При використанні нейронних мереж прямого розповсюдження, що приймає вхід Х і породжує вихід О, сигнал передається по мережі лише "вперед" - від і-того шару до і+1. Х містить початкові дані, дані оброблюються кожним шаром отримуємо вихід О. Цей процес називається прямим поширенням сигналу.

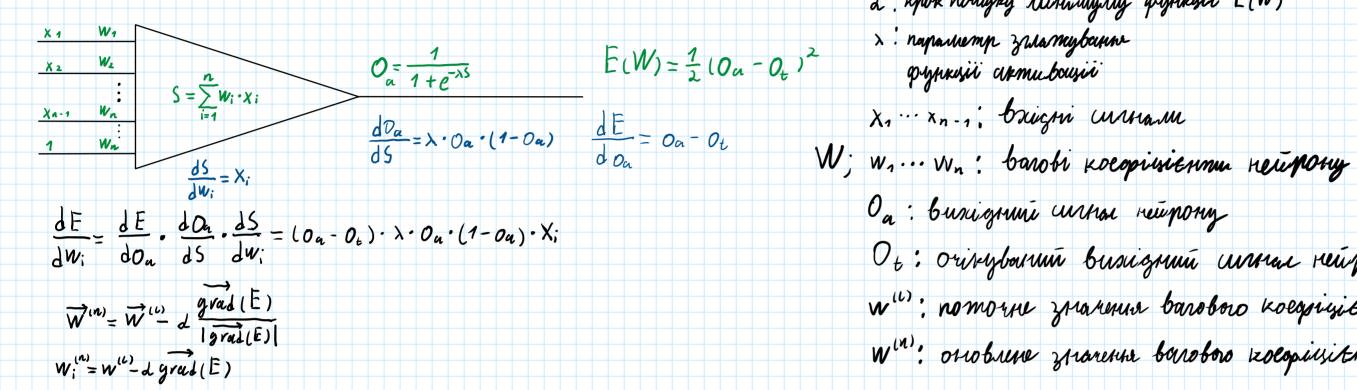
Під час навчання пряме поширення сигналу дозволяє отримати значення функції помилки мережі E(W) (W - вагові коефіцієнти мережі). Алгоритм оберненого поширення обчислює градієнт E(W) для поточних значень коефіцієнтів Wc.

Бібліотеки накшталт TensorFlow розраховують градієнт E(W) будуючи граф обчислення похідних dE/dw функції помилки для кожного вагового коефіцієнту мережі.

В лабораторній роботі було вручну побудовано граф обчислення похідних dE/dw для мережі, що складається з 1 нейрону (частина 1) та для мережі з трьома шарами (частина 3).

На графах зеленим кольором позначено пряме розповсюдження сигналу, синім - обернене розповсюдження сигналу.

Граф обчислення похідних для нейронної мережі, що складається з єдиного нейрону(частина 1):



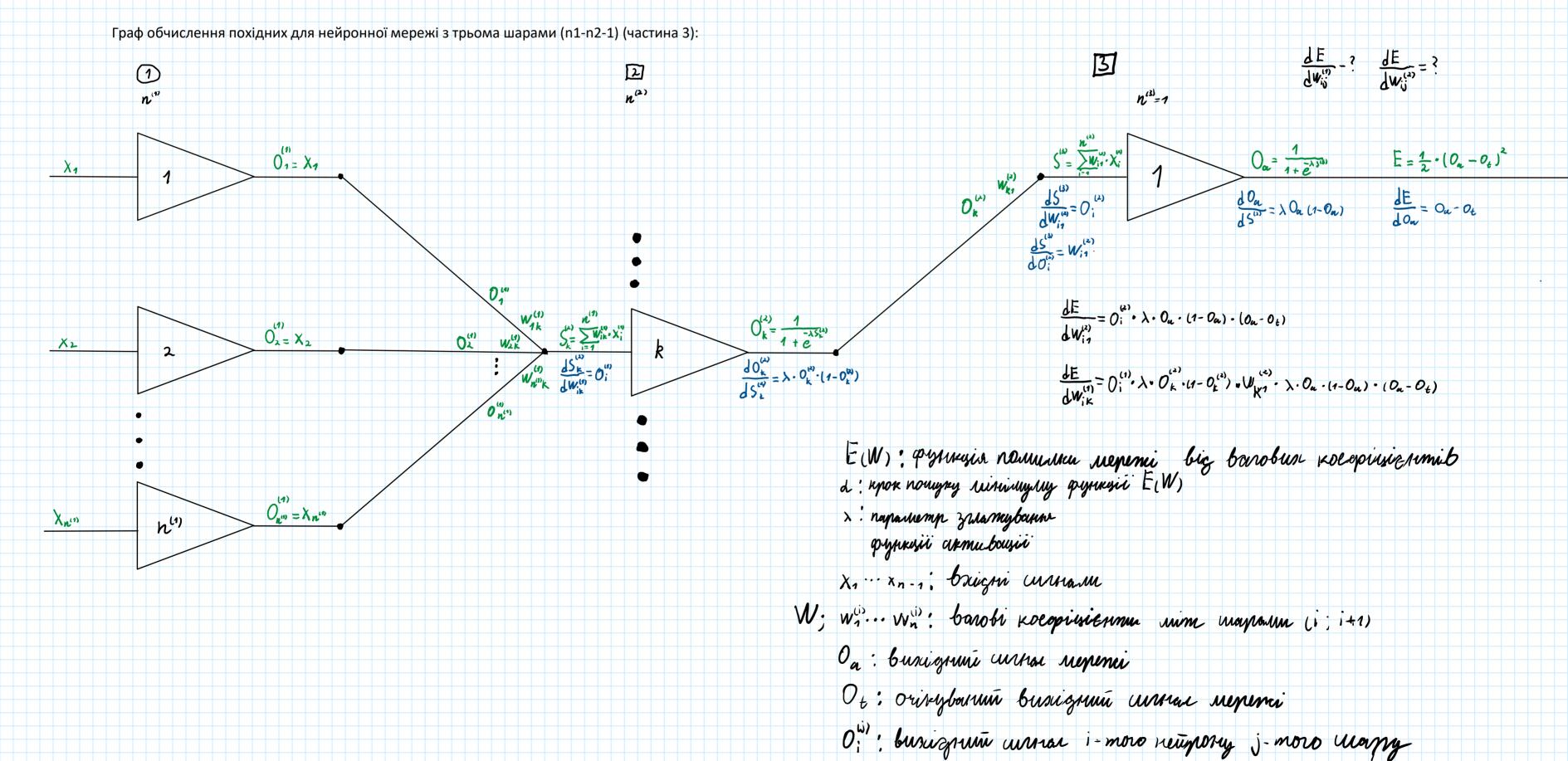
E(W): Promision nomunea reciporas big barobuse polespissionemib
d: kpok noughy rishingry pyrksii E(W)

Oa: busignui curras recipony

Ot: Orivybarun busignun unna renpory

w": nomorne znarema baroboro koeginitumy

W (n): onobrene znarenne baroboro izolopiusitumy



Обчислення, наведені в теоретичних відомостях, було реалізовано мовою С. Також було створено допоміжний скрипт мовою Python для генерації навчальних прикладів.

Посилання на репозиторій (код програм, датасети): https://github.com/Bohdan628318ylypchenko/MLDL-Lab1.git

```
G J:\repos\MLDL\Lab1\x64\Release> .\Neuron.exe
x0 = 0.200000, x1 = 0.700000, x_shift = 1.000000
Iteration 0 | w0 = 0.900000, w1 = 0.100000, w_shift = 0.400000 | ya = 0.657010
Iteration 1 | w0 = 0.908085, w1 = 0.128296, w_shift = 0.440423 | ya = 0.670809
Iteration 2 | w0 = 0.916169, w1 = 0.156592, w_shift = 0.480845 | ya = 0.684319
 teration 3 | w0 = 0.924254, w1 = 0.184887, w_shift = 0.521268 | ya = 0.697525
 teration 4 | w0 = 0.932338, w1 = 0.213183, w_shift = 0.561690 | ya = 0.710412
 teration 5 | w0 = 0.940423, w1 = 0.241479, w_shift = 0.602113 | ya = 0.722968
Iteration 6 | w0 = 0.948507, w1 = 0.269775, w_shift = 0.642536 | ya = 0.735183
Iteration 7 | w0 = 0.956592, w1 = 0.298071, w = 0.682958 | ya = 0.747047
Iteration 8 | w0 = 0.964676, w1 = 0.326367, w_shift = 0.723381 | ya = 0.758555
Iteration 9 | w0 = 0.972761, w1 = 0.354662, w_shift = 0.763803 | ya = 0.769700
Iteration 10 | w0 = 0.980845, w1 = 0.382958, w_shift = 0.804226 | ya = 0.780480
Iteration 11 | w0 = 0.988930, w1 = 0.411254, w_shift = 0.844649 | ya = 0.790892
 teration 12 | w0 = 0.997014, w1 = 0.439550, w_shift = 0.885071 | ya = 0.800937
 teration 13 | w0 = 1.005099, w1 = 0.467846, w_shift = 0.925494 | ya = 0.810614
 teration 14 | w0 = 1.013183, w1 = 0.496142, w_shift = 0.965916 | ya = 0.819927
Iteration 15 | w0 = 1.021268, w1 = 0.524437, w_shift = 1.006339 | ya = 0.828878
Iteration 16 | w0 = 1.029352, w1 = 0.552733, w_shift = 1.046762 | ya = 0.837473
Iteration 17 | w0 = 1.037437, w1 = 0.581029, w_shift = 1.087184 | ya = 0.845716
Iteration 18 | w0 = 1.045521, w1 = 0.609325, w_shift = 1.127607 | ya = 0.853615
 Iteration 19 | w0 = 1.053606, w1 = 0.637621, w_shift = 1.168029 | ya = 0.861175
 teration 20 | w0 = 1.061690, w1 = 0.665916, w_shift = 1.208452 | ya = 0.868405
 teration 21 | w0 = 1.069775, w1 = 0.694212, w_shift = 1.248875 | ya = 0.875313
 teration 22 | w0 = 1.077859, w1 = 0.722508, w_shift = 1.289297 | ya = 0.881908
Iteration 23 | w0 = 1.085944, w1 = 0.750804, w_shift = 1.329720 | ya = 0.888199
Iteration 24 | w0 = 1.094029, w1 = 0.779100, w_shift = 1.370143 | ya = 0.894194
Iteration 25 | w0 = 1.102113, w1 = 0.807396, w_shift = 1.410565 | ya = 0.899905
PS J:\repos\MLDL\Lab1\x64\Release>
```

Навчання мережі-нейрону на єдиному прикладі (х0=0.2, х1=0.7)

Мережа досягла похибки 0.001 за 25 ітерації з параметрами lambda = 1, alpha = 0.05 Остаточні вагові коефіцієнти:

W0 = 1.10213 | W1 = 0.807396 | W\_Shift = 1.410565

Початкові вагові коефіцієнти:

 $W0 = 0.9 \mid W1 = 0.1 \mid W \text{ Shift} = 0.4$ 

```
PS J:\repos\MLDL\Lab1\x64\Release> .\NN231.exe
Usage:
 [n]ew;
 [t]rain a l example-path epoch-count;
 [v]alidate example-path;
 [s]ave path;
 [l]oad path;
 [p]rint;
 [r]un x1 x2;
                  Створення нової мережі
 [u]sage;
 [e]xit;
Command: n
                         Новостворена мережа
Command: p
 = 1.0000; a = 0.1000;
w12:
  |-0.1000<sub>||-</sub>||-0.1000 | 0.1000
  0.1000 | 0.1000 | 0.1000
  0.1000 | 0.1000 | 0.1000
w23:
 0.1000 | 0.1000 | 0.1000 | 0.1000
Command: v examples2.txt
                                 Валідація мережі
oa = 0.564342; ot = 0.174900
                                 Похибка суттєва
oa = 0.565400; ot = 0.751900
error = 0.186447
Command: t 1 4 examples2.txt 100
                              Навчаємо мережу
Command: p
 = 4.0000; a = 1.0000;
w12:
                                     Мережа після навчання
  -0.8983 | -0.8983 | -0.8983
  -0.1581 | -0.1581 | -0.1581
  0.0460 | 0.0460 | 0.0460 |
 -0.7563 | -0.7563 | -0.7563 | 0.5185 |
Command: v examples2.txt
oa = 0.174901; ot = 0.174900
                                 Похибка майже 0
oa = 0.751900; ot = 0.751900
                                 мережа перенавчилась
error = 0.000000
Command: s examples2-learned.nn
Command: e
PS J:\repos\MLDL\Lab1\x64\Release>
```

Навчання мережі 2-3-1 на датасеті examples2.txt (2 приклади).

PS J:\repos\MLDL\Lab1\x64\Release> .\NN231.exe Usage: [n]ew; [t]rain a l example-path epoch-count; [v]alidate example-path; [s]ave path; [l]oad path; [p]rint; [r]un x1 x2; [u]sage; [e]xit; Command: l examples100-trained.nn Command: p = 2.0000; a = 2.0000;w12: 1.1734 | 1.1734 | 1.1734 1.1288 | 1.1288 | 1.1288 -1.2425 | -1.2425 | -1.2425 | w23: | 2.0146 | 2.0146 | 2.0146 | <del>-</del>1.2944 | Command: v examples1000.txt

oa = 0.785319; ot = 0.747400 oa = 0.239995; ot = 0.209300 oa = 0.898389; ot = 0.888300 oa = 0.768722; ot = 0.728700 oa = 0.847976; ot = 0.818000 oa = 0.625345; ot = 0.619600 oa = 0.890756; ot = 0.868000 error = 0.709704 average\_error = 0.000710

average evrov =  $\left(\frac{\sum_{i=1}^{e \times ample_count}}{(O_a - O_e)^2}\right) / e \times ample_count$ 

Валідація мережі 2-3-1, навченої на датасеті examples100.txt, на датасеті examples1000.txt (1000 прикладів, жоден не був присутній у навчальній вибірці)

PS J:\repos\MLDL\Lab1\x64\Release> .\NN231.exe [t]rain a I example-path epoch-count; [v]alidate example-path; [s]ave path [I]oad path [r]un x1 x2; [u]sage; Command: n Command: p I = 1.0000; a = 0.1000; | 0.1000 | 0.1000 | 0.1000 | | 0.1000 | 0.1000 | 0.1000 | 0.1000 | 0.1000 | 0.1000 | | 0.1000 | 0.1000 | 0.1000 | 0.1000 | Command: t 2 2 examples100.txt 5000 Command: v examples2.txt Banigarie Mepeni Ha oa = 0.224212; ot = 0.174900 examples 2. txt (He brogemb oa = 0.791838; ot = 0.751900 error = 0.0040276 rebraibley businey) Command: v examples100.txt oa = 0.255825; ot = 0.241600 oa = 0.698727; ot = 0.681800 oa = 0.937071; ot = 0.966300 oa = 0.825084; ot = 0.785100 oa = 0.339915: ot = 0.358300 oa = 0.895158; ot = 0.905100 oa = 0.428279; ot = 0.450500 oa = 0.852852; ot = 0.826800 oa = 0.573037; ot = 0.565800 oa = 0.933016; ot = 0.959400 oa = 0.364517; ot = 0.385500 oa = 0.417787; ot = 0.432100 oa = 0.276596; ot = 0.266600 oa = 0.840169; ot = 0.805900 oa = 0.920098; ot = 0.938500 oa = 0.751951: ot = 0.710900 oa = 0.833323; ot = 0.801000 oa = 0.808864; ot = 0.789700 oa = 0.940257; ot = 0.972200 oa = 0.629626; ot = 0.631900 oa = 0.564007; ot = 0.560400 oa = 0.838031; ot = 0.796000 oa = 0.701951; ot = 0.671500 oa = 0.923312; ot = 0.933200 oa = 0.746713; ot = 0.715800 oa = 0.542394; ot = 0.547700 oa = 0.924862; ot = 0.941000 oa = 0.884941; ot = 0.884200 oa = 0.838833; ot = 0.812600 oa = 0.893520; ot = 0.870500 oa = 0.930405; ot = 0.949200 oa = 0.645329; ot = 0.636800 oa = 0.812338; ot = 0.785900 oa = 0.820195; ot = 0.777900 oa = 0.255152; ot = 0.235200 oa = 0.853108; ot = 0.844200 oa = 0.369517; ot = 0.385300 oa = 0.453891; ot = 0.473700 oa = 0.558886; ot = 0.571100 oa = 0.288356; ot = 0.290300 oa = 0.605635; ot = 0.611700 oa = 0.646359; ot = 0.624300 oa = 0.489536; ot = 0.513500 oa = 0.408918; ot = 0.424500 oa = 0.941663; ot = 0.970200 oa = 0.866503; ot = 0.845700 oa = 0.790077; ot = 0.761200 oa = 0.726966; ot = 0.705800 oa = 0.255762; ot = 0.239000 oa = 0.351962; ot = 0.370900 oa = 0.823048; ot = 0.808400 oa = 0.837929; ot = 0.813700 oa = 0.484255; ot = 0.509100 oa = 0.478233; ot = 0.503000 oa = 0.554537; ot = 0.553600 oa = 0.909155; ot = 0.922700 oa = 0.422471; ot = 0.441700 oa = 0.489384; ot = 0.507600 oa = 0.585302; ot = 0.583900 oa = 0.416572; ot = 0.436200 oa = 0.943739; ot = 0.997600 oa = 0.658655; ot = 0.650000 oa = 0.818678; ot = 0.778000 oa = 0.917606; ot = 0.911000 oa = 0.944328; ot = 0.983400 oa = 0.196579; ot = 0.114700 oa = 0.777249; ot = 0.737100 oa = 0.470080; ot = 0.492100 oa = 0.609126; ot = 0.604500 0.902361: ot = 0.902400 oa = 0.478039; ot = 0.489500 oa = 0.885459; ot = 0.880100 oa = 0.678544; ot = 0.662000 oa = 0.476832; ot = 0.488600 oa = 0.720659; ot = 0.694400 oa = 0.278224; ot = 0.278900 oa = 0.796841; ot = 0.773200 oa = 0.396525; ot = 0.412200 oa = 0.400869; ot = 0.431600 oa = 0.662659; ot = 0.645800 oa = 0.868025; ot = 0.859200 oa = 0.937996; ot = 0.978400 oa = 0.816928; ot = 0.780000 oa = 0.253956; ot = 0.236400 oa = 0.164920; ot = 0.018200 oa = 0.670622: ot = 0.650900 oa = 0.479737; ot = 0.497900 oa = 0.923031; ot = 0.945800 oa = 0.824475; ot = 0.808300 oa = 0.827163; ot = 0.796600 - Ballgayie Ha oa = 0.644453; ot = 0.623600 nobralblica oa = 0.916554; ot = 0.919900 budipyi oa = 0.559305; ot = 0.568500 oa = 0.300073; ot = 0.305600 oa = 0.557101; ot = 0.553000 oa = 0.935792; ot = 0.981100 oa = 0.914030; ot = 0.924300 oa = 0.757533; ot = 0.740500 oa = 0.948061; ot = 0.996600 Habrery Merenca error = 0.081400 \_\_\_\_ Command: p I = 2.0000; a = 2.0000; | 1.1734 | 1.1734 | 1.1734 | | 1.1288 | 1.1288 | 1.1288 | | -1.2425 | -1.2425 | -1.2425 | | 2.0146 | 2.0146 | 2.0146 | -1.2944 | Command: s examples100-trained.nn Command: e PS J:\repos\MLDL\Lab1\x64\Release>

Навчання мережі 2-3-1 на датасеті examples100.txt (100 прикладів)