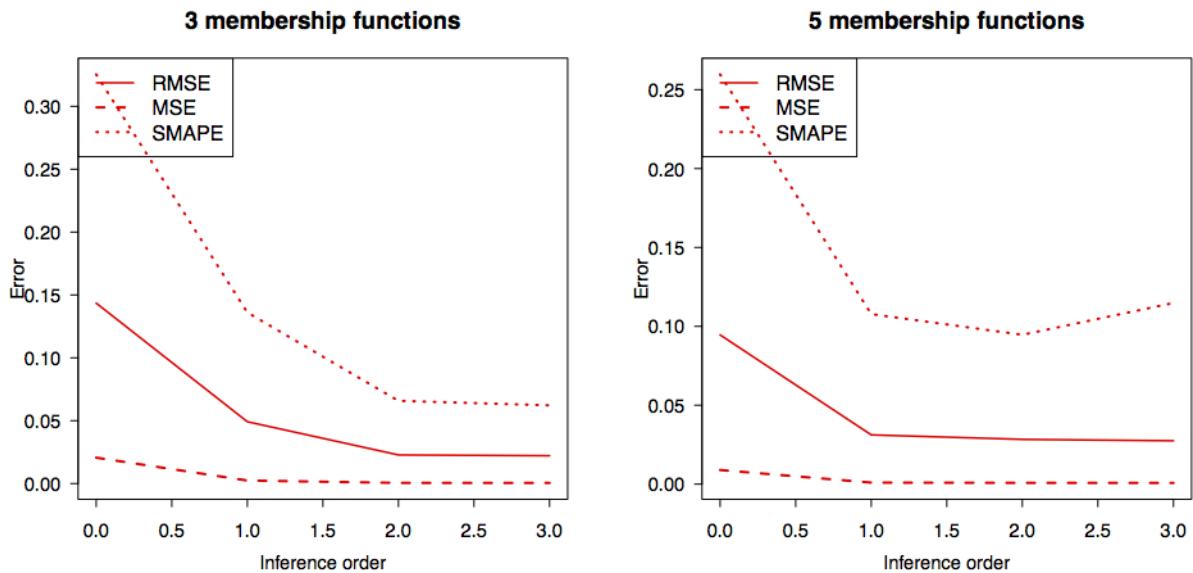


Рис. 1.7 – Похибка прогнозування хаотичного часового ряду Мекі-Гласса розширенними нео-фаззі нейронами з 3 та 5 дзвонуватими функціями належності від порядку нечіткого висновування

Як видно з таблиці 1.2 та рис. 1.7, розширенний нео-фаззі нейрон, що реалізує нечітке висновування вищого від 0 порядку, прогнозує хаотичний часовий ряд за рівнянням Мекі-Гласса з суттєво вищою точністю ніж тради-

ційний нео-фаззі нейрон.

Також пропонований розширений нео-фаззі нейрон було апробовано на реальному часовому ряді «Споживання електоренергії у м. Сімферополь за 2007 рік» (фазовий портрет наведено на рис. 1.8).

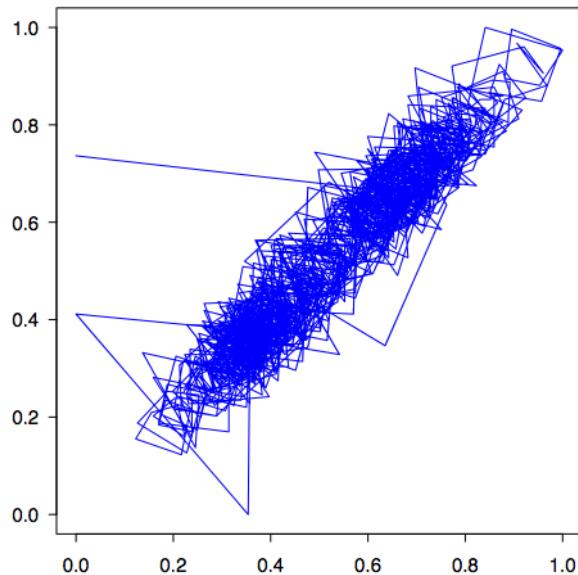


Рис. 1.8 – Фазовий портрет часовогого ряду «Споживання електоренергії у м. Сімферополь за 2007 рік»

Найліпший прогноз ($\text{RMSE} \approx 0.14$, $\text{SMAPE} \approx 0.21$) надав нейрон, що реалізує нечітке висновування 1-ого порядку з 6-ма функціями належності (рис. 1.9)

Експерименти, що описані у цьому підрозділі, підтвержують, що розширені нео-фаззі нейрони, які реалізують нечітке висновування довільного порядку, мають підвищену точність прогнозування хаотичних рядів (як штучно сгенерованих, так і реальних) порівняно з традиційними нео-фаззі нейронами (які реалізують нечітке висновування нульового порядку).

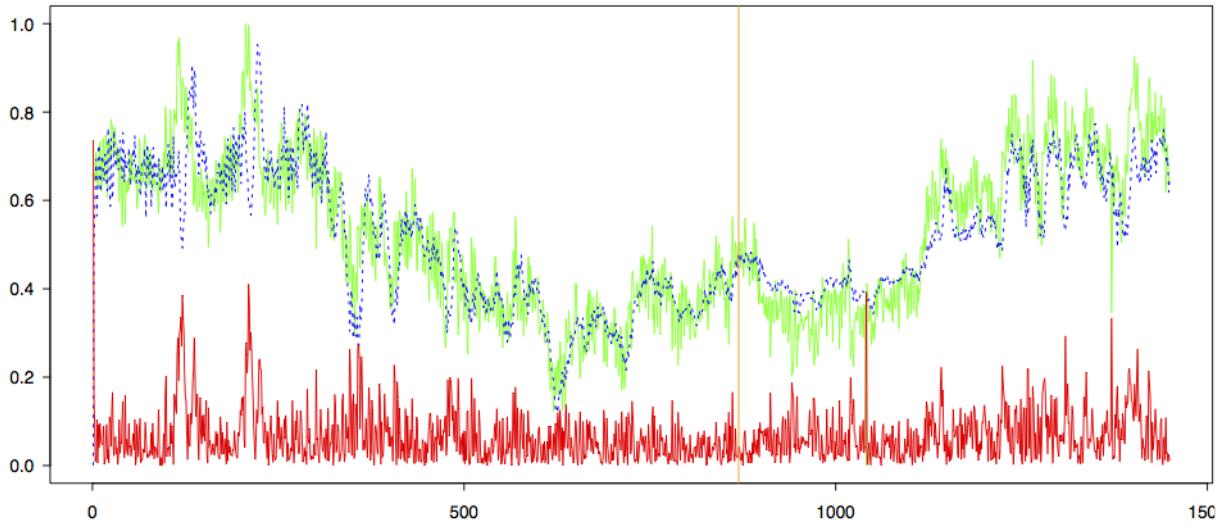


Рис. 1.9 – Прогнозування часового ряду «Споживання електроенергії у м. Сімферополь за 2007 рік» розширенним нео-фаззі нейроном з 6-ма дзвонувати функціями належності, що реалізує нечітке висновування 1-ого порядку (зелена лінія – шуканий сигнал, синя пунктирна лінія – сигнал на виході нейрону, червона лінія – похибка; жовтобагряна вертикальна лінія позначає закінчення тренувальної частини датасету)

1.2. Моделювання гібридної каскадної нейро-фаззі мережі з розширенними нео-фаззі нейронами та оптимізацією пулу нейронів

Низку експериментів для апробації гібридної каскадної нейро-фаззі мережі на розширенних нео-фаззі нейронах з оптимізацією пулу нейронів було проведено на датасетах, що їх надала дослідницька група «The Applications of Machine Learning (AML)» з Університету Аалто, що у Фінляндії (Aalto University School of Science, Espoo, Finland). Одним з таких датасетів є часовий ряд «Споживання електроенергії у Польщі за період з 1990-х років» (фазовий портрет наведено на рис 1.10).

Вихідний сигнал гібридної каскадної нейро-мережі наведено на рис. 1.11, а похибки розширенних нео-фаззі нейронів та нейронів-узагальнювачів для кожного каскаду системи наведено на таблиці 1.3.

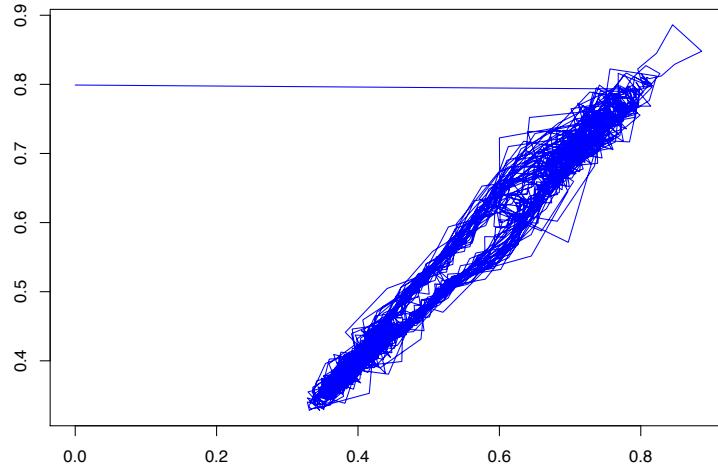


Рис. 1.10 – Фазовий портрет часового ряду Прогнозування часового ряду «Споживання електроенергії у Польщі за період з 1990-х років»

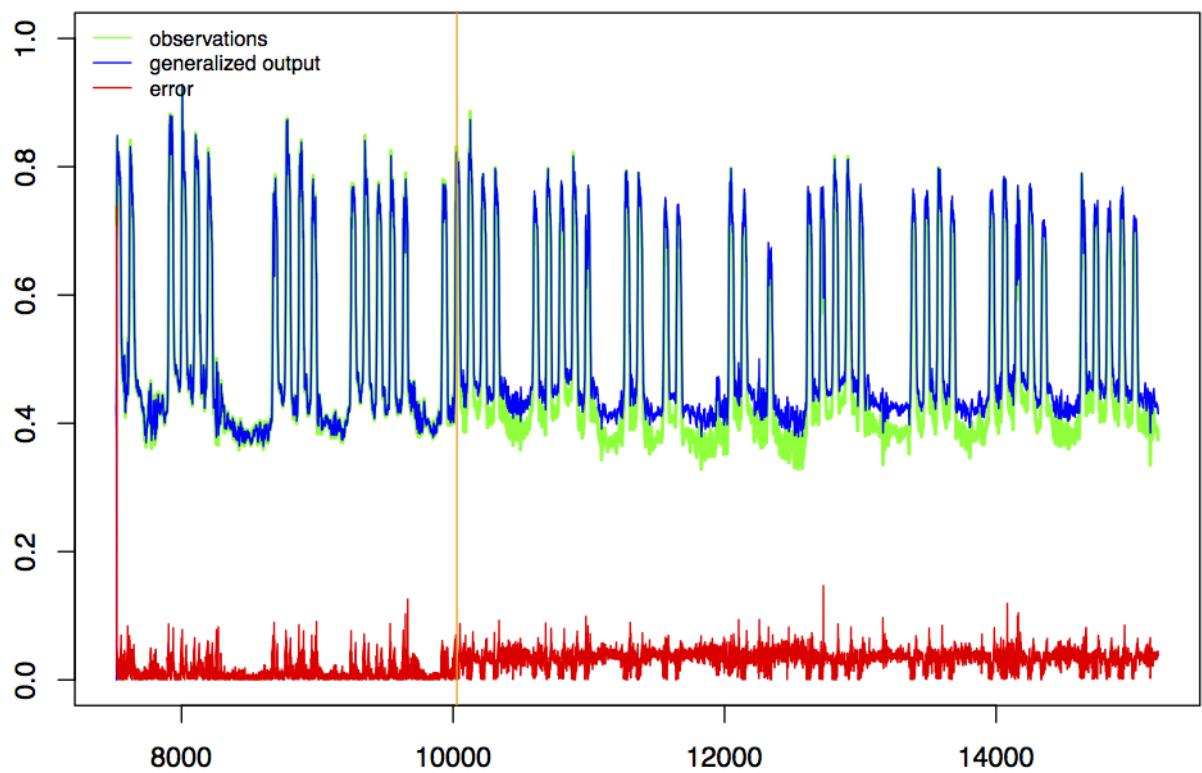


Рис. 1.11 – Прогнозування часового ряду «Споживання електоренергії у м. Сімферополь за 2007 рік» гібридної каскадної нейро-фаззі мережі з оптимізацією пулу нейронів (жовтобагряна вертикальна лінія позначає закінчення тренувальної частини датасету)

Таблиця 1.3 – Результати прогнозування часового ряду «Споживання електротенергії у м. Сімферополь за 2007 рік» нейронів (зокрема нейронів-узагальнювачів) каскадної нейро-фаззі системи

Каскад I	SMAPE	RMSE
Нейрон I (3 функції належності, нечітке висновування III порядку)	0.080830	0.39288
Нейрон II (5 функцій належності, нечітке висновування IV порядку)	0.075014	0.036680
Нейрон III (4 функції належності, нечітке висновування V порядку)	0.074955	0.038170
Нейрон-узагальнювач I каскаду	0.059835	0.030302
Каскад II	SMAPE	RMSE
Нейрон I (3 функції належності, нечітке висновування III порядку)	0.080835	0.039290
Нейрон II (5 функцій належності, нечітке висновування IV порядку)	0.059837	0.036683
Нейрон III (4 функції належності, нечітке висновування V порядку)	0.074966	0.038195
Нейрон-узагальнювач II каскаду	0.059821	0.036683
Каскад III	SMAPE	RMSE
Нейрон I (3 функції належності, нечітке висновування III порядку)	0.080934	0.039333
Нейрон II (5 функцій належності, нечітке висновування IV порядку)	0.059869	0.036711
Нейрон III (4 функції належності, нечітке висновування V порядку)	0.75009	0.038213
Нейрон-узагальнювач III каскаду	0.059869	0.030320
Каскад IV	SMAPE	RMSE
Нейрон I (3 функції належності, нечітке висновування III порядку)	0.080892	0.039316
Нейрон II (5 функцій належності, нечітке висновування IV порядку)	0.059869	0.030303
Нейрон III (4 функції належності, нечітке висновування V порядку)	0.075034	0.038213
Нейрон-узагальнювач IV каскаду	0.059849	0.030303
Нейрон-узагальнювач системи	0.059821	0.030302

Фазовий портрет другого датасету «Коливання рівню приловоотливної зони» (Subtidal coastal level of fluctuations) наведено на рис. 1.11, похибки вузлів системи – у таблиці 1.4.

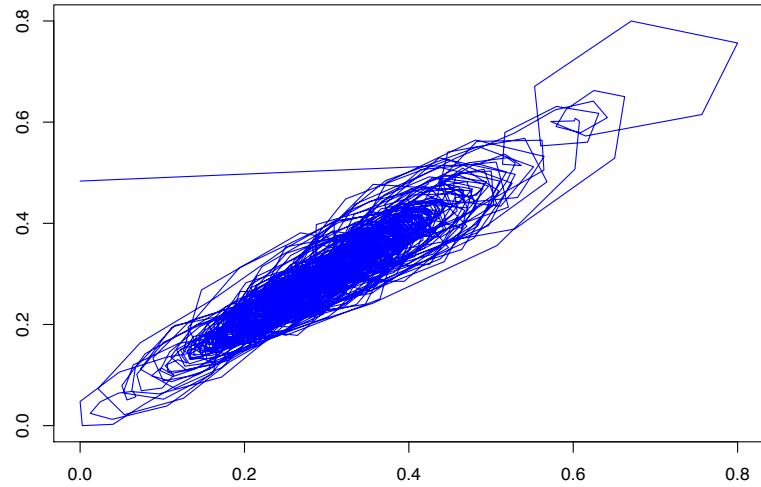
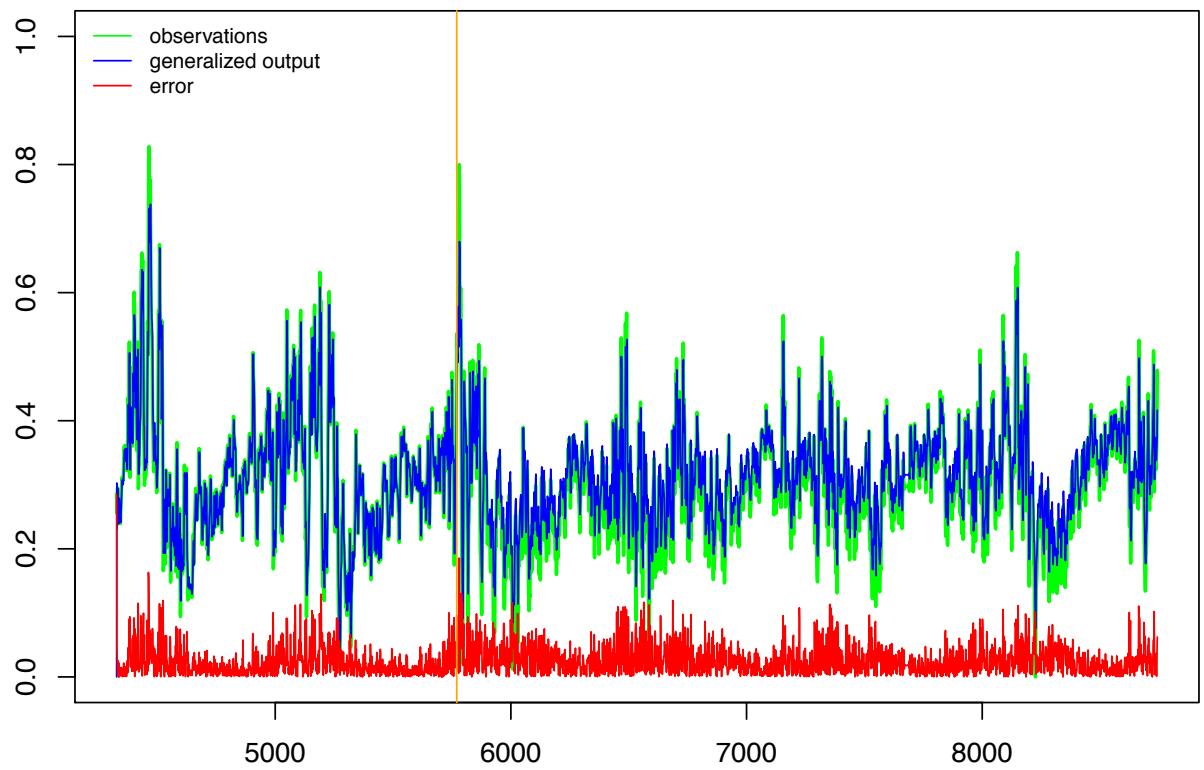


Рис. 1.12 – Фазовий портрет часового ряду «Коливання рівню приловоотливної зони»



Прогнозування часового ряду «Коливання рівню приловоотливної зони»
гібридної каскадної нейро-фаззі мережі з оптимізацією пулу нейронів
(жовтобагряна вертикальна лінія позначає закінчення тренувальної частини
датасету)

Таблиця 1.4 – Результати прогнозування часового ряду «Коливання рівню приловоотливної зони» нейронів (зокрема нейронів-узагальнювачів) каскадної нейро-фаззі системи

Каскад I	SMAPE	RMSE
Нейрон I (3 функції належності, нечітке висновування III порядку)	0.110067	0.036612
Нейрон II (5 функцій належності, нечітке висновування IV порядку)	0.105192	0.035474
Нейрон III (4 функції належності, нечітке висновування V порядку)	0.103129	0.034814
Нейрон-узагальнювач I каскаду	0.105598	0.035301
Каскад II	SMAPE	RMSE
Нейрон I (3 функції належності, нечітке висновування III порядку)	0.110023	0.036593
Нейрон II (5 функцій належності, нечітке висновування IV порядку)	0.105118	0.035457
Нейрон III (4 функції належності, нечітке висновування V порядку)	0.103148	0.035818
Нейрон-узагальнювач II каскаду	0.102377	0.034698
Каскад III	SMAPE	RMSE
Нейрон I (3 функції належності, нечітке висновування III порядку)	0.110013	0.036591
Нейрон II (5 функцій належності, нечітке висновування IV порядку)	0.105126	0.035458
Нейрон III (4 функції належності, нечітке висновування V порядку)	0.103155	0.034820
Нейрон-узагальнювач III каскаду	0.103155	0.034820
Каскад IV	SMAPE	RMSE
Нейрон I (3 функції належності, нечітке висновування III порядку)	0.110026	0.036594
Нейрон II (5 функцій належності, нечітке висновування IV порядку)	0.105153	0.035464
Нейрон III (4 функції належності, нечітке висновування V порядку)	0.103168	0.034822
Нейрон-узагальнювач IV каскаду	0.102545	0.034083
Нейрон-узагальнювач системи	0.102377	0.030302

Останній датасет для цієї низки експериментів було взято зі змагань у прогнозуванні часових рядів «European Symposium on Time Series Prediction 2008», фазовий портрет наведено на рис. 1.13, результат роботи пропонованої системи – на рис. 1.14.

Результати прогнозування нейронів окремих каскадів, нейронів-узагальнювачів, а також системи в цілому можна побачити у таблиці 1.5.

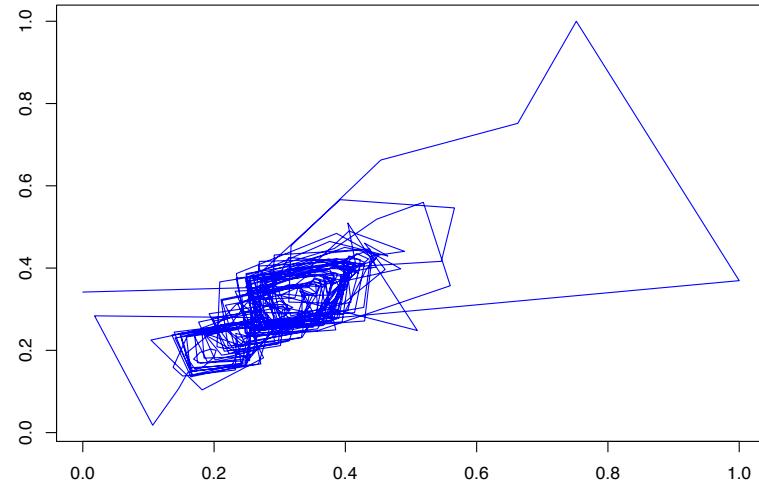


Рис. 1.13 – Фазовий портрет часового ряду «ESTP Competition Time Series»

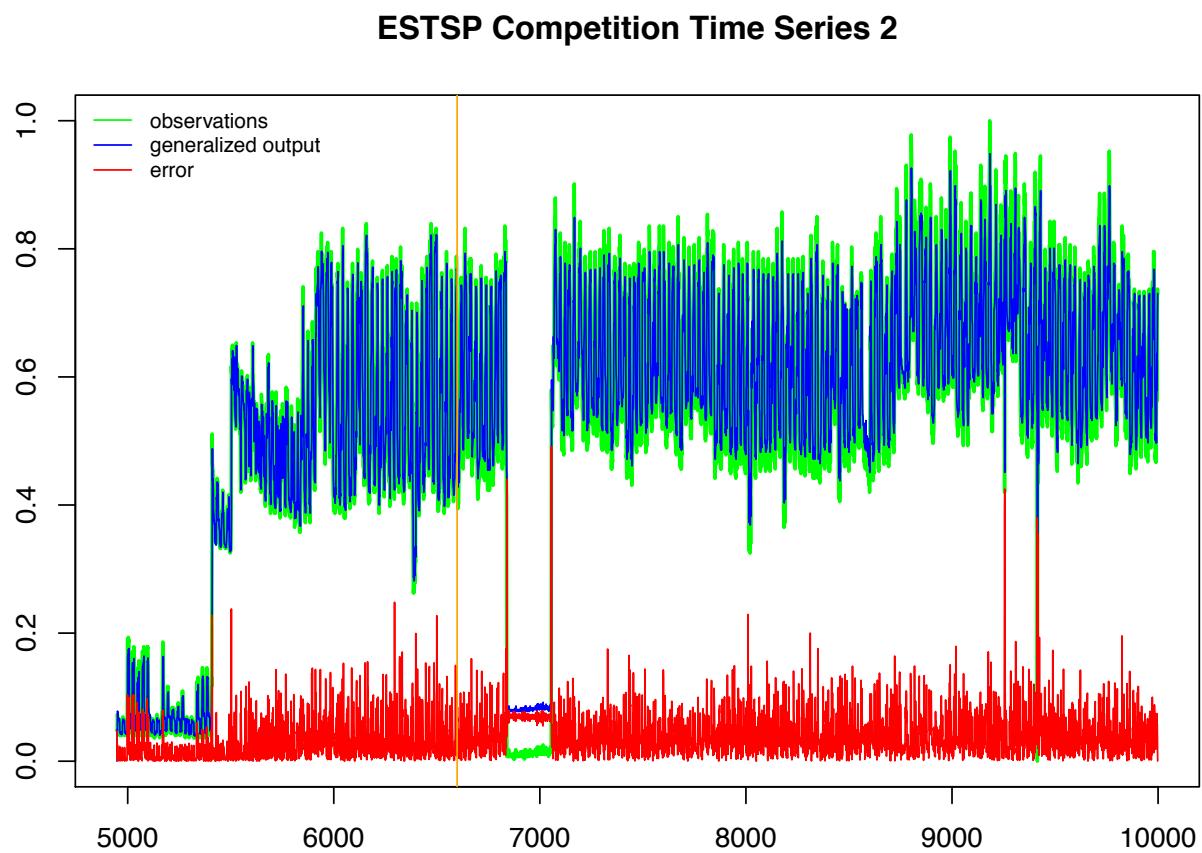


Рис. 1.14 – Прогнозування часового ряду «ESTP Competition Time Series» гібридної каскадної нейро-фаззі мережі з оптимізацією пулу нейронів (жовтобагряна вертикальна лінія позначає закінчення тренувальної частини датасету)

Таблиця 1.5 – Результати прогнозування часового ряду «ESTP Competition Time Series» окремих нейронів (зокрема нейронів-узагальнювачів) каскадної нейро-фаззі системи

Каскад I	SMAPE	RMSE
Нейрон I (3 функції належності, нечітке висновування III порядку)	0.175623	0.062985
Нейрон II (5 функцій належності, нечітке висновування IV порядку)	0.149139	0.056551
Нейрон III (4 функції належності, нечітке висновування V порядку)	0.146186	0.054414
Нейрон-узагальнювач I каскаду	0.159002	0.055274
Каскад II	SMAPE	RMSE
Нейрон I (3 функції належності, нечітке висновування III порядку)	0.175602	0.062942
Нейрон II (5 функцій належності, нечітке висновування IV порядку)	0.149092	0.056487
Нейрон III (4 функції належності, нечітке висновування V порядку)	0.146278	0.054415
Нейрон-узагальнювач II каскаду	0.158996	0.055264
Каскад III	SMAPE	RMSE
Нейрон I (3 функції належності, нечітке висновування III порядку)	0.175592	0.062933
Нейрон II (5 функцій належності, нечітке висновування IV порядку)	0.149090	0.056487
Нейрон III (4 функції належності, нечітке висновування V порядку)	0.146270	0.054415
Нейрон-узагальнювач III каскаду	0.158986	0.055262
Каскад IV	SMAPE	RMSE
Нейрон I (3 функції належності, нечітке висновування III порядку)	0.175605	0.062947
Нейрон II (5 функцій належності, нечітке висновування IV порядку)	0.149127	0.056487
Нейрон III (4 функції належності, нечітке висновування V порядку)	0.146323	0.054419
Нейрон-узагальнювач IV каскаду	0.159015	0.055268
Нейрон-узагальнювач системи	0.102377	0.030302

1.3. Моделювання багатовимірної гібридної каскадної нейро-фаззі мережі, що еволюціонує, з оптимізацією пулу нейронів

В якості тестового датасету для моделювання багатовимірної гібридної каскадної нейро-фаззі мережі з оптимізацією пулу нейронів (що ґрунтується на багатовимірних нео-фаззі нейронах, як описано у [linkchapter](#)) застосовувався багатовимірний ряд, сгенерований за допомогою диференціальних рівнянь

моделі Лоренца:

$$\begin{cases} \dot{x} = \sigma(y - x), \\ \dot{y} = -xz + rx - y, \\ \dot{z} = xy - bz. \end{cases} \quad (1.5)$$

У моделі Лоренца присутні три невідомих функції, а також кілька невідомих параметрів [21].

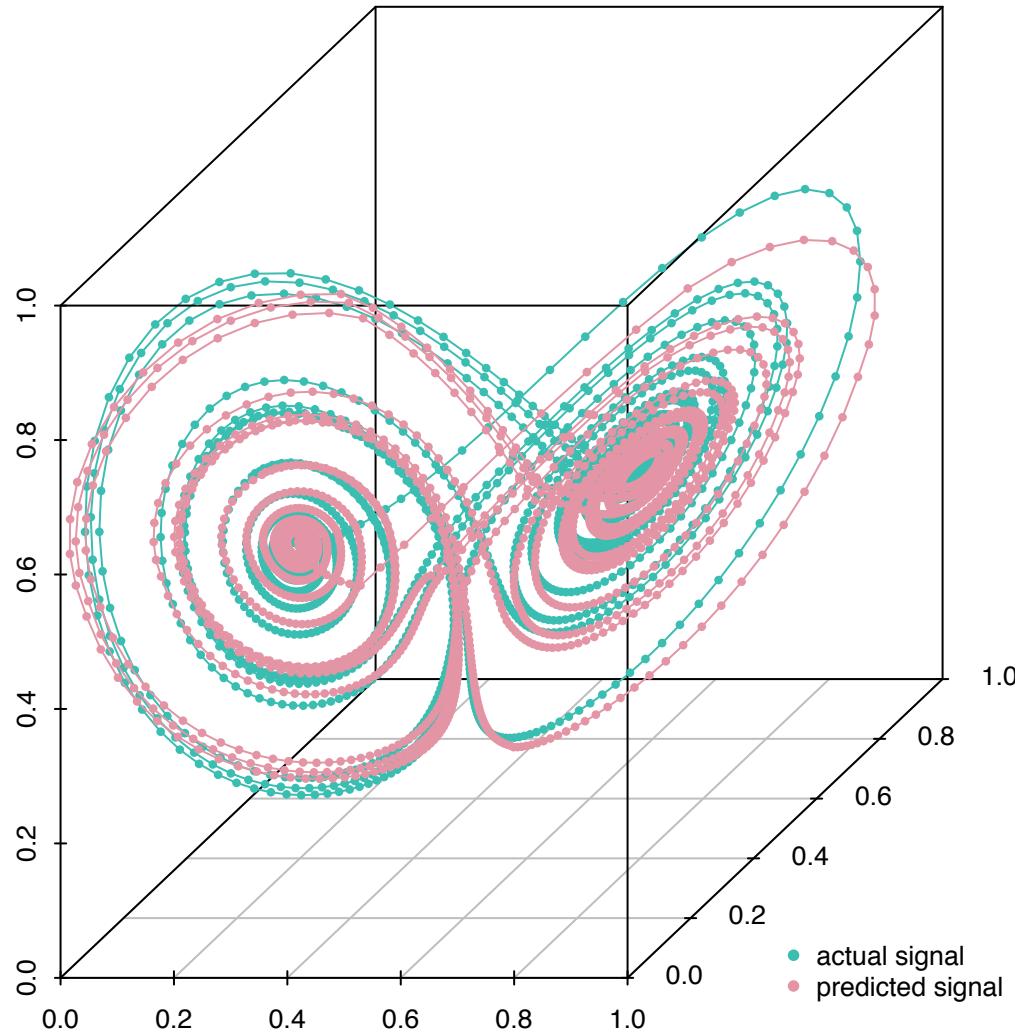


Рис. 1.15 – Прогнозування багатовимірного часового ряду гібридною каскадною нейро-фаззі мережею з оптимізацією пулу нейронів

При плавній зміні параметра динамічна система змінює тип свого атрактора

ктора. Рішення системи рівнянь Лоренца 1.5 при значенні параметра r , що перевищує біфуркаційних, виглядає майже ідентично випадковому процесу. У певному сенсі, атрактор Лоренца є стохастичними автоколиваннями, зо підтримуються у динамічній системі за рахунок зовнішнього джерела.

Таблиця 1.6 – Результати прогнозування багатовимірного часового ряду нейронами (зокрема нейронами-узагальнювачами) MIMO гібридної каскадної нейро-фаззі мережі з оптимізацією пулу нейронів

	SMAPE	RMSE
Каскад I		
Нейрон I (3 функції належності, нечітке висновування III порядку)	0.132351	0.64333
Нейрон II (5 функцій належності, нечітке висновування IV порядку)	0.106885	0.055176
Нейрон III (4 функції належності, нечітке висновування V порядку)	0.118058	0.059517
Нейрон-узагальнювач IV каскаду	0.106823	0.055111
Каскад II	SMAPE	RMSE
Нейрон I (3 функції належності, нечітке висновування III порядку)	0.132370	0.064339
Нейрон II (5 функцій належності, нечітке висновування IV порядку)	0.106840	0.55165
Нейрон III (4 функції належності, нечітке висновування V порядку)	0.118059	0.059517
Нейрон-узагальнювач IV каскаду	0.106840	0.55165
Каскад III	SMAPE	RMSE
Нейрон I (3 функції належності, нечітке висновування III порядку)	0.132325	0.064324
Нейрон II (5 функцій належності, нечітке висновування IV порядку)	0.106858	0.055171
Нейрон III (4 функції належності, нечітке висновування V порядку)	0.118059	0.059513
Нейрон-узагальнювач IV каскаду	0.106858	0.055171
Каскад IV	SMAPE	RMSE
Нейрон I (3 функції належності, нечітке висновування III порядку)	0.132258	0.0642449
Нейрон II (5 функцій належності, нечітке висновування IV порядку)	0.106805	0.055144
Нейрон III (4 функції належності, нечітке висновування V порядку)	0.118015	0.059424
Нейрон-узагальнювач IV каскаду	0.106805	0.055144
Нейрон-узагальнювач системи	0.106789	0.55105

У фазовому просторі дивний атрактор має топологію деякого клубка траєкторій, в межах якого можна виділити дві області. У кожен момент часу рішення знаходиться в одній з цих областей, причому зміна станів системи в одну або іншу область є абсолютно непередбачуваною.

Атрактор Лоренца демонструє ще одну особливість, притаманну дивним атракторам – чутливість до початкових умов. Атрактори, тобто нерухомі точки і граничні цикли, характеризуються тим, що для різних початкових умов сімейства рішень сходилися до одного асимптотичному рішення, тобто різні категорії вийшли з різних точок, які відповідають різним початковим умовам, сходилися при $t \rightarrow \infty$ в одну точку або близькі криві. Тому поведінку звичайних систем, що мають атрактори поблизу нерухомих точок і граничних циклів, на великих часових інтервалах можно доволі добре передбачити. З дивними атракторами все зовсім інакше. Які б близькі початкові умови не вибиралися, при $t \rightarrow \infty$ рішення будуть розходитися, віддаляючись одне від одного в фазовому просторі. Оскільки в реальних задачах початкові умови відомі з деякою погрішністю, абсолютно неможливо вказати поведінку такого атрактора при досить великому t , тому поведінка систем, що описуються дивними атракторами, є абсолютно непередбачуваною.

Для генерування тестового датасету використовувались такі параметри:

$$r = 28,$$

$$dt = 0.001;$$

По завершенні експерименту маємо систему з чотирьох (рідше – трьох) каскадів з трьома багатовимірними нейронами MNFN та одним нейроном-узагальнювачем у кожному каскаді. Результати роботи системи зображені на рис. 1.15 та більш детально описані у таблиці 1.6.

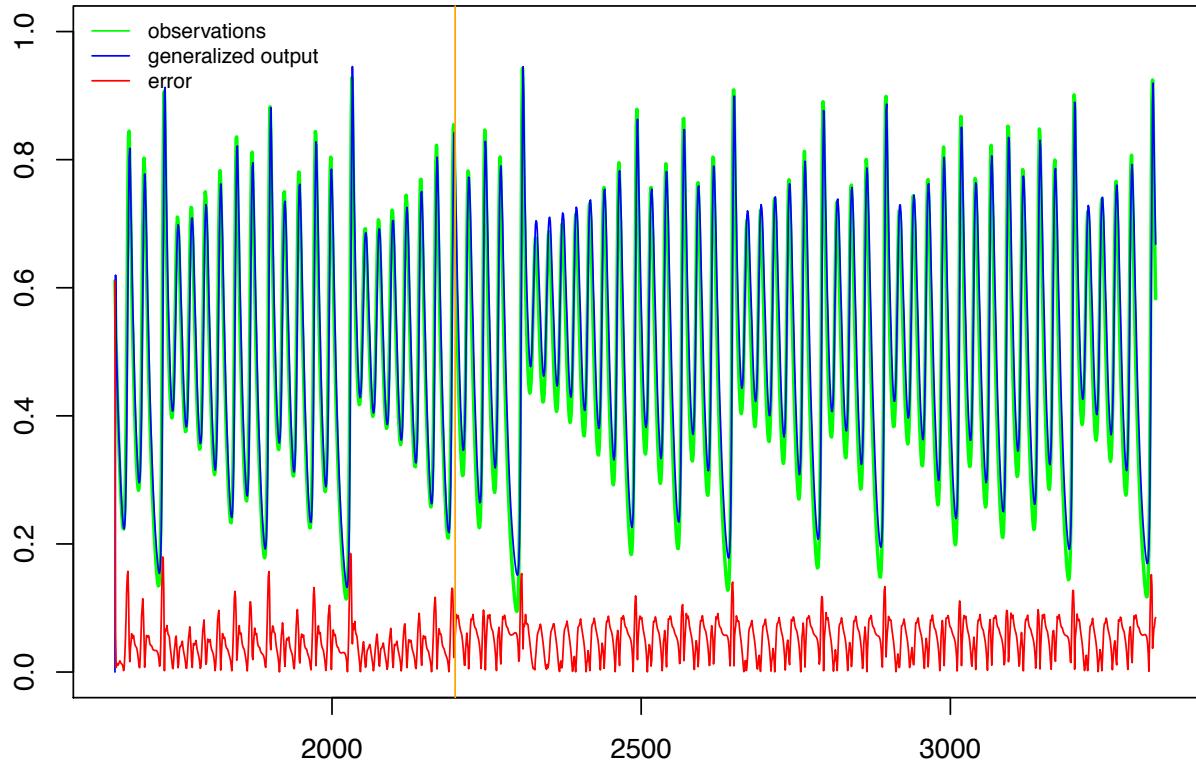


Рис. 1.16 – Прогнозування багатовимірного часового ряду гібридною каскадною нейро-фаззі мережею з оптимізацією пулу нейронів

1.4. Моделювання самонавчанної нейро-фаззі системи, що еволюціонує

Одна з основних переваг, притаманних пропонованій самонавчанній нейро-фаззі системі, що еволюціонує, полягає в автоматичному визначенні оптимальної кількості кластерів та значення фаззіфікатору на кожному етапі обробляння даних. Першу серію експериментів було проведено на штучно зсинтезованих наборах даних з різним ступенем розмитості та перекриття класів, аби дослідити вплив значення параметру фаззіфікації на якість кластерування в режимі реального часу відповідно до обраного критерію дійсності.

Кожен з наборів даних, що їх наведено на рис. 1.17, містить вісімдесят спостережень з двома ознаками (для очності) у кожному спостереженні. Тестові дані були сгенеровані таким чином, аби у першому наборі класи були

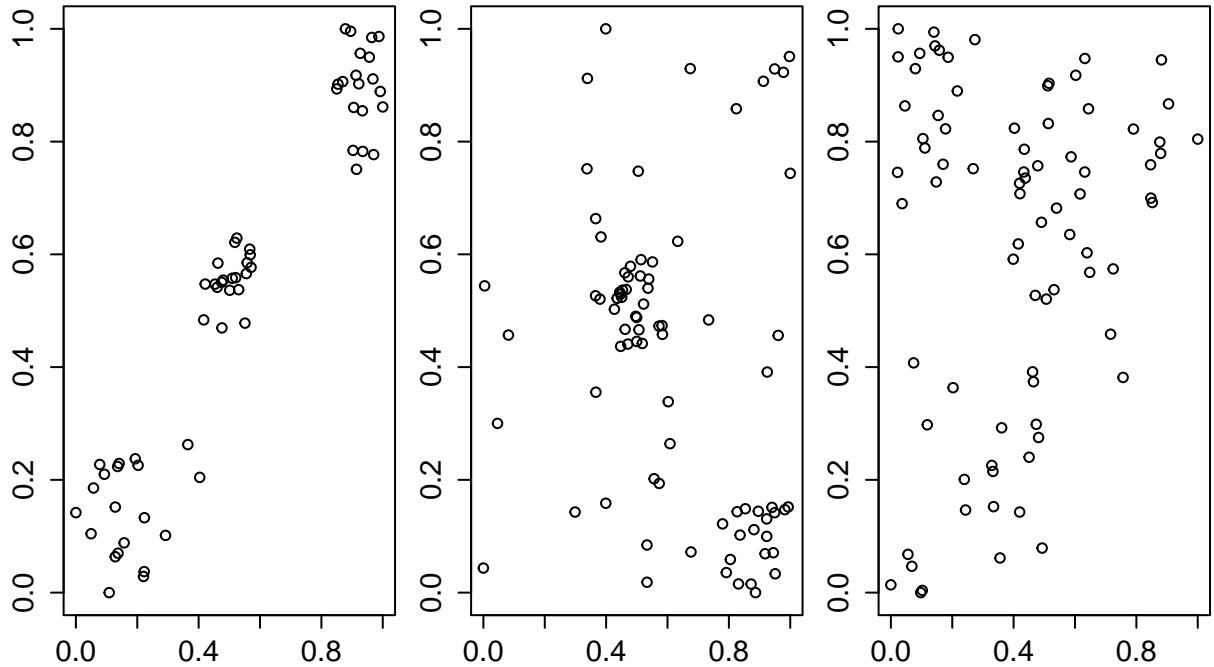


Рис. 1.17 – Штучно сгенеровані набори даних

чітко розподілені (crisp dataset), у другому наборі кластерні границі були де-шо розмиті (fuzzy dataset), у третьому випадку класи сильно перетиналися (extra fuzzy dataset). Логічно припустити, що система, яка тестиється, обере менше значення параметру фаззіфікації для першого датасету та більше для останнього, де границі класів спостережень є більш розмитими.

Спостереження надходили до нейро-фаззі мережі у послідовному режимі, вагові коефіцієнти нейронів були проініціалізовані, використовуючи пакетну модифікацію обраного алгоритму кластерування на датасеті з довільних двадцятьох спостережень відповідного набору даних (адже система, як і класичний fuzzy c-means, досить чутлива до параметрів ініціалізації). Локально оптимальні кількість кластерів та значення параметру фаззіфікації обумовлювалися максимальним середнім значенням рекурентних коефіцієнту розбиття РС (??) та Ксі-Бені індексу (??): $\max \frac{PC_j^{[m]} + 1 - XB_j^{[m]}}{2}$ (у данному випадку використовувалося від'ємне значення Ксі-Бені індексу $1 - XB(k)$, оскільки чим меншим є $XB_j^{[m]}$, то ліпшим є розбиття даних на кластери).

Для первого набора данных (crisp dataset), как и предполагалось, оптималь-

Таблиця 1.7 – Індекси валідності кластерування I датасету

Каскад 1 ($m = 2$)	$\beta = 2$	$\beta = 3$	$\beta = 4$	$\beta = 5$
Коефіцієнт розбиття	0.91758	0.7446	0.64787	0.59236
Індекс Ксі-Бені	0.052129	0.061034	0.092235	0.1294
Каскад 2 ($m = 3$)	$\beta = 2$	$\beta = 3$	$\beta = 4$	$\beta = 5$
Коефіцієнт розбиття	0.92643	0.6609	0.50214	0.43305
Індекс Ксі-Бені	0.027232	0.06872	0.17281	0.26914
Каскад 3 ($m = 4$)	$\beta = 2$	$\beta = 3$	$\beta = 4$	$\beta = 5$
Коефіцієнт розбиття	0.87218	0.5256	0.37605	0.31993
Індекс Ксі-Бені	0.15687	0.4153	0.84699	1.1765
Каскад 4 ($m = 5$)	$\beta = 2$	$\beta = 3$	$\beta = 4$	$\beta = 5$
Коефіцієнт розбиття	0.73909	0.45445	0.32428	0.27063
Індекс Ксі-Бені	0.12985	0.30637	0.68584	1.0551

ним виявився другий каскад ($m = 3$) з трьома кластерами і нейроном-переможцем із найменшим значенням параметру фаззіфікації $\beta = 2$ (рис. 1.19). Така конфігурація є оптимальною відповідно до обох використовуваних індексів валідності – найменше значення Ксі-Бені індексу $XB_j^{[m]}$ та найбільший коефіцієнт розбиття $PC_j^{[m]}$:

$$PC_1^{[2]} = 0.9009951,$$

$$XB_1^{[2]} = 0.03349166.$$

Лише одне спостереження у цьому датасеті (його позначено багряним квадратом) не належить жодному кластерові зі ступенем більшим від 0.6. Індекси валідності нейронів системи наведені у таблиці 1.7.

Для набору даних з середньою вираженістю класів найліпшим виявився нейрон другого каскаду ($m = 3$) і фаззіфікатором $\beta = 3$ (таблиця 5.2).

Як показано на рис. 1.18, декілька спостережень у центрі (позначені багряними квадратами) можна віднести до 2 кластерів з відносно високим ступенем належності, проте більшість спостережень можна чітко розкластеризувати, що ілюструється високим значенням коефіцієнту розбиття, та дуже

низьким Ксі-Бені індексом:

$$PC_2^{[2]} = 0.9727868,$$

$$XB_2^{[2]} = 0.087474.$$

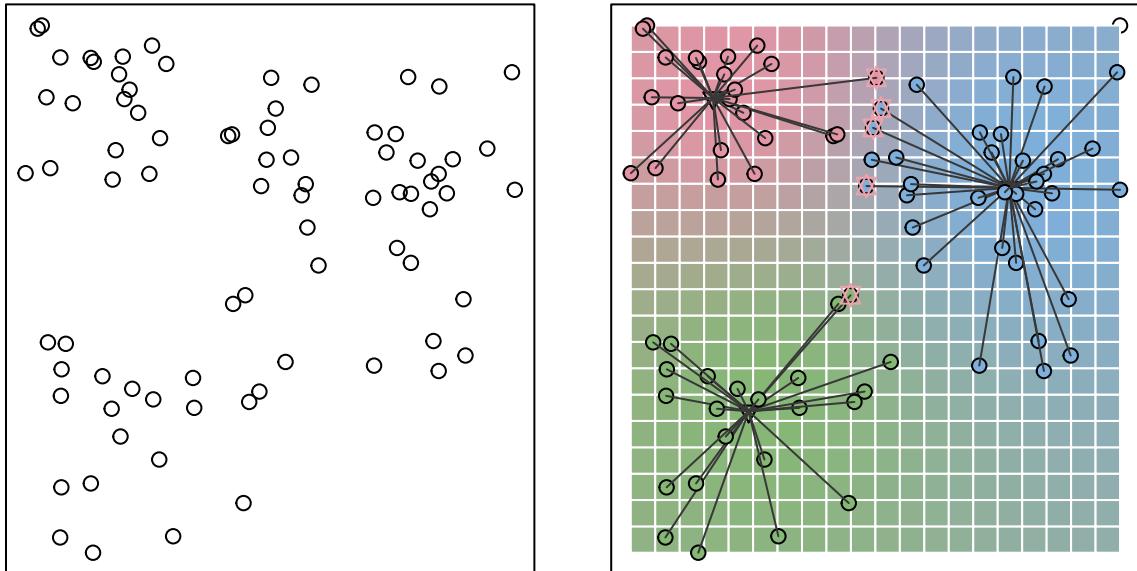


Рис. 1.18 – Набір даних з нечіткими межами класів (fuzzy dataset)

Для набору з найменш чіткими межами класів (таблиця 5.3), система обрала нейроном-переможцем вузол третього каскаду ($m = 4$) з високим параметром фаззіфікації $\beta = 4$:

$$PC_3^{[3]} = 0.335525,$$

$$XB_3^{[3]} = 0.2128333.$$

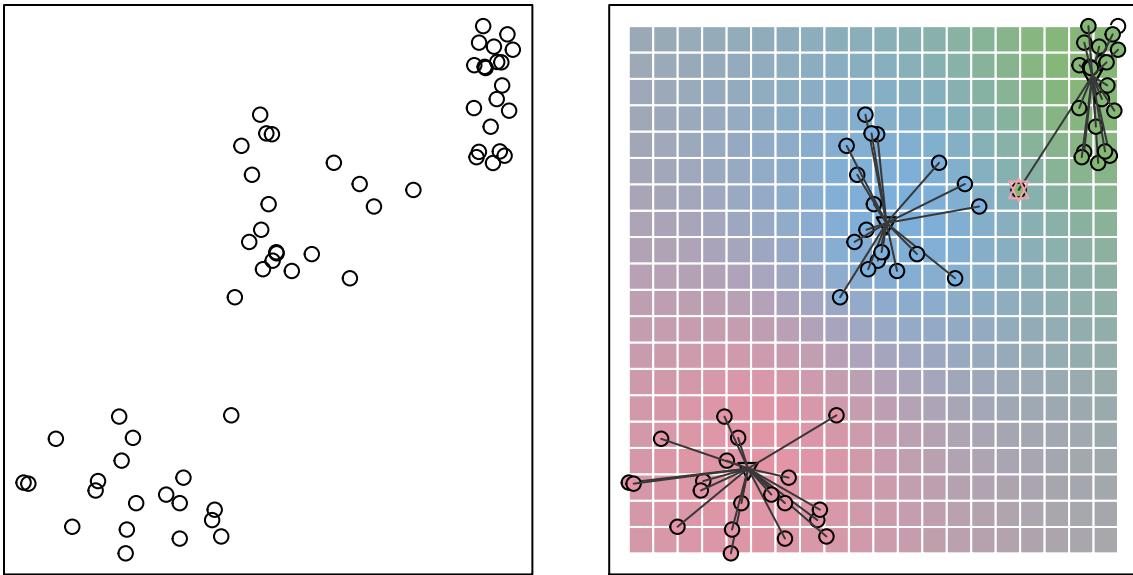


Рис. 1.19 – Набір даних з чітко вираженими класами (Crisp dataset)

Таблиця 1.8 – Індекси валідності (датасет 2)

Каскад 1 ($m = 2$)	$\beta = 2$	$\beta = 3$	$\beta = 4$	$\beta = 5$
Коефіцієнт розбиття	0.78414	0.58928	0.53853	0.52239
Індекс Kci-Бені	0.16668	0.30834	0.3745	0.38723
Каскад 2 ($m = 3$)	$\beta = 2$	$\beta = 3$	$\beta = 4$	$\beta = 5$
Коефіцієнт розбиття	50084	0.71164	0.97275	0.4191
Індекс Kci-Бені	0.009751	0.031235	0.087474	0.1323
Каскад 3 ($m = 4$)	$\beta = 2$	$\beta = 3$	$\beta = 4$	$\beta = 5$
Коефіцієнт розбиття	0.91888	0.47532	0.32777	0.28912
Індекс Kci-Бені	0.052563	0.1757	0.27516	0.33766
Каскад 4 ($m = 5$)	$\beta = 2$	$\beta = 3$	$\beta = 4$	$\beta = 5$
Коефіцієнт розбиття	0.85618	0.34327	0.24778	0.22445
Індекс Kci-Бені	0.048316	0.19887	0.34307	0.41228
Каскад 5 ($m = 6$)	$\beta = 2$	$\beta = 3$	$\beta = 4$	$\beta = 5$
Коефіцієнт розбиття	0.81295	0.30709	0.21636	0.19214
Індекс Kci-Бені	0.060896	0.19702	0.31393	0.38668

На рис. 1.20 спостереження, для яких ступінь належності до будь-якого кластеру не перевищує 0.6, позначені багряними квадратами. Як і очікувалося, для цього набору даних кількість таких спостережень значно вища від

попередніх датасетів з більш компактними та «чіткими» класами.

Каскад 1 ($m = 2$)	$\beta = 2$	$\beta = 3$	$\beta = 4$	$\beta = 5$
Коефіцієнт розбиття	0.85094	0.71415	0.61734	0.57085
Індекс Ксі-Бені	0.10584	0.11462	0.13797	0.16101
Каскад 2 ($m = 3$)	$\beta = 2$	$\beta = 3$	$\beta = 4$	$\beta = 5$
Коефіцієнт розбиття	0.61668	0.42848	0.37779	0.35884
Індекс Ксі-Бені	0.1754	0.20364	0.22364	0.23995
Каскад 3 ($m = 4$)	$\beta = 2$	$\beta = 3$	$\beta = 4$	$\beta = 5$
Коефіцієнт розбиття	0.33458	0.44082	0.79405	0.29615
Індекс Ксі-Бені	0.20989	0.129	0.051039	0.26282
Каскад 4 ($m = 5$)	$\beta = 2$	$\beta = 3$	$\beta = 4$	$\beta = 5$
Коефіцієнт розбиття	0.50244	0.33067	0.26029	0.23318
Індекс Ксі-Бені	0.37268	0.61417	0.79695	0.93626
Каскад 5 ($m = 6$)	$\beta = 2$	$\beta = 3$	$\beta = 4$	$\beta = 5$
Коефіцієнт розбиття	0.53279	0.29731	0.22648	0.19858
Індекс Ксі-Бені	0.27407	0.47298	0.60569	0.70716

Таблиця 1.9 – Індекси валідності (датасет 3)

Для очності у всіх наведених рисунках кольором позначені не тільки розкластеровані спостереження і центри кластерів, а й задній план (фон) малюнків, що дозволяє візуально визначити, до якого кластеру система віднесла б нові спостереження. Не дивно, що, тоді як для перших двох датасетів важко визначити домінуючий колір, оскільки кластери їх спостережень більш менш компактні та явно виражені, для останнього набору даних домінуючий колір – сірий, сформований кольорами усіх кластерів, що ілюструє великий ступінь перекриття класів і, відповідно, високе значення оптимального параметру фаззіфікації β , що обрала система.

Ця низка експериментів проілюструвала як важливо вірно визначати параметр фаззіфікації, оптимальне значення якого у випадку обробляння даних у послідовному режимі з високою вірогідністю змінюється у часі, а саме здатність визначати оптимальне значення цього параметру в онлайн режимі є відмінною особливістю запропонованої самонавчаної нейро-системи.

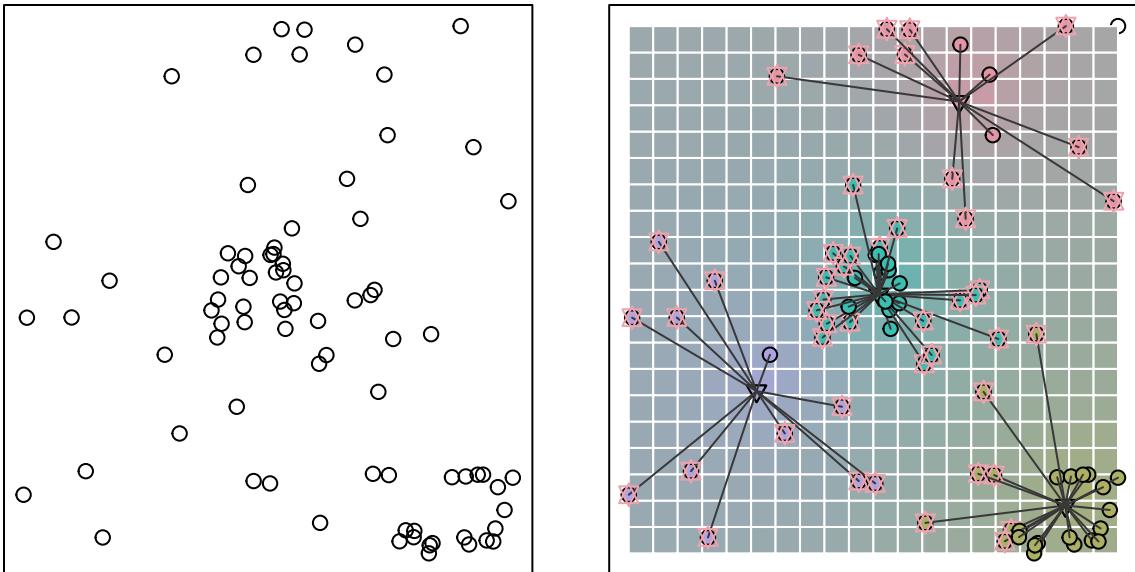


Рис. 1.20 – Набір даних з класами, що перетинаються (extra fuzzy dataset)

Наступна низка експериментів була проведена на наборі даних «Іриси Фішера» (Fisher's Iris data set).

Це багатовимірний датасет для задачі класифікації, на прикладі якого англійський статистик та біолог Рональд Фішер в 1936 році продемонстрував роботу розробленого ним методу дискримінантного аналізу. Іноді його також називають «Ірисами Андерсона» (через те, що дані були зібрані американським ботаніком Едгаром Андерсоном). Цей набір даних став класичним і часто використовується в літературі для ілюстрації роботи різних статистичних алгоритмів.

Проте цей датасет рідко використовується у кластерному аналізі, адже межі класів «*Virginica*» та «*Versicolor*» не можна чітко визначити, ґрунтуючись на даних, що їх використовував Фішер (що легко продемонструвати за допомогою ієрархічного кластерування, рис. 1.21). Саме цим і цікавий для нас цей набір даних: коли класичні методи чіткого кластерного аналізу не справляються з задачею, може стати у нагоді система, що реалізує нечітке кластерування зі змінним параметром фаззіфікації та кількістю кластерів. Для більшості методів кластерного аналізу, зокрема для методу нечітких середніх (fuzzy c-means), необхідно заздалегідь задати кількість кластерів, і

очевидним рішенням є прийняти $m = 3$, адже маємо три класи: Iris Virginica, Iris Versicolor та Iris Setosa (рис. 1.22).

	$\beta = 2$	$\beta = 3$	$\beta = 4$	$\beta = 5$
avg	0.8313073	0.8741245	0.8709475	0.8888124
min	0.7859722	0.7533766	0.6615745	0.7656498
max	0.8534013	0.9166667	0.935051	0.9604701

Таблиця 1.10 – Точність кластерування при $m = 3$

Точність кластерування за допомогою методу нечітких середніх за таких умов ($m = 3$, $\beta = 2$) рідко перевищує 83% (таблиця 5.4). (Оскільки для обраного датасету існують мітки з вірною класифікацією, ефективність кластеризації вимірювалася у відсотках точності щодо еталонного розбиття після дефаззіфікації.) Проте, якщо не обмежувати пропоновану систему у кількості кластерів (система ініціалізується інтервалом допустимих значень m (кількість кластерів) та параметру фаззіфікації β), вельми цікавими є результати кластерування нейронів кожного з каскадів.

У таблиця 5.5 наведена точність розбиття даних, коли $m \gg 3$ кластерів відповідно. Варто зазначити, що нейрони у пулі кожного каскаду реалізують метод нечітких середніх зі змінним значення фаззіфікатуру, а отже є чутливими до довільно ініціалізованих центрів кластерів, тому у таблицях наведені середня, мінімальна та максимальна точності кластерування (після дефаззіфікації).

Таблиця 1.11 – Точність кластерування для $m \in [7, 13]$, $\beta \in [2, 5]$

$m = 7$	$\beta = 2$	$\beta = 3$	$\beta = 4$	$\beta = 5$
avg	0.8972948	0.9150268	0.9242503	0.9178207
min	0.8536056	0.8461905	0.8723182	0.8600289
max	0.9621849	0.9736172	0.9810146	0.9663462
$m = 8$	$\beta = 2$	$\beta = 3$	$\beta = 4$	$\beta = 5$
avg	0.9065560	0.9296311	0.9243606	0.9248976
min	0.8217056	0.8562179	0.8577202	0.8590278
max	0.9474588	0.9789402	0.9848214	0.9747899
$m = 9$	$\beta = 2$	$\beta = 3$	$\beta = 4$	$\beta = 5$
avg	0.9258154	0.9282887	0.9308971	0.9229753
min	0.8689921	0.8270525	0.8684641	0.8556390
max	0.9849170	0.9806397	0.9664112	0.9748284
$m = 10$	$\beta = 2$	$\beta = 3$	$\beta = 4$	$\beta = 5$
avg	0.9213191	0.9285106	0.9332528	0.9282907
min	0.8663370	0.8722271	0.8652272	0.8766667
max	0.9663420	0.9838095	0.9723656	0.9756335
$m = 11$	$\beta = 2$	$\beta = 3$	$\beta = 4$	$\beta = 5$
avg	0.9295315	0.9408977	0.9317242	0.9295800
min	0.8520268	0.8964924	0.8890781	0.8788656
max	0.9716166	0.9848485	0.9704892	0.9798627
$m = 12$	$\beta = 2$	$\beta = 3$	$\beta = 4$	$\beta = 5$
avg	0.9349407	0.9433244	0.9337934	0.9306632
min	0.8815133	0.8949802	0.8798160	0.8486111
max	0.9795274	0.9783497	0.9630952	0.9772727
$m = 13$	$\beta = 2$	$\beta = 3$	$\beta = 4$	$\beta = 5$
avg	0.9420998	0.9398127	0.9375204	0.9357708
min	0.8823175	0.8614025	0.8882479	0.8828348
max	0.9807518	0.9788034	0.9753452	0.9748873

На рис 1.23 зображене залежність точності кластерування від кількості кластерів. Цікаво, що при, здавалося б, очевидному рішенні обрати кількість кластерів рівною трьом, отримуємо чи не найгіршу точність кластерування (при $\beta = 2$) після дефаззіфікації щодо еталонного розбиття (Для порівняння

на рис. 1.24 та рис. 1.25 наведені розбиття, що їх запропонували нейрони-переможці деяких каскадів, де $m \gg 3$).

Цьому легко знайти пояснення, адже метод нечітких k -середніх (а саме цей метод у цьому експерименті реалізовують вузли пулів кожного каскаду) добре розпізнає кластери лише гіперсферичної форми. Проте кластер довільної (негіперсферичної) форми, можна розбити на декілька гіперсферичних підкластерів, що й відбувається у каскадах, де $m > 3$, що пропонують розбиття на дрібні кластери. На рисунках 1.26 та 1.27 наведені розбиття деяких каскадів, де кількість кластерів більша від кількості класів еталонної вибірки; тут можна побачити, що декілька кластерів, що після дефаззіфікації будуть віднесені до одного класу, наприклад, Iris Virginica, розташовані поруч один з одним, тобто є складовими більшого кластеру негіперсферичної форми.

Таблиця 1.12 – Точність кластерування при $m = 14$

	$\beta = 2$	$\beta = 3$	$\beta = 4$	$\beta = 5$
avg	0.9369168	0.9448829	0.9383179	0.9403416
min	0.8847819	0.8953380	0.8787879	0.9069805
max	0.9731262	0.9754579	0.9918301	0.9762515

Таким чином, видається доречним навіть у випадку, коли відоме еталонне розбиття датасету, дозволити системі обрати кінцеву кількість кластерів самостійно, а особливо, коли вузли системи реалізують одинаковий метод кластерування.

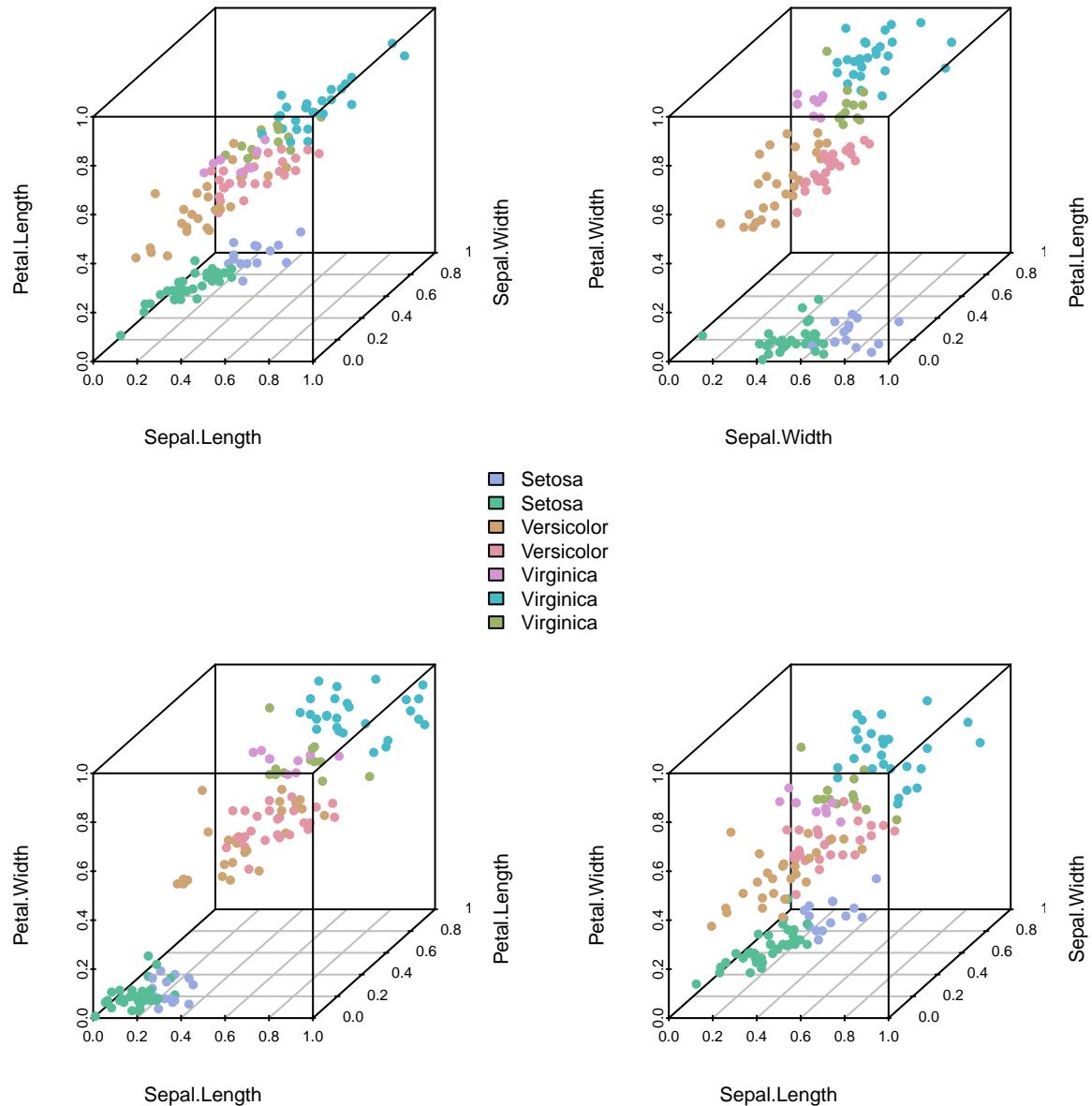


Рис. 1.26 – Розкластерований датасет «Іриси Фішера» при $m = 7$, $\beta = 5$ (Точність кластерування $\approx 93\%$)

Варто зауважити, що у цьому випадку для визначення локально оптимального розбиття доцільно використовувати модифіковані індекси валідності, чи такі, що не залежать від відстані центрів кластерів, наприклад ті, що ґрунтуються на щільності (density-based).

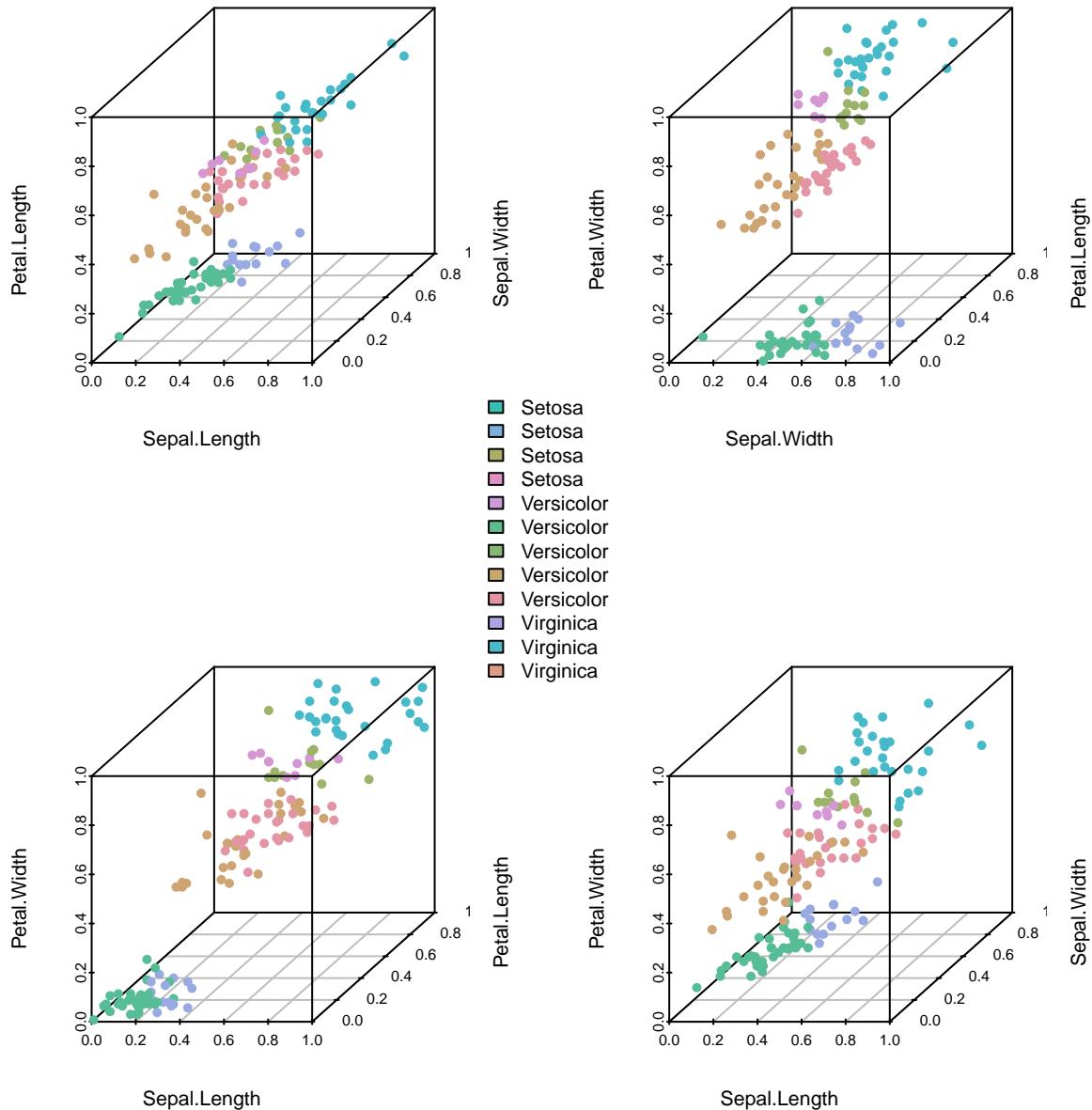


Рис. 1.27 – Розкластерований датасет «Іриси Фішера» при $m = 12$, $\beta = 4$
(Точність кластерування $\approx 96\%$)

Наступну серію експериментів було проведено на датасеті «Знання студентів про електричні машини постійного струму».

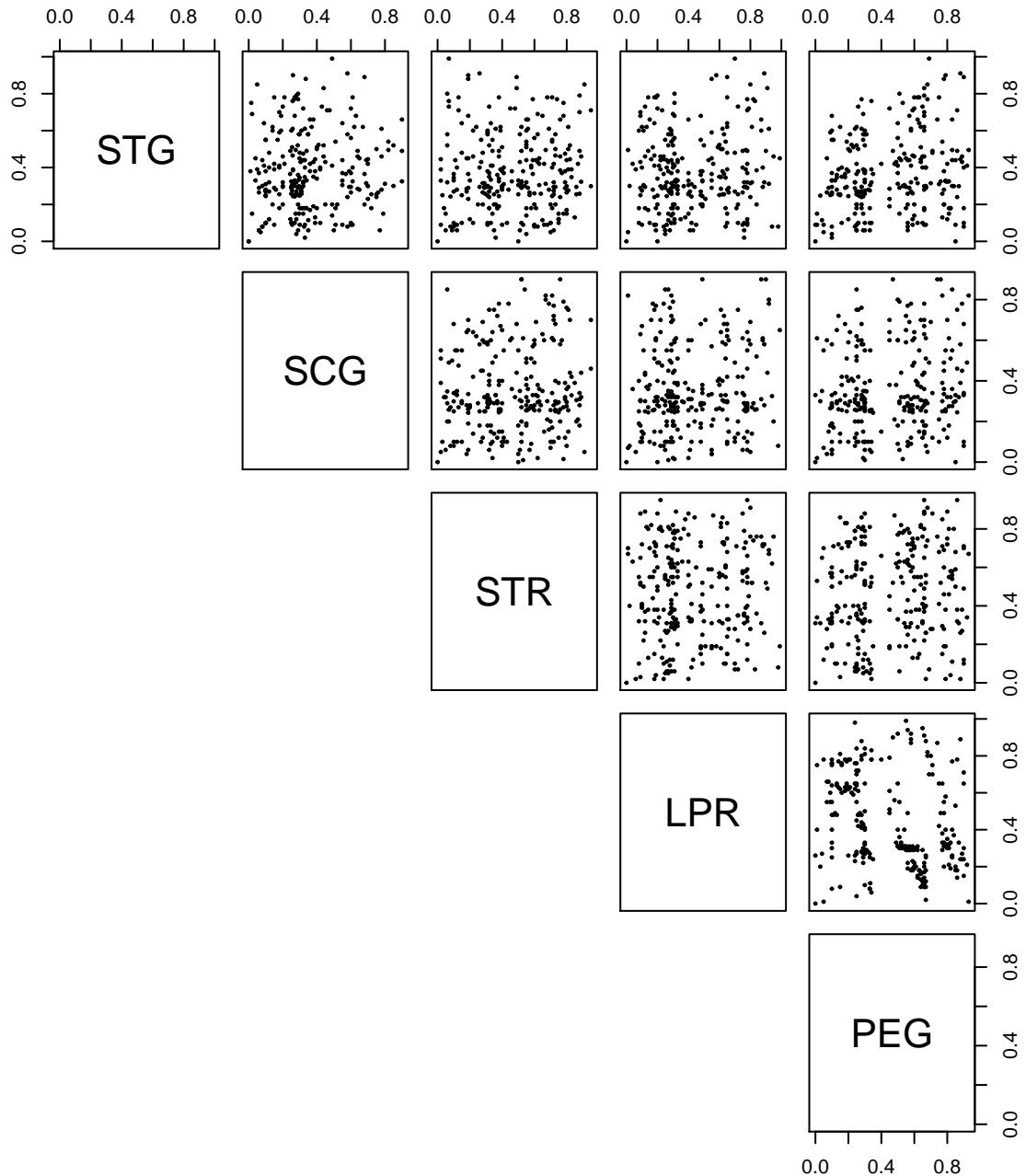


Рис. 1.28 – Датасет «Знання студентів про електричні машини постійного струму»

Цей датасет було додано до UCI репозиторію у 2013 році, він містить 403 патерни, кожен з п'ятьма атрибутами:

1. STG: кількість часу, що його витратив(витратила) студент(ка) на вивчення цільового матеріалу,
2. SCG: Кількість повторювань вивчення цільового матеріалу студен-

том(студенткою),

3. STR: Кількість часу, що його використав(використала) студент(ка) на вивчення матеріалу, пов'язаного з цільовим матеріалом,
4. LPR: Оцінка, що її отримав(отримала) студент(ка) на іспиті з предмету, пов'язаного з цільовим предметом,
5. PEG: Оцінка, що її отримав(отримала) студент(ка) на іспиті з цільового предмету,

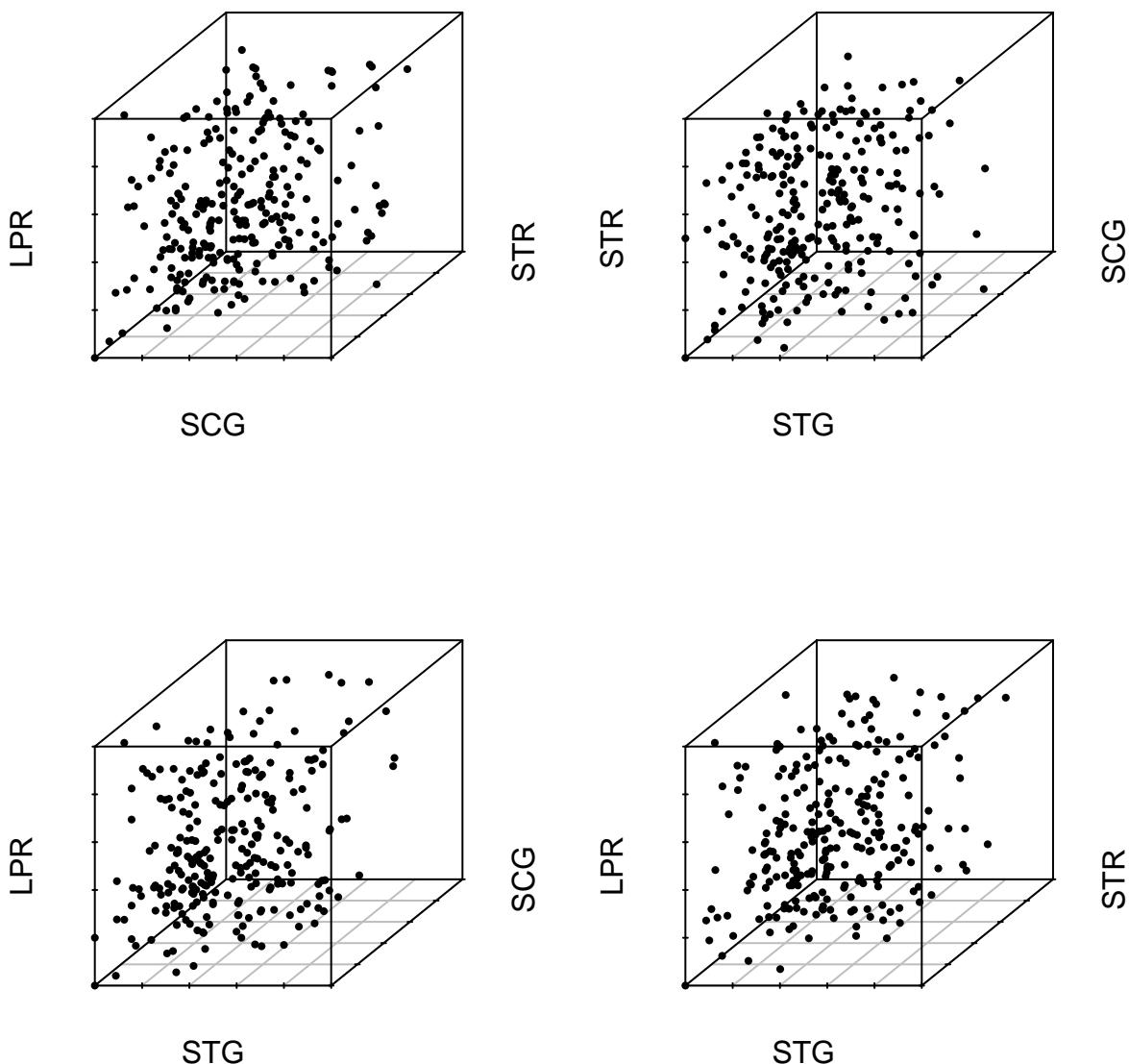


Рис. 1.29 – Датасет «Знання студентів про електричні машини постійного струму»

Попарні графіки атрибутів наведено на рис. 1.28 та у тримірному просторі на рис. 1.29.

Для цього експерименту нейрони-узагальнювачі керувалися рекурентним Ксі-Бені Індексом при визначенні локально-оптимального нейрона (з найлішшим параметром фаззіфікації) та каскаду (з оптимальною кількістю кластерів).

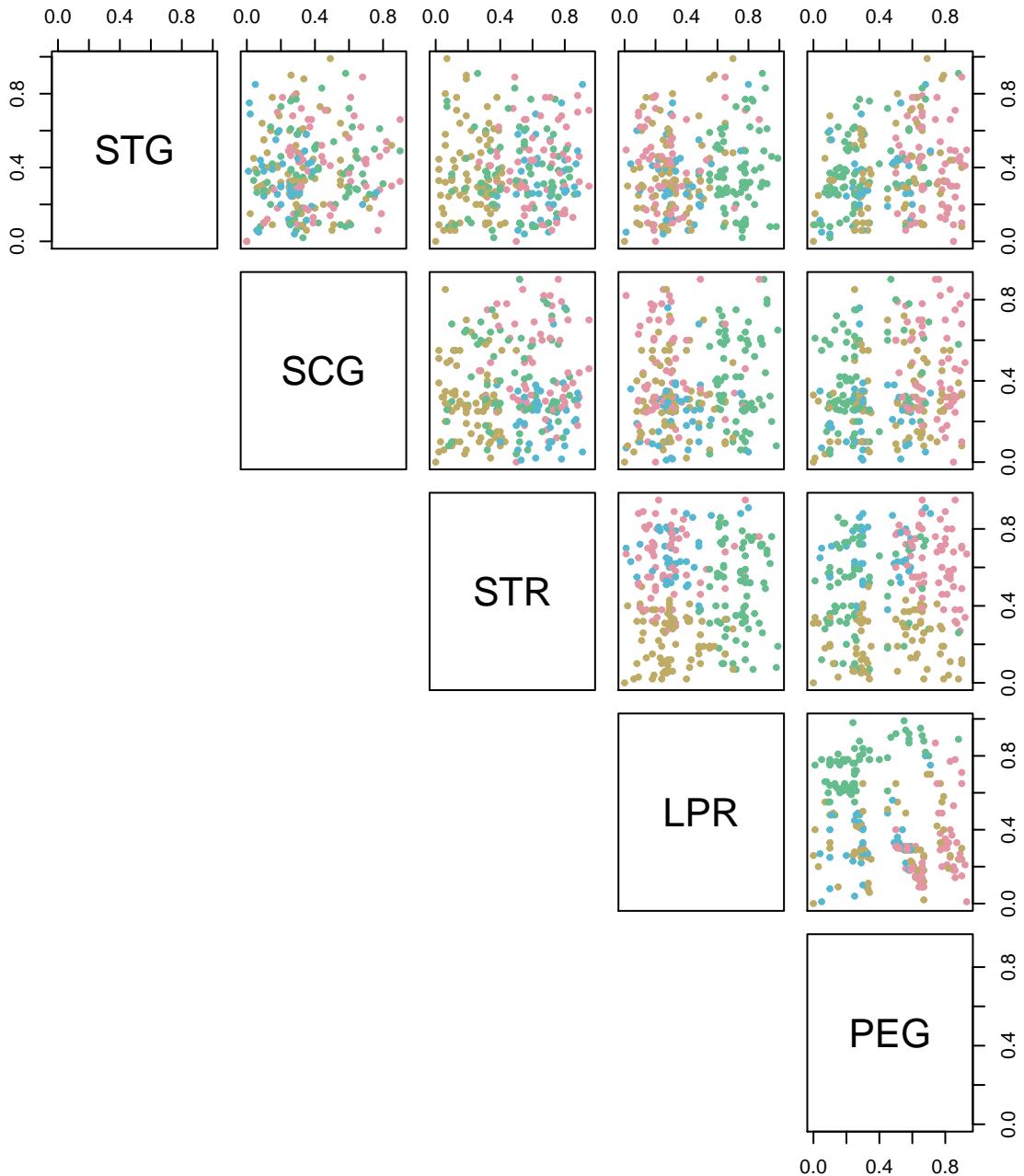


Рис. 1.31 – Датасет «Знання студентів про електричні машини постійного струму»

Оптимальне розбиття, що його наведено на рис.1.30 та на рис.1.31, надав другий нейрон третього каскаду з $m = 4$, $\beta = 2$ з коефіцієнтом Ксі-Бені 0.38155.

1.5. Розв'язування практичних задач за допомогою розробленої самонавчанної гібридної каскадної системи, що еволюціонує

Проблема здорового харчування - одна з найактуальніших у наші дні. Повноцінне харчування передбачає споживання достатньої кількості білків, жирів, вуглеводів, вітамінів, макро- і мікроелементів для нормального функціонування організму в цілому. Багато хвороб шлунково-кишкового тракту «молодіють» - це гастрити, виразкова хвороба шлунка і різні порушення обміну речовин. Фізичне здоров'я, стан імунітету, довголіття, психічна гармонія - все це безпосередньо пов'язано з проблемою здорового харчування людини. Для студентів проблема харчування стоїть особливо гостро, в зв'язку з браком часу у них немає можливості дотримуватися правильного режиму прийому їжі. Також для студентів характерний в основному сидячий спосіб життя - гіподинамія. У поєднанні із незбалансованим раціоном харчування це згубно впливає на організм і його стан. Звісно, вирішення проблеми здорового харчування потребує комплексного підходу, проте інформованість - невід'ємна складова правильного підбору раціону здорового харчування. Сьогодні нескладно знайти інформацію щодо рекомендованої денної кількості калорій, білків, жирів та вуглеводів, проте важко дати оцінку конкретному прийому їжі, наприклад, придбаному у їdalyni, де немає етикеток з такою інформацією. Мобільний додаток «Spoon app» може стати у нагоді, коли користувач прагне бути проінформованим щодо поживності конкретної страви, користуючись аналізом світлини тарілки з їжею. Вхідними даними мобільного додатку є світлина, що її користувач має зробити таким чином, аби тарілка знаходилася у центрі, а також тип тарілки (звичайна, глибока, дуже глибока) аби на виході додаток мав обґрунтовану кількість калорій та поживність порції, що була зображена на світлині.

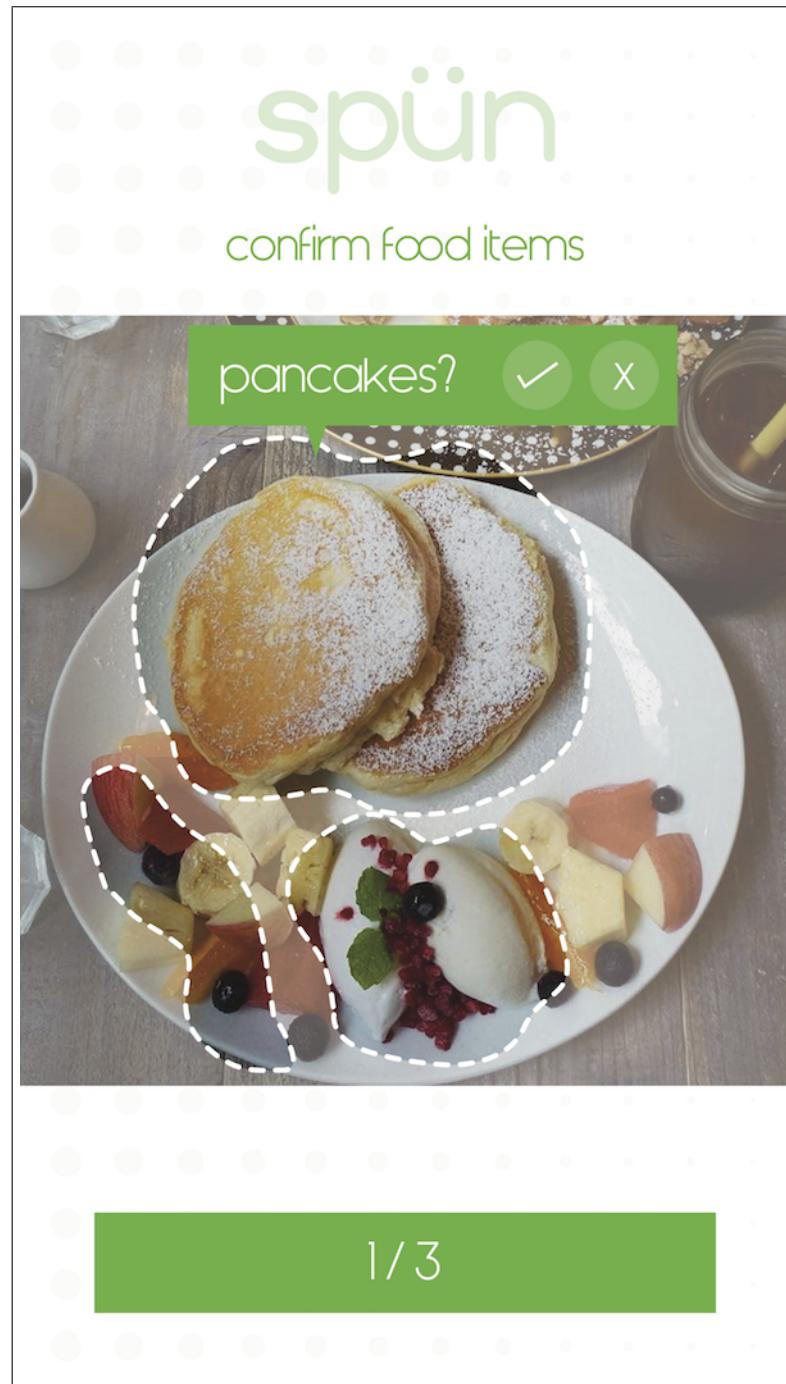


Рис. 1.32 – Другий етап аналізу світлини зі стравою мобільним додатком Spoon App (навчання з підкріпленням)

Аналіз світлини можна розбити на декілька етапів:

1. кластерування даних зображених на світлині (відбувається на стороні клієнту)
2. ідентифікація окремих складових страви: класифікація кожного зображення, після розбиття світлини на кластери на першому етапі (від-

бувається на серверній стороні), визначення типу продукту за допомогою бази даних, що знаходиться на сервері, та подальше визначення кількості калорій, співвідношення білкі, жирів та углеводів.



Рис. 1.33 – Перший етап аналізу світлини зі стравою мобільним додатком Spoon App (кластерування за умови невизначеності щодо кількості кластерів)

Другий етап у певному сенсі є навчанням з підкріпленим, адже користу-

вачеві пропонується підтвердити чи скорегувати кінцевий результат класифікації, як зображене на рис. 1.32. Проте більш цікавим нам видається саме перший етап аналізу світлини, і пропонована гібридна самонавчана система використовується саме на цьому етапі, адже вона краще від інших існуючих систем задовольняє умовам, що їх було висунуто на етапі формування технічних вимог до програмного забезпечення (Software Requirements Specifications):

- кластерування має проходити за умови невизначеності щодо кількості кластерів,
- оскільки кластерування відбувається на стороні клієнту, важливо мінімізувати обчислювальну складність алгоритму, а отже перевага надається методам послідовного кластерування.

По завершенні аналізу на першому етапі мобільний додаток попронує розбиття світлини на m кластерів, як показано на рис. 1.33. Варто зауважити, що межі кластерів, що їх визначила самонавчана система, дещо відрізняються від тих, що зображені на рис. 1.33, для того, щоб користувачеві було зручніше візуально сприймати розбиття світлини на кластери, пунктирні лінії, що зображують межі кластерів, на декілька міліметрів віддалені від меж дійсних кластерів, проте на сервер для подальшої класифікації відправляється світлина з розбиттям, що запропонувала система. На цьому етапі користувач може скорегувати розбиття, перетягнувши пунктирну лінію меж кластерів, чи зовсім видалити пропонований кластер. Хоча навчання з підкріпленим у прямому сенсі, відбувається лише на етапі класифікації (база даних на сервері оновлюється, коли користувач корегує результат класифікації), а на цьому етапі маємо саме навчання без учителя, це все ж таки дає змогу у певному сенсі дати оцінку кластеруванню системи: вважаємо кластерування успішним, якщо користувач не робив жодних змін до пропонованого розбиття, та неуспішним, коли розбиття було скореговане. Після бета тестування мобільного додатку маємо наступні результати:

Цікавим видається перебіг подій, коли користувач видалив один кластер,

кількість та межі кластерів залишилися незмінними	608
межі кластеров було дещо змінено користувачем, проте кількість кластерів залишилась незмінною	61
користувач змінив кількість кластерів та межі пропонованих кластерів	52
користувач видалив кластер(и), межі інших пропонованих кластерів лишилися незмінні	29

Таблиця 1.13 – Результати бета тестування першого етапу (кластерування за умови невизначеності щодо кількості кластерів) аналізу світлини мобільним додатком «Spoon App»

проте залишив межі інших кластерів незмінними, у такому випадку, як зазначалося вище, вважається що кластерування не було успішним. Проте подальший аналіз показав, що у 90% таких випадків користувач залишив на тарілці неїстівний предмет (виделку, ложку тощо), і хоча система вірно відвела йому окремий кластер, не має сенсу класифікувати його та визначати калорійність цього предмету, тому логічно, що користувач видалив його. У 10% випадків, як показав аналіз світлин з початковим кластеруванням, що запропонувала самонавчана система, та світлин після корегування користувачем, користувач свідомо видаляв складову страви, зазвичай найменш корисну (тістечко, шоколад тощо). Тому видається доцільним ці 4% світлин також віднести до таких, що були вірно розкластеровані системою (яка, проте, не бере до уваги людський фактор).

1.6. Розв'язування практичних задач за допомогою розробленої гібридної каскадної нейро-фаззі мережі, що еволюціонує, з оптимізацією пулу нейронів

Пропоновану гібридну каскадну нейро-фаззі мережу, що еволюціонує, було використано для вирішення задачі прогнозування витрат нормогодин на

ремонтні роботи візків вагонів типу 61-425, 61-181, 47Д та 47К у ТОВ «Харківський вагонобудівний завод». Підприємствам машинобудівного сектору економіки притаманне глибоке використання виробничої програми в якості основного інструменту планування. Коректне формування й оптимізація виробничої програми є досить нелегким процесом, але дуже важливим. Незаплановані втрати фінансових або інших ресурсів можуть не тільки мати серйозний негативний ефект на стан підприємства, а й у сучасних економічних умовах поставити під загрозу саме його існування. Все це робить оптимізацію виробничої програми першочерговим завданням планового відділу підприємства. Галузь вагонобудування України в цілому знаходиться не в найкращому стані останні роки. Серед основних негативних факторів, які привели до цього, слід виділити наступні:

- структурна та фінансова криза підприємств Укрзалізниці,
- скорочення попиту на вагони, через свуження або закриття традиційних ринків збути,
- непрозорість та неринковість більшості державних тендерів у сфері залізниці приводить до дуже високого порогу вхождення для відносно малих вагонобудівних підприємств.

В таких умовах навіть найбільш оптимальна виробнича програма не гарантує підприємству виживання, особливо це стосується відносно невеликих підприємств. Саме до таких підприємств і відноситься ТОВ «Харківський вагонобудівний завод». Через малий попит на нові вагони завод був вимушений сконцетруватися на ремонті та обслуговуванні візків та колісних пар. Характерними відзнаками таких ремонтних робіт є те, що горизонт їх планування менший, ніж при роботах із вагонами в цілому, та їх нерегулярність. Це й призводить до того, що керівництво підприємства має потребу в інструментарії, який дозволяє оперативно сформувати та внести корективи в поточний виробничий план без масштабних змін у річному плані виробництва. Ці корективи мають бути максимально наближені до реальності. Якщо виділити недостатньо часу на нові поточні задачі, то доведеться вносити зміни в річний

план виробництва, що може призвести до зриву виконання масштабних робіт. Якщо ж корективи формуються з використанням максимальних виробничих нормативів, то оперативні задачі затягуються і підприємство може втратити шанс на нові аналогічні замовлення, що в умовах низького попиту на вагоноремонтні послуги може призвести до краху. Саме тому було поставлено задачу прогнозування найбільш реальних термінів виконання оперативних завдань по ремонту візків.

У таблиці 1.14 наведені типи та послідовність ремонтних робіт для візків вагонів типу 61-425, 61-181, 47Д та 47К. Для формування вектору вхідних даних були залучені експерти, що надали оцінку складності тому чи іншому типу ремонтних робіт, якщо це необхідно. Вочевидь, складність та тривалість деяких робіт не залежить від стану візку на момент початку ремонтного циклу, наприклад, виконання «Сушки атмосферної відремонтованих деталей і складових одиниць візку 0.162-04.20.00: 000 (1) після грунтування» або «Випробування гасителів коливання 45.30.045» займає приблизно однакову кількість нормогодин, а отже не потребує експертної оцінки (якщо такі типи робіт необхідні, оцінка їх складності завжди дорівнює одиниці). Проте витрата нормогодин на більшість типів ремонтних робіт (наприклад, на «Ремонт деталей підвісок 30.30.025» чи «Ремонт важелів гальмівної важільної передачі») суттєво варіюється в залежності від характеру та ступеню отриманих пошкоджень і потребує експертної оцінки (оцінка надається в інтервалі $(0, 1]$, де 1 - найвища складність роботи).

Для вирішення поставленого завдання було обрано саме пропоновану гібридну нейронну мережу, адже важливим аспектом є можливість системи працювати з датасетом, де кількість патернів низька від кількості вхідних параметрів. Пропоновану гібридну нейро-фаззі мережу було навчано на тренувальному датасеті з 62-х патернів, кожен з яких містить 69 атрибутів та, на момент впровадження, перевірено на тестовому датасеті, що містив 20 патернів. Система продемонструвала високу точність прогнозу: RMSE = 0.08506766, SMAPE = 0.2545574, абсолютна похибка не перевищує 27 нормо-

годин (при середній витраті у 1124 нормогодин для повного циклу ремонтних робіт та 722 нормогодин для часткового).

Таблиця 1.14 – Типи ремонтних робіт для візків вагонів 61-425, 61-181, 47Д та 47К

Код роботи	Назва роботи	Попередні роботи	Подальші роботи
109.01.001	Розбирання візків 0.162-04.20.00 : 000 (1)		109.05.046 103.01.002
109.01.002	Розбирання візків 0.114-04.10.00 : 000 (1)		109.05.047 103.01.002
109.05.046	Попередня дефектація вузлів візку 0.162-04.20.00 : 000 (1)	109.01.001	109.05.047 109.05.049 109.01.004
109.05.047	Попередня дефектація вузлів візку 0.114-04.10.00 : 000 (1)	109.05.046 109.01.002	109.05.050 109.01.004
109.05.049	Абразивне очищення деталей і вузлів візку 0.162-04.20.00 : 000 (1)	109.05.046	109.01.022 109.01.035 109.01.036 109.01.003
109.05.050	Абразивне очищення деталей і вузлів візку 0.114-04.10.00 : 000 (1)	109.05.047	109.01.022 109.01.035 109.01.036 109.01.003
109.01.003	Підготовка шпіntonов для ремонту	109.05.049 109.05.050	109.05.051
109.05.051	Ремонт шпіntonов	109.01.003	109.01.031 109.01.032

Код роботи	Назва роботи	Попередні роботи	Подальші роботи
109.01.004	Виготовлення комплекту деталей для ремонту візків	109.05.046 109.05.047 109.05.048	109.01.005 109.01.006
109.01.005	Фарбування виготовлених деталей візку 0.162-04.20.00 : 000 (1)	109.01.004	109.05.052
109.05.052	Сушка атмосферна виготовлених деталей візку 0.162-04.20.00 : 000 (1)	109.01.005	109.01.044 109.01.007 109.01.009
109.01.006	Фарбування виготовлених деталей візку 0.114-04.10.00 : 000 (1)	109.01.004	109.05.053
109.05.053	Сушка атмосферна виготовлених деталей візку 0.114-04.10.00 : 000 (1)	109.01.006	109.01.044 109.01.007 109.01.009 109.01.047
109.01.007	Ремонт рами візку 0.162-04.20.00 : 000 (1)	109.05.052 109.05.053 109.05.048	109.01.008
109.01.008	Грунтування рами візку 0.162-04.20.00 : 000 (1)	109.01.007	109.05.054
109.05.054	Сушка атмосферна рами візку 0.162-04.20.00 : 000 (1)	109.01.008	109.01.029 109.01.010
109.01.009	Ремонт рами візку 0.114-04.10.00 : 000 (1)	109.05.052 109.05.053 109.05.048	109.01.010
109.01.010	Грунтування рами візку 0.114-04.10.00 : 000 (1)	109.01.009	109.05.055

Код роботи	Назва роботи	Попередні роботи	Подальші роботи
109.05.055	Сушка атмосферна рами візку 0.114-10.00 : 000 (1) після грунтування	109.01.010	109.01.030 109.01.032
109.01.044	Ремонт надресорного брусу 3751-Н (1)	109.05.052 109.05.053 109.05.048	109.01.045
109.01.045	Грунтування надресорного брусу 3751-Н (1)	109.01.044	109.05.056
109.05.056	Сушка атмосферна надресорного брусу 3751-Н (1) після грунтування	109.01.045	109.01.046
109.01.046	Фарбування надресорного брусу 3751-Н (1)	109.05.056	109.05.057
109.05.057	Фарбування надресорного брусу 3751-Н (1)	109.01.046	109.01.040 109.01.039
109.01.047	Ремонт надресорного брусу 3751-Н (2)	109.05.052 109.05.053 109.05.048	109.01.048
109.01.048	Грунтування надресорного брусу 3751-Н (2)	109.01.047	109.05.058
109.05.058	Сушка атмосферна надресорного брусу 3751-Н (2) після грунтування	109.01.048	109.01.049
109.01.049	Фарбування надресорного брусу 3751-Н (2)	109.05.058	109.05.059

Код роботи	Назва роботи	Попередні роботи	Подальші роботи
109.05.059	Сушка атмосферна надресорного брусу 3751-Н (2) після фарбування	109.01.049	109.01.041 109.01.039
109.01.017	Ремонт деталей підвісок 30.30.025	109.05.052 109.05.053	109.01.041 109.01.023 109.01.024 109.01.040
109.01.018	Ремонт тяги повідця	109.05.052 109.05.053	109.01.041 109.01.039 109.01.025
109.01.019	Ремонту запобіжного стрижня центрального підвішування	109.05.052 109.05.053	109.01.041 109.01.039 109.01.025
109.01.020	Ремонт траверсів	109.05.052 109.05.053	109.01.037 109.01.038 109.01.025 109.01.027
109.01.021	Ремонт тяги 13.41.033	109.05.049 109.05.050	109.01.037 109.01.038 109.01.025 109.01.027
109.01.022	Ремонт важелів гальмівної важільної передачі (візків)	109.05.049 109.05.050	109.01.037 109.01.038 109.01.025 109.01.027
109.01.023	Випробування деталей на розтяг 0.162-04.20.00 : 000 (1)	109.01.017	109.01.025 109.01.027

Код роботи	Назва роботи	Попередні роботи	Подальші роботи
109.01.024	Випробування деталей на розтяг 0.114-04.10.00 : 000 (1)	109.01.017	109.01.025 109.01.027
109.01.025	Грунтuvання відремонтованих деталей і складових одиниць візку 0.162-04.20.00 : 000 (1)	109.01.023 109.01.017 109.01.018 109.01.019 109.01.020	109.05.060
109.05.060	Сушка атмосферна відремонтуваних деталей і складових одиниць візку 0.162-04.20.00 : 000 (1) після грунтuvання	109.01.025	109.01.026
109.01.026	Фарбування відремонтованих деталей і складових одиниць візку 0.162-04.20.00 : 000 (1)	109.05.060	109.05.061
109.05.061	Сушка атмосферна відремонтуваних деталей і складових одиниць візку 0.162-04.20.00 : 000 (1) після фарбування	109.01.026	109.01.037
109.01.027	Грунтuvання відремонтованих деталей і складових одиниць візку 0.114-10.00 : 000 (1)	109.01.024 109.01.017 109.01.018 109.01.019 109.01.020	109.05.062
109.05.062	Сушка атмосферна відремонтуваних деталей і складових одиниць візку 0.114-04.10.00 : 000 (1) після грунтuvання	109.01.027	109.05.057

Код роботи	Назва роботи	Попередні роботи	Подальші роботи
109.01.028	Фарбування відремонтованих деталей і складових одиниць візу 0.114-04.10.00 : 000 (1)	109.05.062	109.05.063
109.05.063	Сушка атмосферна відремонтуваних деталей і складових одиниць візу 0.114-04.10.00 : 000 (1) після фарбування	109.01.028	109.01.038
109.01.029	Установка термодатчиків на візок 0.162-04.20.00 : 000 (1)	109.05.054	109.01.033 109.01.039 109.01.040
109.01.030	Установка термодатчиків на візок 0.114-04.10.00 : 000 (1)	109.05.055	109.01.041 109.01.034 109.01.039
109.01.031	Установка шпіントонов на рами візків 0.162-04.20.00 : 000 (1)	109.05.051 109.05.054	109.01.033 109.01.037
109.01.032	Установка шпіントонов на рами візків 0.114-10.00 : 000 (1)	109.05.051 109.05.055	109.01.034 109.01.038
109.01.033	Фарбування рами візу 0.162-04.20.00 : 000 (1)	109.01.029 109.01.031	109.05.064
109.05.064	Сушка атмосферна рами візу 0.162-04.20.00 : 000 (1) після фарбування	109.01.033	109.01.037
109.01.034	Фарбування рами візу 0.114-04.10.00 : 000 (1)	109.01.030 109.01.032	109.05.065
109.05.065	Сушка атмосферна рами візу 0.114-04.10.00 : 000 (1) після фарбування	109.01.034	109.01.038

Код роботи	Назва роботи	Попередні роботи	Подальші роботи
109.01.035	Ремонт підвісок башмаків візків	109.05.049 109.05.050	109.01.037 109.01.038
109.01.036	Ремонт пружин візків	109.05.049 109.05.050	109.01.040 109.01.041 109.01.039
109.01.037	Збірка і монтаж гальмової важільної передачі візку 0.162-04.20.00 : 000 (1)	109.01.021 109.01.022 109.01.020 109.01.035 109.05.061 109.05.064 109.01.031	109.01.040 109.01.039
109.01.038	Збірка і монтаж гальмової важільної передачі візку 0.114-04.10.00 : 000 (1)	109.01.021 109.01.022 109.01.020 109.01.035 109.05.063 109.05.065 109.01.032	109.01.041 109.01.039
109.01.039	Випробування гасителів коливання 45.30.045	109.01.036 109.01.037 109.05.057	109.01.040 109.01.041

Код роботи	Назва роботи	Попередні роботи	Подальші роботи
109.01.040	Збірка візку 0.162-04.20.00 : 000 (1)	109.01.036 109.01.037 109.01.039 109.05.057 109.01.017 109.01.018	109.01.043
109.01.043	Фарбування візку 0.162-04.20.00 : 000 (1) в зборі	109.01.040	109.05.066
109.05.066	Сушка атмосферна візок 0.162-04.20.00 : 000 (1) в зборі	109.01.043	
109.01.041	Збірка візку 0.114-04.10.00 : 000 (1)	109.01.036 109.01.038 109.01.039 109.01.017 109.01.018	109.01.042
109.01.042	Фарбування візку 0.114-10.00 : 000 (1) в зборі	109.01.041	109.05.067
109.05.067	Сушка атмосферна візок 0.114-10.00 : 000 (1) в зборі	109.01.042	
109.05.048	Дефектація віzkів	109.05.049 109.05.050	109.01.007 109.01.009 109.01.044 109.01.047 109.01.004
103.01.002	Нове формування пасажирської колісної пари РУ1Ш-950 Б	109.01.001 109.01.002	103.01.003

Код роботи	Назва роботи	Попередні роботи	Подальші роботи
103.01.003	Фарбування колісної пари РУ1Ш-950 ТУ 24.05.816-82 (для вагона мод. 47К)	103.01.002	109.01.040 109.01.041

Висновки до розділу 1

1. Виконано програмну реалізацію запропонованого у підрозділі ?? розширеного нео-фаззі нейрону, який реалізує нечітке висновування за Такагі-Сугено довільного порядку. Продемонстровано, що розширені нео-фаззі нейрони мають покращені апроксимуючі властивості у порівнянні з традиційними нео-фаззі нейронами. Досліджено залежність точності прогнозування розширеними нео-фаззі нейронами як штучно сгенерованих, так і дійсних хаотичних часових рядів від порядку нечіткого висновування та кількості функцій належності.
2. Проведено імітаційне моделювання запропонованої у розділі ?? архітектури (що ґрунтуються на розширеніх нео-фаззі нейронах) та методів навчання гібридної каскадної нейронної мережі, що еволюціонує, з оптимізацією пулу нейронів у кожному каскаді. Показано що запропоновані нейрони-узагальнювачі реалізують оптимальний за точністю прогноз нелінійних стохастичних і хаотичних сигналів у онлайн режимі.
3. Виконано програмну реалізацію запропонованого у підрозділі ?? багатовимірного нео-фаззі нейрона.
4. Змодельовано запропоновану у підрозділі ?? МІМО архітектуру з оптимізацією пулу багатовимірних нейронів у кожному каскаді, що реалізує нелінійне відображення $R^n \rightarrow R^g$ у режимі послідовного оброблення даних. Показано, що запропоновані багатовимірні узагальнюючі елементи в режимі реального часу реалізують оптимальне об'єднання

багатовимірних вихідних сигналів нейронів пулу каскадів.

5. Проведено імітаційне моделювання запропонованої у розділі ?? архітектури і методу самонавчання каскадної нейро-фаззі системи, що еволюціонує, для послідовного кластерування потоків даних з автоматичним визначенням оптимальної кількості кластерів.
6. Розв'язано практичну задачу нечіткого кластерування світлин для подальшого їх класифікування за умови невизначеності щодо кількості кластерів та рівня їх розмитості за допомогою самонавчаної гібридної системи, що її було запропоновано у підрозділі ??.
7. Розв'язано практичну задачу прогнозування витрат нормогодин для ремонтних робіт віzkів вагонів типу 61-425, 61-181, 47Д та 47К на ТОВ «Харківський вагонобудівний завод» за допомогою каскадної гібридної нейро-мережі, що еволюціонує, та модифікованого методу її навчання, які було запропоновано у підрозділі ??.

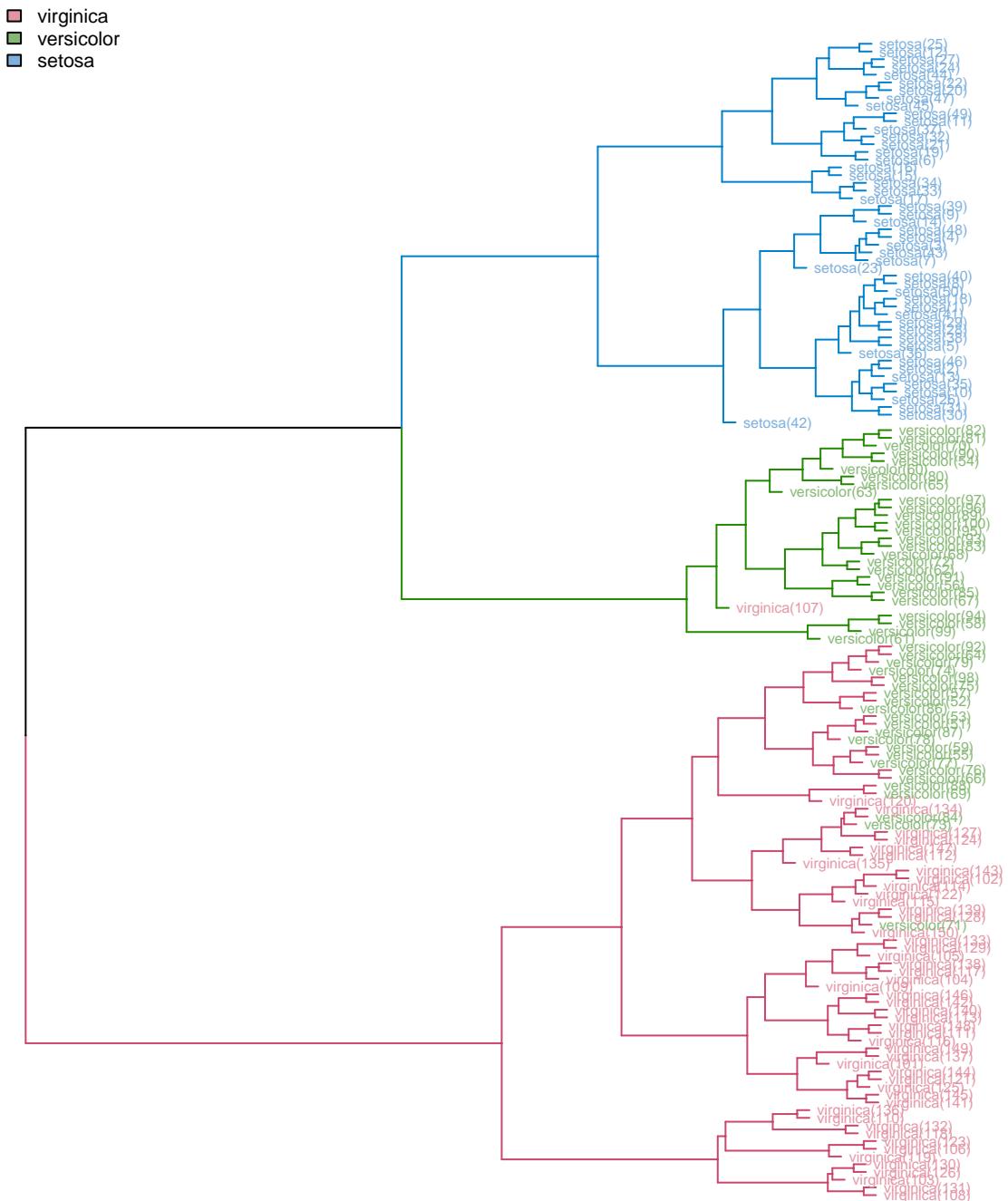


Рис. 1.21 – Ієрархічне класерування датасету «Іриси Фішера»

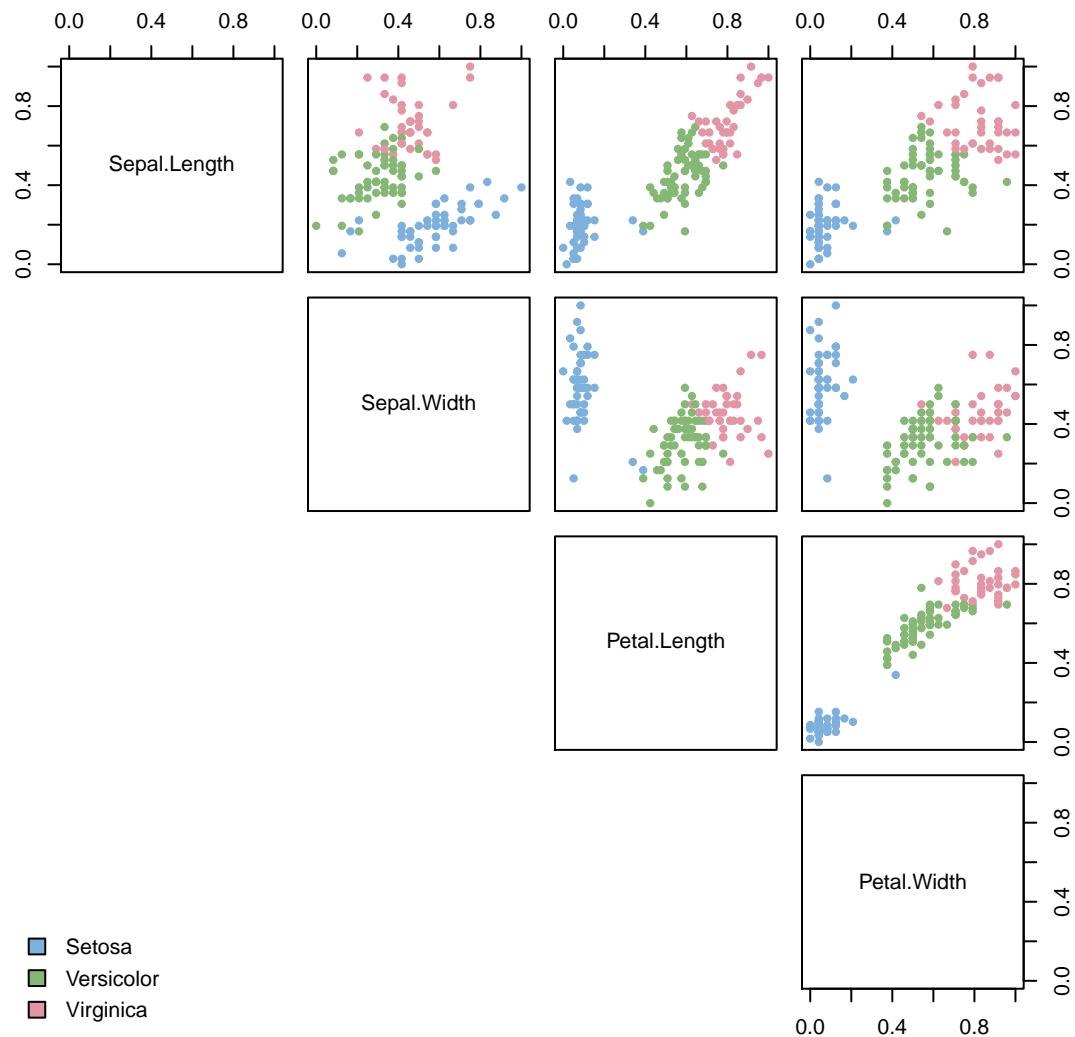


Рис. 1.22 – Розкластерований датасет «Іриси Фішера» при $m = 3$, $\beta = 2$ (Точність кластерування – 96%)

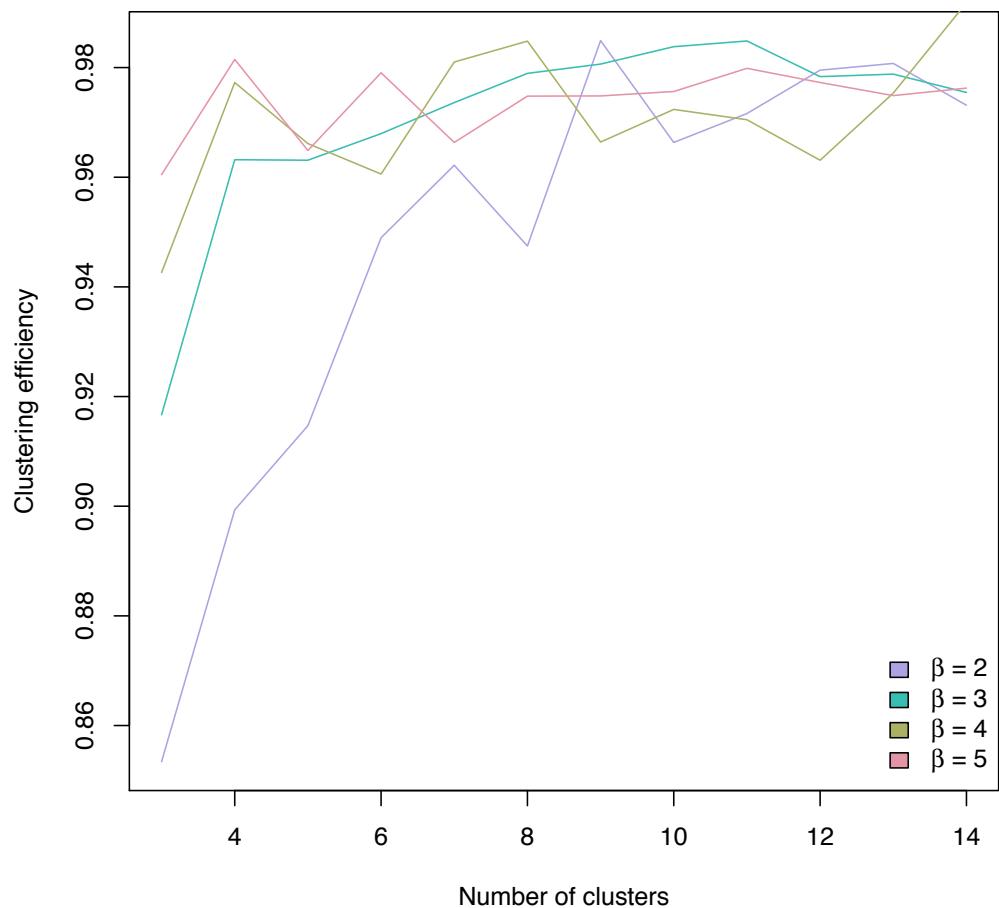


Рис. 1.23 – Точність кластерування від кількості кластерів та параметру фаз-зіфіказії

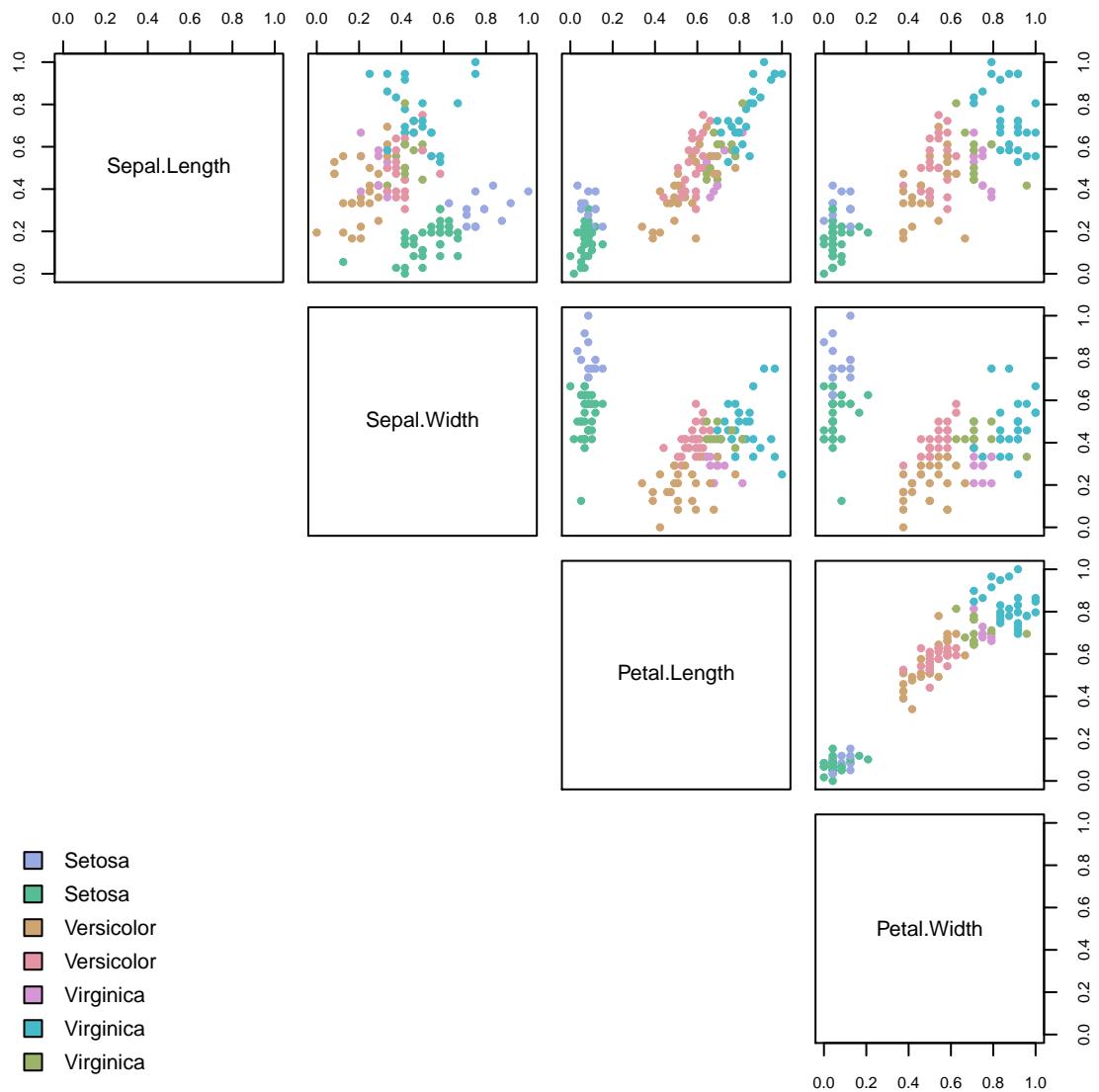


Рис. 1.24 – Розкластерований датасет «Іриси Фішера» при $m = 7$, $\beta = 5$ (Точність кластерування $\approx 93\%$)

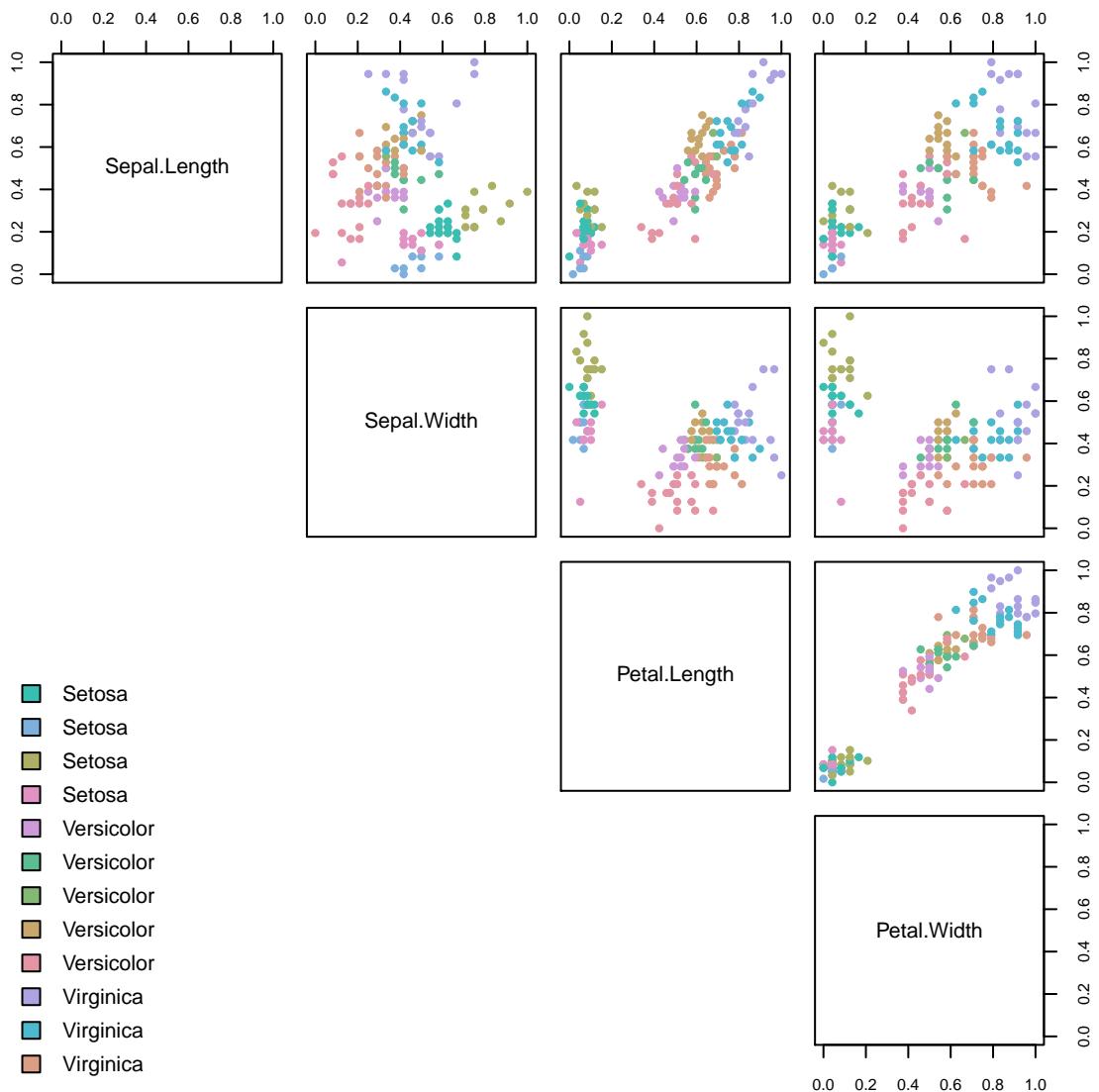


Рис. 1.25 – Розкластерований датасет «Іриси Фішера» при $m = 12$, $\beta = 4$
 (Точність кластерування $\approx 96\%$)

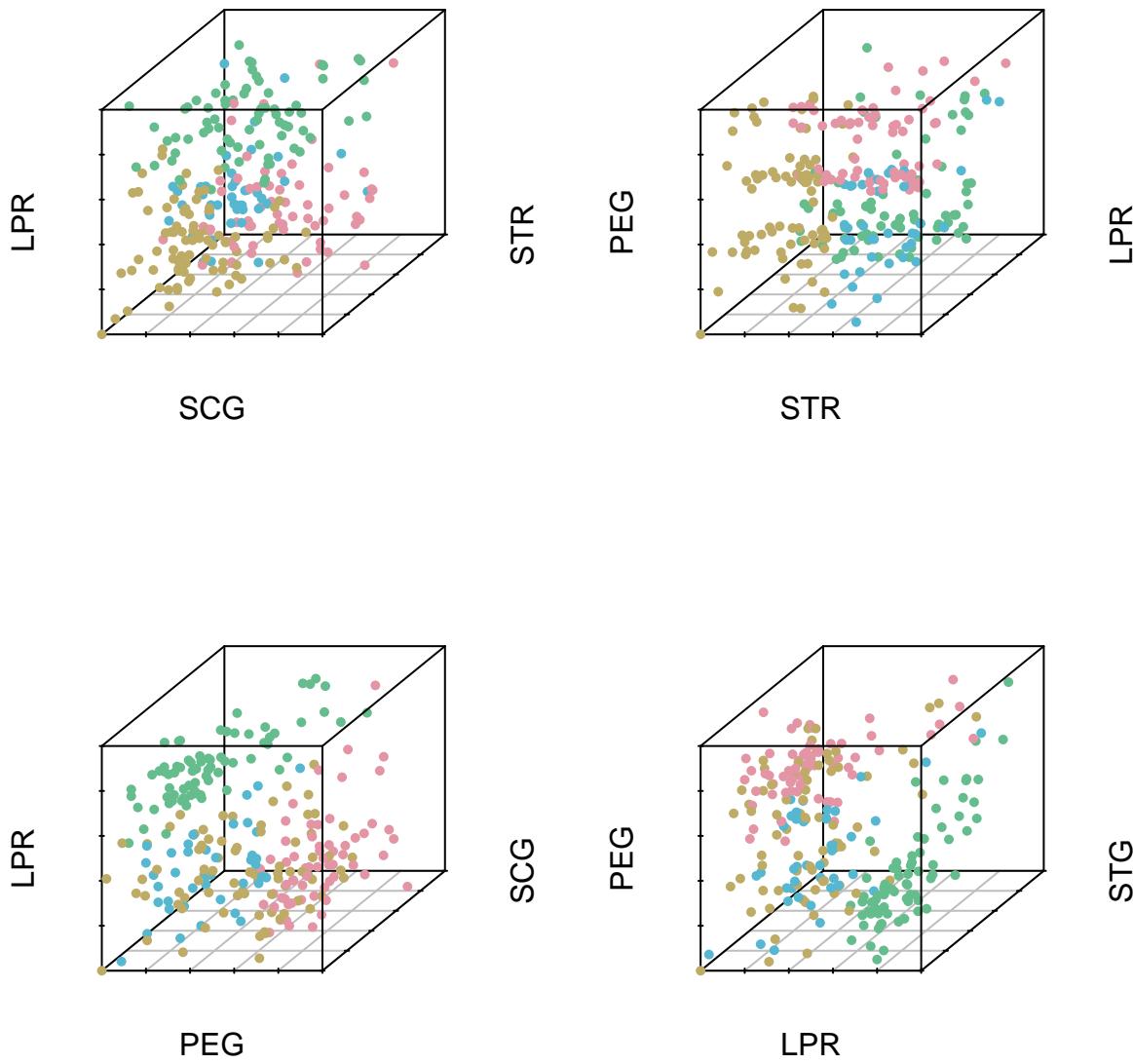


Рис. 1.30 – Датасет «Знання студентів про електричні машини постійного струму»