

# Projekt 1 - Sieć Hopfielda - Raport

## 1. Opis rozwiązania

Sieć Hopfielda została po raz pierwszy pokazana przez Johna Hopfielda w 1982 roku. Jest to rodzaj rekurencyjnej sieci neuronowej, stan każdego neuronu zależy od stanu neuronów w poprzedniej jednostce czasu. W tym przypadku, każdy neuron jest połączony z resztą neuronów w sieci, połączenia między nimi mogą być reprezentowane jako macierz wag  $W_{nn}$ :

- połączenia między neuronami są symetryczne,  $W = W^T$ ,
- żaden neuron nie jest połączony z samym sobą,  $W_{ii} = 0$ ,
- w klasycznej sieci hopfielda, neurony przyjmują stany binarne -1 lub 1.

Sieć Hopfielda należy do sieci asocjacyjnych, potrafi odtwarzać "zapamiętane" wzorce na podstawie niepełnych lub zaszumionych danych.

Do uczenia sieci stosuje się metodę opartą na regule Hebb'a:

$$W_{ij} = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p x_i^{(k)} x_j^{(k)}$$

W praktyce jest to średnia iloczynów zewnętrznych każdego ze wzorców.

Po treningu sieć może odtwarzać zapamiętane wzorce na podstawie wzorca wejściowego  $x(0)$ . W każdej iteracji stany neuronów aktualizowane są na podstawie znaku aktywacji:

$$y_i(t + 1) = \operatorname{sgn}\left(\sum_{j=1}^n W_{ij} y_j\right),$$

przy czym w aplikacji przyjęto konwencję, że gdy aktywacja jest równa 0, stan neuronu zostaje ustalony na 1.

Neurony mogą być aktualizowane w dwóch trybach:

- asynchronicznie - w losowej kolejności - co zapobiega sytuacji, że neurony oscylują między dwoma stanami,
- synchronicznie - wszystkie jednocześnie - łatwiejsze do zrównoleglenia.

Sieć dąży do minimalizacji funkcji energii:

$$E = - \sum_{i,j,i < j}^n W_{ij} y_i y_j - \sum_{i=0}^n b_i y_i ,$$

przy czym  $b$  jest wektorem wyrazów wolnych - średnią wektorów zapamiętanych wzorców.

Energia maleje podczas procesu odtwarzania, aż sieć osiągnie stan stabilny.

Jednym z głównych zastosowań sieci Hopfielda jest odtwarzanie zaszumionych lub częściowo zakrytych binarnych obrazów. Obraz taki jest "spłaszczany" do wektora n-elementowego. Inne zastosowania to rozwiązywanie NP-trudnych problemów kombinatorycznych, np. problemu komiwojażera oraz ogólna korekcja błędów.

## 2. Zależności aplikacji

Aplikacja działa w Pythonie w wersji 3.12.3. Wymagane są również następujące pakiety pip:

- PyQt6 (6.9.1)
- numpy (2.3.2)
- pillow (11.3.0)
- datasets (4.0.0)
- matplotlib (3.10.6)

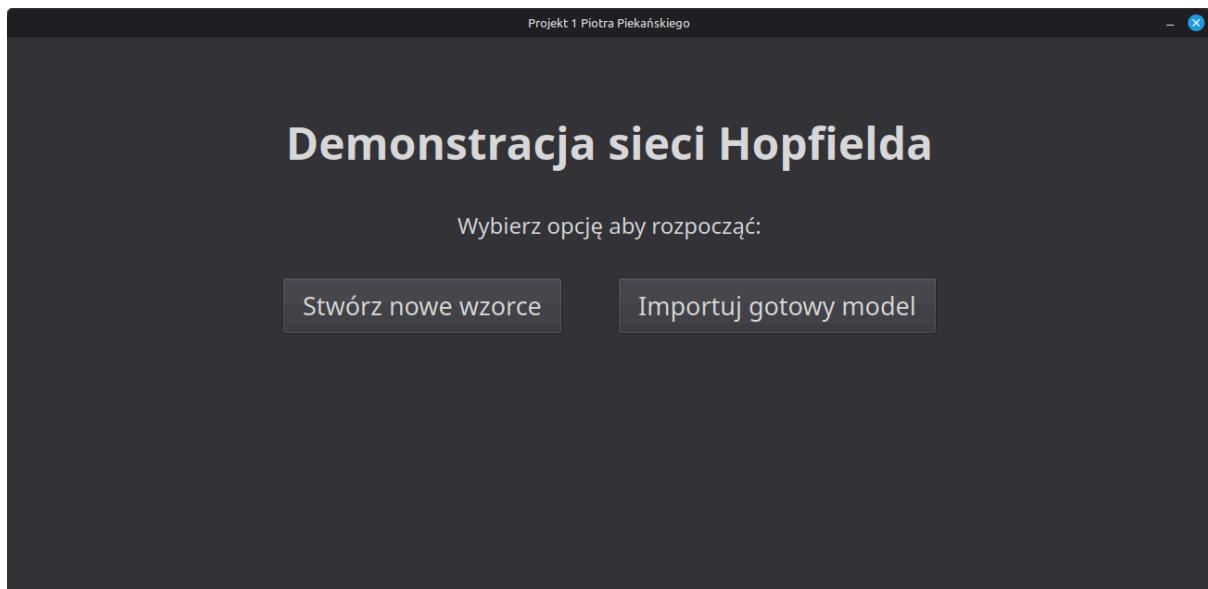
oraz wszelkie ich zależności. Pełną listę pakietów można znaleźć w pliku requirements.txt, w głównym katalogu repozytorium. Można zainstalować wszystkie pakiety używając polecenia:

```
pip install -r requirements.txt
```

Do funkcji wczytania wzorców MNIST wymagane jest połączenie sieciowe.

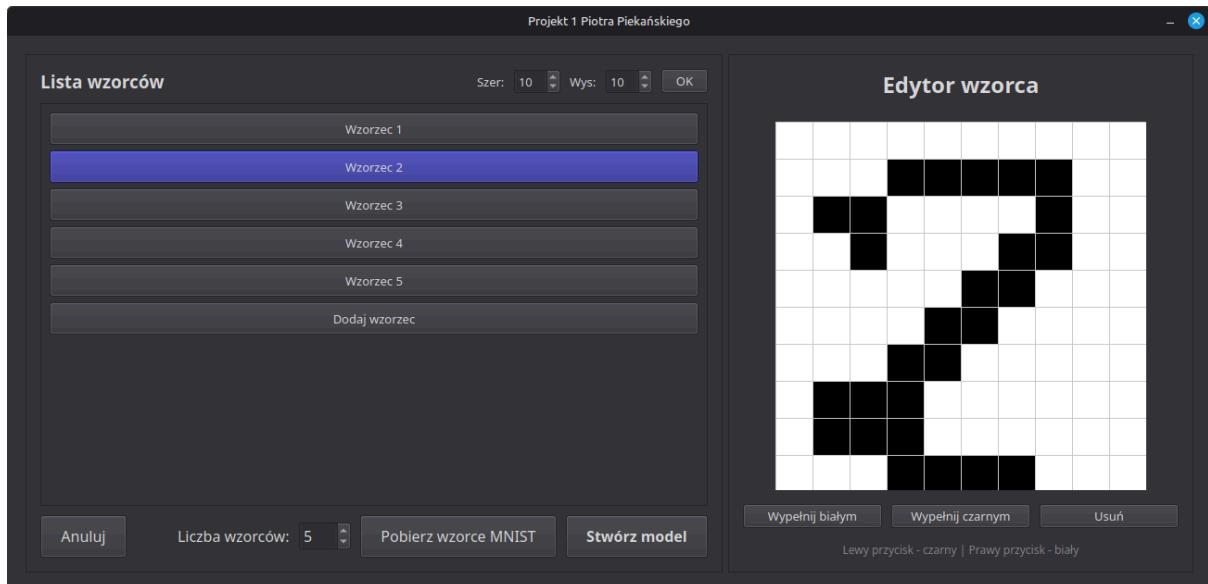
## 3. Funkcje programu

Aplikacja graficzna demonstruje sieć Hopfielda na przykładzie rekonstrukcji (odtwarzania) czarno-białych obrazków. Użytkownik ma możliwość własnoręcznego rysowania obrazków - wzorców lub wczytania istniejących wzorców z zestawu danych MNIST Fashion. Po utworzeniu modelu użytkownik może spróbować odtworzyć jeden ze wzorców na bazie obrazka wejściowego, zobaczyć przebieg odtwarzania wzorca oraz funkcję energii.



Rysunek 3.1. Widok startowy programu

Po uruchomieniu programu widoczne jest menu główne (Rys. 3.1.), z którego można przejść do trybu tworzenia wzorców (Rys. 3.2.), lub wybrać już przygotowane wzorce i modele w postaci pliku pickle (rozszerzenie .pkl), po wybraniu poprawnego pliku, aplikacja przenosi użytkownika do trybu odtwarzania wzorca (Rys. 3.3.).



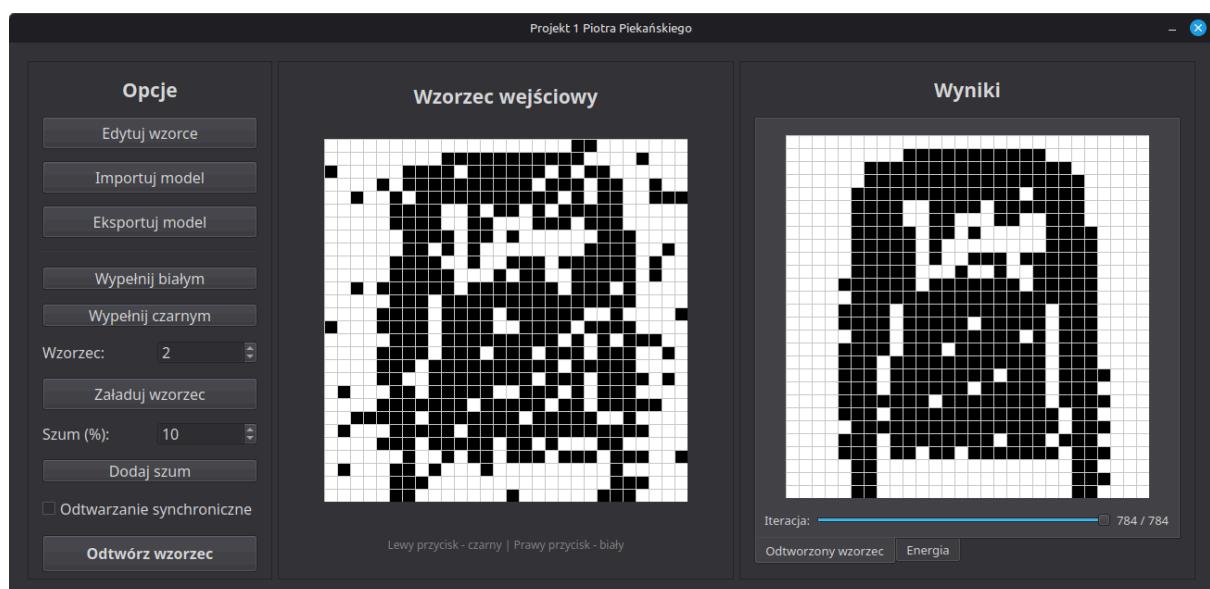
Rysunek 3.2. Widok tworzenia wzorców do zapamiętania przez sieć

Widok tworzenia wzorców (Rys. 3.2.) składa się z listy wzorców po lewej oraz edytora wzorca po prawej. Po wejściu z menu głównego, lista wzorców zawiera tylko jeden pusty (biały) wzorzec. Kliknięcie przycisku "Dodaj wzorzec" tworzy nowy obrazek i rozpoczyna jego edycję. W każdej chwili można powrócić do edycji dowolnego obrazka.

Powyżej listy znajdują się dwa pola numeryczne z wymiarami obrazka. Po zatwierdzeniu nowych wymiarów, czyszczona jest lista wzorców (nie ma potwierdzenia) oraz tworzona jest nowa plansza do rysowania.

Rysowanie obrazków odbywa się za pomocą myszy, w stylu programów graficznych, jak MS Paint. Lewy przycisk myszy rysuje czarnym kolorem, a prawy białym. Biały i czarny odpowiadają odpowiednio stanom -1 i 1 neuronów. Pod planszą są przyciski wypełniające planszę jednym kolorem oraz przycisk usuwający wzorzec z listy. Zmiany dokonane w obrazku są natychmiast zapamiętywane w liście.

Pod listą znajduje się przycisk "Anuluj", cofający zmiany i wracający do poprzedniego widoku (bez potwierdzenia). "Pobierz wzorce MNIST" zastępuje listę określona liczbą wzorców z MNIST Fashion (pobieranie może potrwać dość długo, zalecany jest zapis modelu). Wzorce są automatycznie skalowane do wybranych wymiarów i binaryzowane. Przycisk "Stwórz model", trenuje sieć hopfielda na podstawie wzorców oraz przechodzi do interfejsu odtwarzania (Rys. 3.3.).



Rysunek 3.3. Widok odtwarzania zapamiętanego wzorca

Widok odtwarzania zapamiętanych wzorców (Rys. 3.3.) stanowi główny element aplikacji. Pozwala na przetestowanie wytrenowanej sieci.

Panel po lewej stronie zawiera wiele opcji:

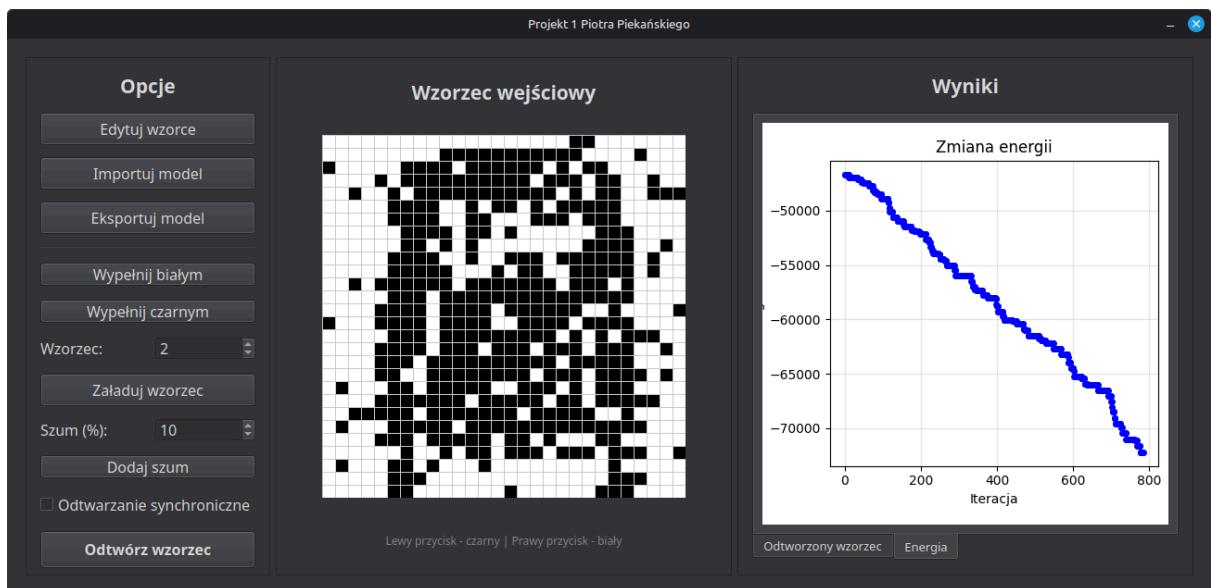
- "Edytuj wzorce" - umożliwia powrót do interfejsu edycji wzorców i ponowne wytrenowanie modelu,
- przyciski do zapisu i odczytu modelu z pliku pickle, jak w menu głównym (Rys. 3.1.),
- przyciski wypełniania białym i czarnym, jak w interfejsie edycji wzorców,
- "Załaduj wzorzec" kopiuje wybrany wzorzec do panelu rysowania,
- "Dodaj szum", odwraca kolor określonej części pikseli w procentach,

- pole wyboru trybu synchronicznego lub asynchronicznego odtwarzania wzorca,
- “Odtwórz wzorzec” uruchamia proces rekonstrukcji dla wzorca wejściowego.

Rysowanie obrazka w środkowym panelu odbywa się identycznie jak w tworzeniu wzorców do modelu.

Rekonstrukcja trwa, dopóki różnica energii w dwóch kolejnych iteracjach nie stanie się bliska零. Jest również górnny limit 100 iteracji. Po zakończeniu, w panelu po prawej ukazuje się odtworzony wzorzec, suwakiem poniżej można spojrzeć na stan obrazka w dowolnej iteracji, lub po każdej zmianie neuronów w przypadku odtwarzania asynchronicznego.

Można również przełączyć się na zakładkę z wykresem energii sieci (Rys. 3.4.)



Rysunek 3.4. Poprzedni widok z włączoną zakładką z funkcją energii

## 4. Symulacje

jakieś tam będą

## 5. Interpretacja wyników

nie widzę tego dobrze