

Slovenská technická univerzita

Fakulta informatiky a informačných technológií

Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava



Zadanie č.2

Neurónové siete

Zadanie

Zadanie č.2 by spočívalo vo vytvorení programu, ktorý by umožňoval tréning doprednej neurónovej siete na základe interaktivity s používateľom. V hlavnom okne aplikácie by bolo k dispozícii kresliace okno s pevným rozlíšením (napr. 20x20 bodov) a nástroje na priradenie identifikátora k nakreslenému obrazcu (napr. písmeno, alebo číslo, samozrejme implementačne by to bolo binárne zakódované) a nástroje na ovládanie tréningu siete. Užívateľ by mal k dispozícii preddefinovanú množinu znakov anglickej abecedy (napr. všetky veľké písmená), na základe ktorých by mohol vytvárať vstupnú množinu vzorov pre neurónovú sieť. Písmená by sa dali otáčať o 2°, 5° a 10° a posúvať v mriežke o 2px, 5px, či 10px v ľubovoľnom smere. K dispozícii by bola funkcia, ktorá by umožňovala vstupný znak poškodiť na základe zmeny farieb niektorých náhodne vybratých bodov. Užívateľ by mohol definovať parametre tréningu siete (rýchlosť učenia, momentum, počet skrytých neurónov, počet epoch). Cieľom by bolo porovnanie štatistickej úspešnosti klasifikácie vzorov pri otáčaní, posúvaní, či poškodzovaní vstupných vzorov.

Tréning siete by bolo realizované algoritmom error back-propagation. Sieť by sa dokázala naučiť viacero znakov a rozpoznávala by ich. Dopredná neurónová sieť by bola realizovaná vrstvou vstupných neurónov (na ktoré by boli mapované priamo pixely z kresliaceho poľa a ich počet by závisel od rozlíšenia kresliaceho poľa), vrstvou skrytých neurónov (ktorých počet by bolo možné programovo meniť) a vrstvou výstupných neurónov, ktorých počet by závisel od počtu definovaných identifikátorov k nakresleným obrazcom.

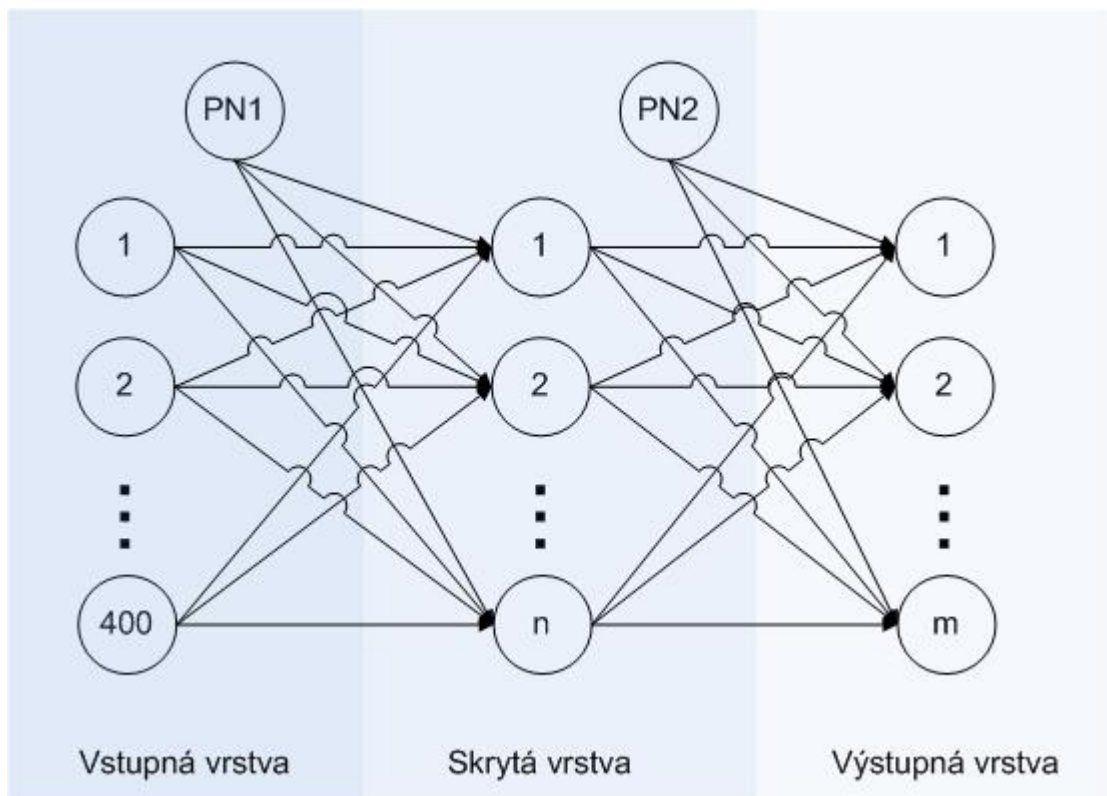
Program by umožňoval tak textové štatistické, ako aj grafické vyhodnotenie úspešnosti klasifikácie vzorov a porovnávanie medzi rôznymi experimentmi. Študent vykoná a zdokumentuje experimenty skúmajúce vplyv posuvu a otočenia písmen na schopnosť ich rozpoznávania.

Riešenie

Riešením zadania bude dopredná neurónová sieť pozostávajúca zo 400 vstupných neurónov (vzhľadom na priame mapovanie vstupného kresliaceho poľa s rozmermi 20x20 bodov), variabilného počtu skrytých neurónov, prahových neurónov na vstupnej a skrytej vrstve a variabilného počtu výstupných neurónov. Počet skrytých neurónov je konfigurovateľný prostredníctvom rozhrania aplikácie. Počet výstupných neurónov závisí od počtu tréningových vzorov. Ak je počet tréningových vzorov x , tak počet výstupných neurónov m získame na základe vzťahu

$$m = \log_2 x$$

pričom ak číslo m nie je celé číslo, tak je potrebné ho zaokrúhliť na najbližšie väčšie celé číslo. Topológia použitej doprednej neurónovej siete je znázornená na obr. 1.



Obr.1 – topológia použitej doprednej neurónovej siete

Na vstupy takto zhotovenej siete budú privedené testovacie vzorky v náhodnom poradí (v rámci konkrétnej tréningovej epochy). Sieť bude trénovaná algoritmom spätnej propagácie chyby (*error back-propagation*). Stav neurónovej siete je po ukončení tréningovania možné overiť testovaním. Testovanie využíva samostatnú množinu testovacích vzorov, ktoré budú privedené na vstupy neurónovej siete a sieť určí o ktorú tréningovaciu vzorku sa jedná (ak je to možné zistiť), ako aj presnosť tohto určenia v percentách (*hit rate*)

Tréningové vzory

Tréningové vzory je možné načítať zo súboru prostredníctvom užívateľského rozhrania programu. Tieto tréningové vzory sú zakódované ako binárne mapy s rozmermi 20x20 znakov, pričom znak 0 reprezentuje logickú nulu (tento bod bude vykreslený ako biely) a znak 1 reprezentuje logickú jednotku (tento bod bude vykreslený ako čierny). Pri načítaní sú tieto tréningové vzory (tvorené veľkými tlačnými písmenkami a číslicami anglickej abecedy) načítané do vhodnej dátovej štruktúry a v prípade potreby sú vykreslené do kresliaceho poľa.

Prostredníctvom užívateľského rozhrania je možné s načítanými tréningovými vzormi realizovať viaceré operácie :

- Rotácia (*Rotate*) – otočí tréningový vzor o definovaný počet stupňov v smere hodinových ručičiek

- Posunutie (*Move*) – posunie trérovací vzor o definovaný počet pixelov (bodov kresliaceho poľa) v definovanom smere (vpravo, vľavo, hore, dole)
- Poškodenie (*Distort*) – poškodí trérovací vzor na základe percentuálneho vyjadrenia požadovaného poškodenia. Toto poškodenie náhodne zmení farbu vybraného počtu bodov kresliaceho poľa (častí trérovacieho vzoru)

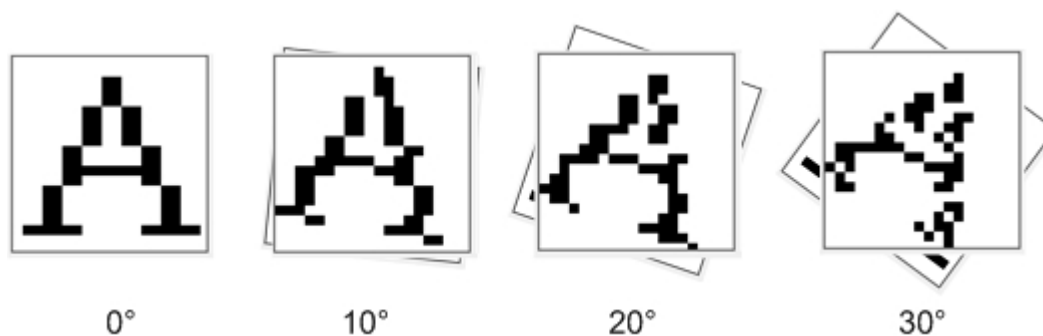
Všetky tieto operácie sú realizované algoritmicky a nie použitím existujúcich metód komponentov vývojového prostredia, preto v nasledujúcej časti uvádzam stručný popis týchto operácií.

Rotácia je realizovaná tak, že vstupný uhol rotácie sa prevedie na radiány a následne sa pre každý bod kresliaceho poľa (časti trérovacieho vzoru) vypočítajú nové súradnice podľa nasledujúcich pravidiel

$$\text{new_x} = \cos(\text{uhol}) * (\text{old_x} - \text{middle_x}) + \sin(\text{uhol}) * (\text{old_y} - \text{middle_y}) + \text{middle_x}$$

$$\text{new_y} = \sin(\text{uhol}) * (\text{old_x} - \text{middle_x}) + \cos(\text{uhol}) * (\text{old_y} - \text{middle_y}) + \text{middle_y}$$

kde old_x je stará x-ová súradnica, old_y je stará y-ová súradnica, middle_x je x-ová súradnica stredu a middle_y je y-ová súradnica stredu, new_x je nová x-ová súradnica a new_y je nová y-ová súradnica. Je potrebné dodať, že takáto transformácia súradníc vedie k deformácii vstupného vzoru, ktorá narastá s počtom transformácií vykonaných za sebou. Toto je zapríčinené diskretným vykresľovacím priestorom v ktorom dochádza k rotácii a taktiež faktom, že počas rotácie dochádza ka zahadzovaniu niektorých častí trérovacieho vzoru (rohy), nakoľko tieto už nie je možné vykresliť do kresliaceho poľa. Situácia je znázornená na obr.2.



Obr.2 – Vplyv rotácie na deformáciu vstupného vzoru

Posunutie je realizované zvolením smeru posunutia (vpravo, vľavo, hore, dole) a počtom pixelov o koľko sa bude trérovací vzor v danom smere posúvať. Samotné posunutie je potom docielené nasledovne:

Ak smer posunutia je vpravo, tak $\text{new_x} = \text{old_x} + \text{posunutie}$

Ak smer posunutia je vľavo, tak $\text{new_x} = \text{old_x} - \text{posunutie}$

Ak smer posunutia je dole, tak $\text{new_y} = \text{old_y} + \text{posunutie}$

Ak smer posunutia je hore, tak $\text{new_y} = \text{old_y} - \text{posunutie}$

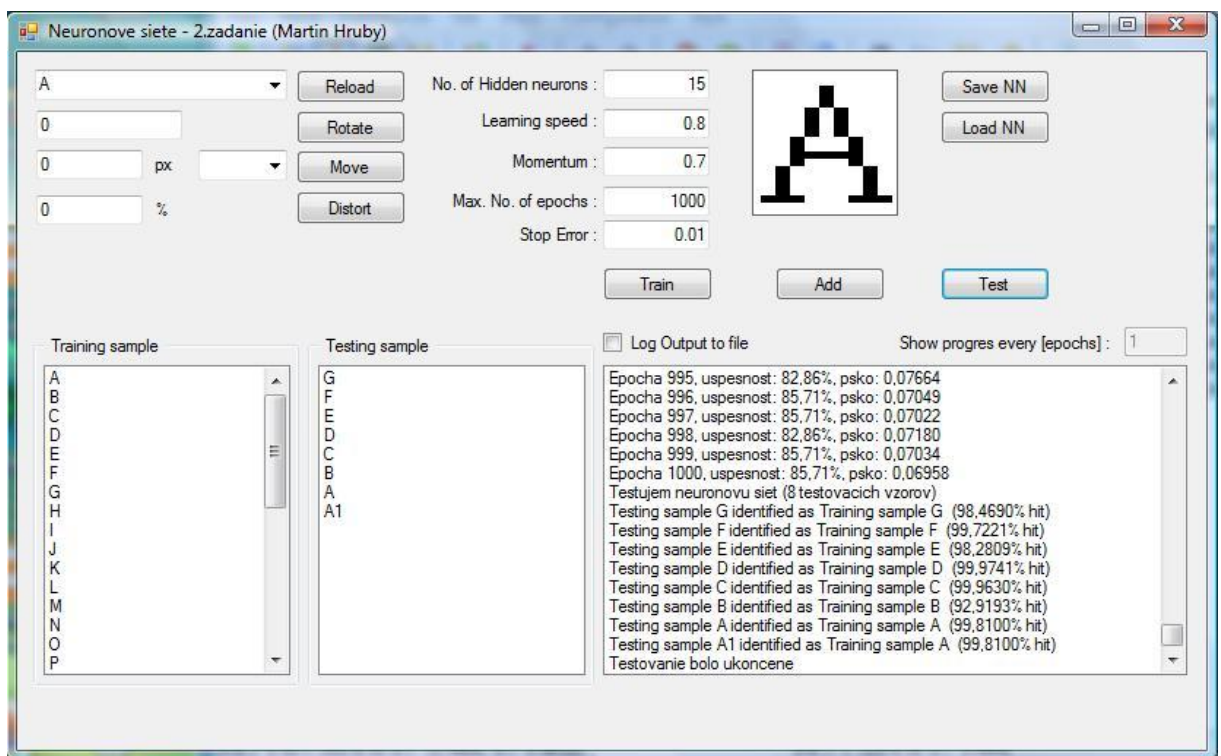
Počas posúvania sa podobne ako pri rotácii časti trérovacieho vzoru, ktoré sa posunutím dostanú mimo rozsah kresliaceho poľa nenávratne strácajú.

Poškodenie je realizované náhodnou zmenou niektorých bodov trérovacieho vzoru, na základe percentuálnej miery poškodenia vzoru, ktorú definuje používateľ (1 až 100%). Nech percentuálna miera poškodenia je x . Potom poškodením sa n bodom trérovacieho vzoru nastavi náhodná farba (čierna, alebo biela, teda je možné že niektoré body aj tak ostanú nezmenené). Počet poškodených bodov sa určí nasledovne :

$$n = 400 * (x/100)$$

Implementácia

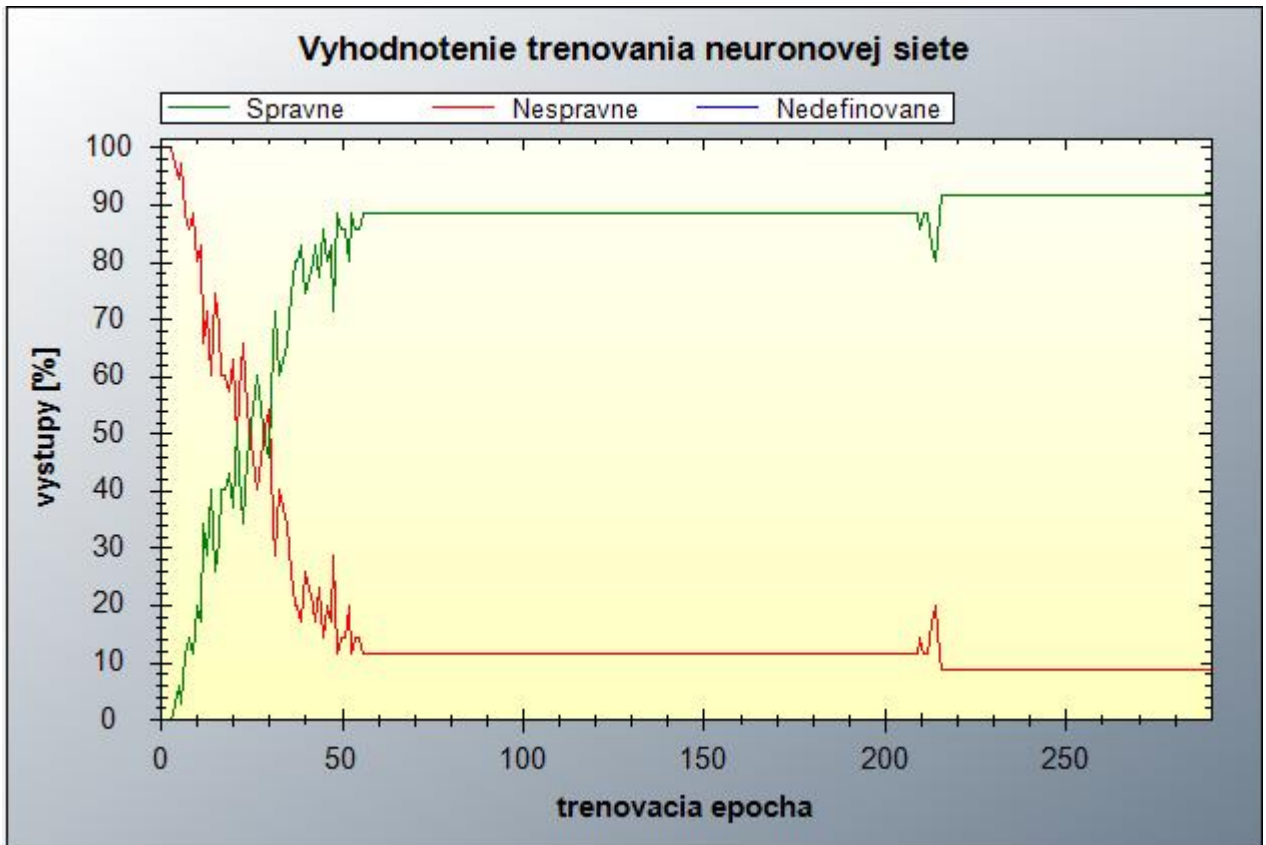
Program vykonávajúci úlohu stanovenú v zadaní je vypracovaný vo vývojovom prostredí MS Visual Studio 2008 v jazyku C#. Aplikácia využíva aplikačný rámec .NET 2.0 Framework. Na obr.3 je znázornené hlavné okno aplikácie.



Obr.3 – Uživateľské rozhranie aplikácie

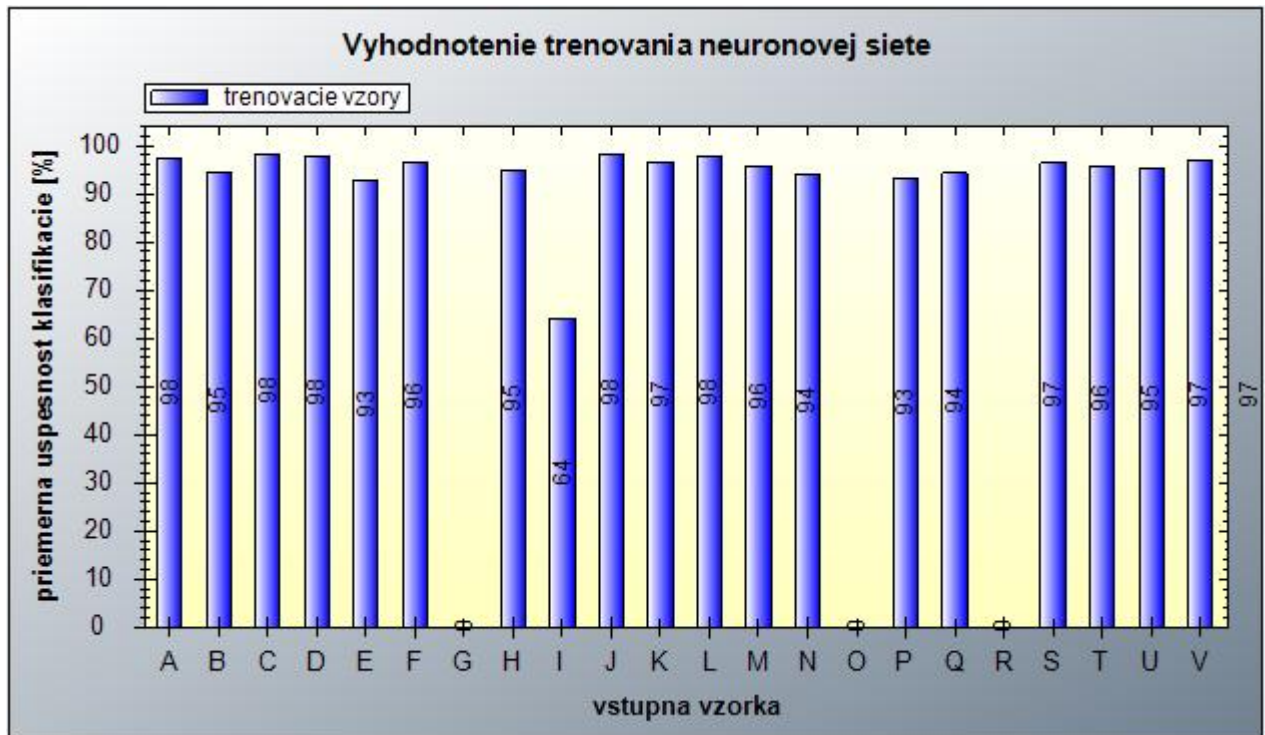
Po ukončení trérovania je možné neurónovú sieť v naučenom stave uložiť do externého súboru. Toto je docielené serializáciou objektov, ktoré aplikácia využíva na opisanie siete (objekty tried: neuróny, spojenia, neurónova sieť). Takisto je možné načítať už naučenú sieť zo súboru, prostredníctvom deserializácie.

Po ukončení trérovania siete sa zobrazí grafický priebeh trérovania siete, v ktorom je znázornený počet správne a nesprávne rozpoznávaných trérovacích vzorov, viď obr.4.



Obr.4 – grafický priebeh tréovania neurónovej siete

Takisto je vyhodnotená percentuálna úspešnosť klasifikácie tréovacích vzorov počas celej doby tréovania, vid'. obr.5.



Obr.5 – grafické znázornenie percentuálnej úspešnosti klasifikácie tréovacích vzorov

Grafické vyhodnocovanie je realizované prostredníctvom C# knižnice ZedGraph. ZedGraph je open-source a je k dispozícii na stránke <http://www.sourceforge.net> (resp. <http://zedgraph.org>).

Experimentálne overenie riešenia

Pred trénovaním neurónovej siete je možné nastaviť parametre trénovanie siete – momentum, rýchlosť učenia, počet trénovacích epoch a počet skrytých neurónov. Experimentálnym testovaním bolo zistené, že je zdĺhavé (resp. takmer nemožné) natrénovať neurónovú sieť do takej miery, aby dokázala spoľahlivo identifikovať všetky testovacie vzory (neberieme do úvahy rotáciu, posunutie, či poškodenie týchto vzoriek). Experimentálne bolo zistené, že ideálne hodnoty momentum a rýchlosti učenia sú :

- Momentum = 0.7
- Rýchlosť učenia = 0.8

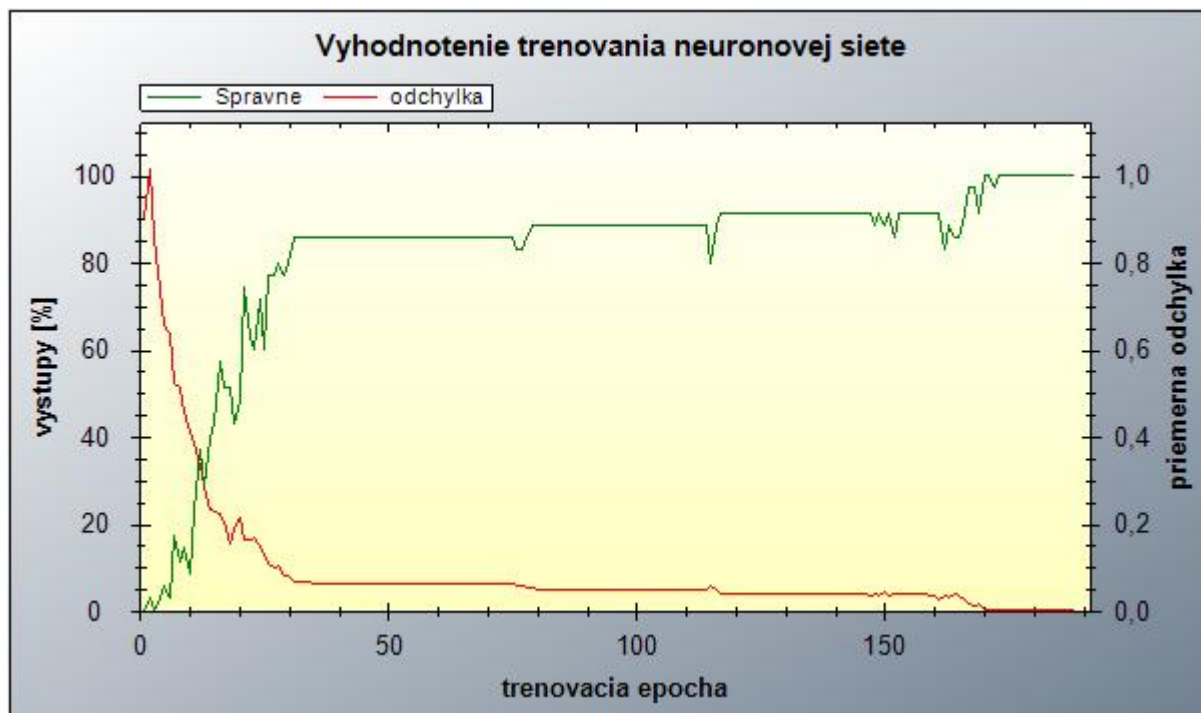
Ideálny počet neurónov závisí od rozsahu trénovacej množiny vzorov. Pri použití celej trénovacej množiny vzorov boli dosiahnuté najlepšie výsledky s počtom skrytých neurónov od 17 do 27. Napriek tomu sa nie vždy podarilo dosiahnuť 100% úspešnosť klasifikácie testovacích vzorov počas trénovanie siete, nakoľko toto vo veľkej miere závisí od rozloženia váh spojení medzi jednotlivými neurónmi siete. Pri 25 skrytých neurónoch sa nám podarilo natrénovať neurónovú sieť so 100% úspešnosťou klasifikácie trénovacích vzorov po 173 trénovacích epochách, vid'. obr.6 a obr.7.

The screenshot displays the graphical user interface of a neural network training application. The interface is organized into several sections:

- Control Panel (Top Left):** Includes a 'Reload' button, a 'Rotate' button, a 'Move' button, and a 'Distort' button, each with a corresponding 'all' button. There are also input fields for 'px' and '%'. A 'Train' button is highlighted in blue.
- Parameters (Top Right):** A list of adjustable parameters: 'No. of Hidden neurons' (25), 'Learning speed' (0.8), 'Momentum' (0.7), 'Max. No. of epochs' (400), and 'Stop Error' (0.001). 'Save NN' and 'Load NN' buttons are also present.
- Training Progress (Bottom Right):** A log window showing the following data:

```
Epoch 164, uspesnost: 85,71%, psko: 0.03770
Epoch 165, uspesnost: 85,71%, psko: 0.03366
Epoch 166, uspesnost: 91,43%, psko: 0.02528
Epoch 167, uspesnost: 97,14%, psko: 0.01529
Epoch 168, uspesnost: 97,14%, psko: 0.01067
Epoch 169, uspesnost: 91,43%, psko: 0.01638
Epoch 170, uspesnost: 100,00%, psko: 0.00263
Epoch 171, uspesnost: 100,00%, psko: 0.00246
Epoch 172, uspesnost: 97,14%, psko: 0.00349
Epoch 173, uspesnost: 100,00%, psko: 0.00165
Epoch 174, uspesnost: 100,00%, psko: 0.00153
Epoch 175, uspesnost: 100,00%, psko: 0.00151
Epoch 176, uspesnost: 100,00%, psko: 0.00147
Epoch 177, uspesnost: 100,00%, psko: 0.00141
Epoch 178, uspesnost: 100,00%, psko: 0.00126
Epoch 179, uspesnost: 100,00%, psko: 0.00127
```
- Sample Lists (Bottom Left):** Two lists labeled 'Training sample' and 'Testing sample'. The 'Training sample' list contains letters A through P.

Obr. 6 – Neurónová sieť so 100% úspešnosťou klasifikácie vzorov



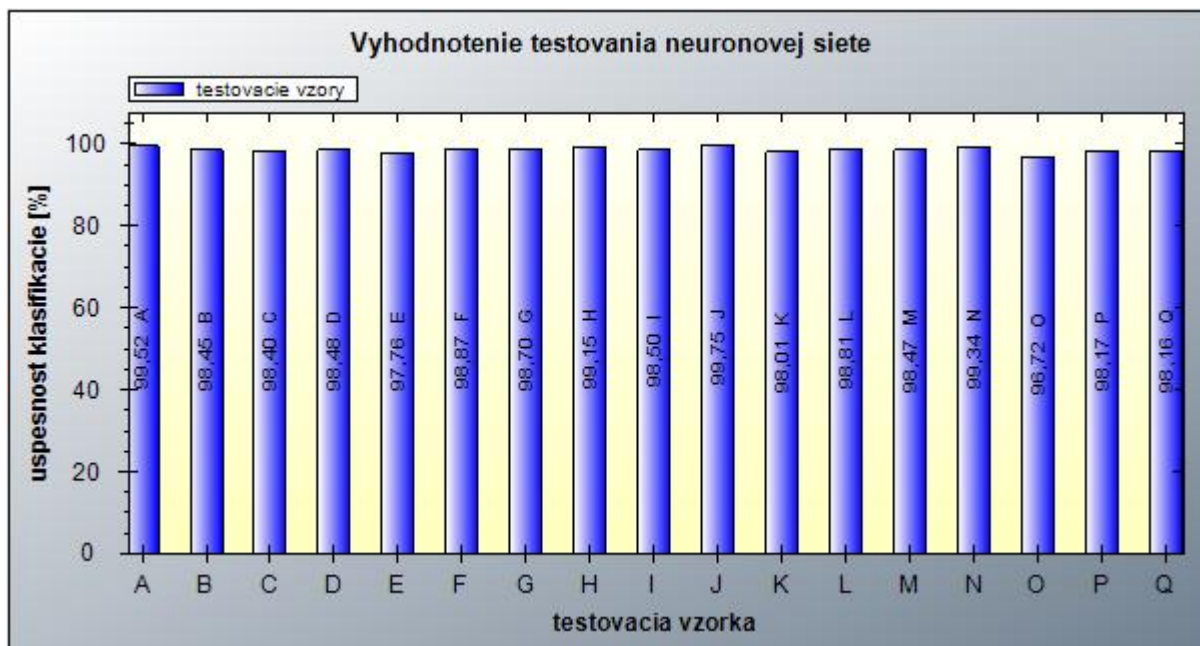
Obr.7 – Vyhodnotenie tréovania neurónovej siete

Túto neurónovú sieť preto použijeme v nasledujúcich experimentoch.

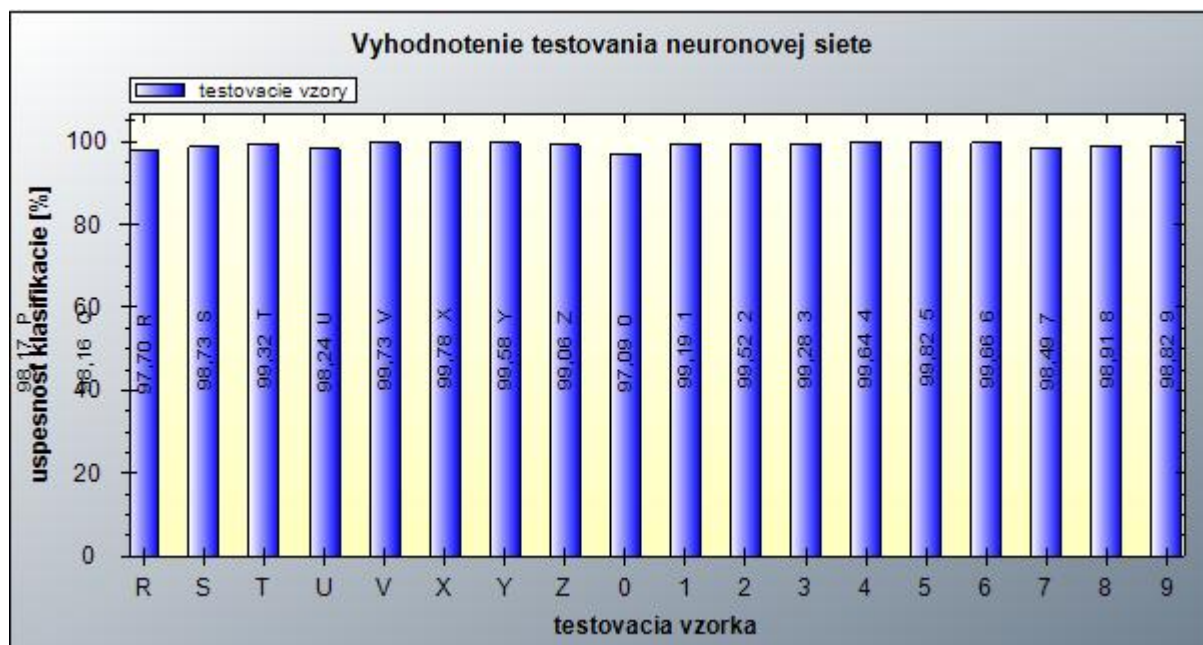
Pri overovaní testovacieho vzoru neurónová sieť klasifikuje tento vzor s určitou pravdepodobnosť, ktorú označíme „hit rate“. Táto hodnota sa určí ako priemer rozdielov skutočných výstupných hodnôt všetkých výstupných neurónov neurónovej siete a logických hodnôt reprezentujúcich vektor ktorý zodpovedá identifikovanej vzorke. Hit rate je vyčíslený v percentách a predstavuje odchýlku od vzoru ktorý sa podarilo identifikovať. Neurónová sieť však nevie, či bol testovací vzor klasifikovaný úspešne, keďže množina tréovacích vzorov a množina testovacích vzorov sú navzájom disjunktné.

Experiment 1

Tento experiment bude spočívať v identifikácii nepoškodenej testovacej množiny vzorov, ktorá je obsahovo zhodná s tréovacou množinou vzorov (testovacie vzory nie sú otočené, posunuté ani poškodené). Keďže neurónová sieť pri skončení tréovania vykozovala 100% úspešnosť klasifikácie tréovacích vzorov, predpokladáme, že všetky testovacie vzory budú korektne identifikované. Výsledok testovania je na nasledujúcej strane (obr.8 a obr.9).



Obr.8 – Vyhodnotenie experimentu 1 : písmená A - Q



Obr.9 – Vyhodnotenie experimentu 1 : písmená R - 9

Neurónová sieť úspešne klasifikovala všetky testovacie vzory. V nasledujúcej tabuľke (tabuľka č.1) je uvedené poradie testovacích vzorov zoradené podľa hit rate.

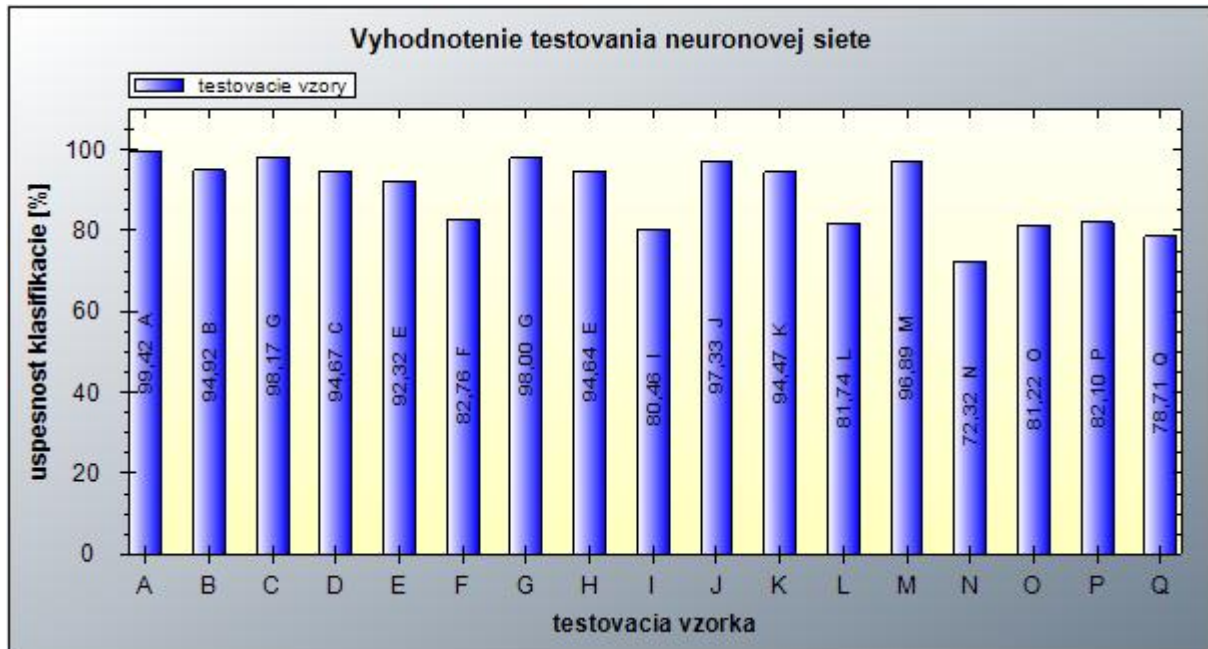
| Testovací vzor | Hit rate | Trénovací vzor |
|----------------|------------------|----------------|
| 5 | 99.8156319567202 | 5 |
| X | 99.782080734774 | X |
| J | 99.751738282852 | J |
| V | 99.7251976957165 | V |
| 6 | 99.6575405512611 | 6 |
| 4 | 99.6386605027056 | 4 |
| Y | 99.5807195302058 | Y |
| A | 99.5243718107705 | A |
| 2 | 99.5216728629021 | 2 |
| N | 99.3421006738177 | N |
| T | 99.3234272244664 | T |
| 3 | 99.2792987887337 | 3 |
| 1 | 99.1937765398561 | 1 |
| H | 99.1503906721302 | H |
| Z | 99.0577540747537 | Z |
| 8 | 98.9081473621614 | 8 |
| F | 98.8726603136512 | F |
| 9 | 98.8241928487339 | 9 |
| L | 98.8077785982302 | L |
| S | 98.7292439110163 | S |
| G | 98.7047246701847 | G |
| I | 98.4964689280262 | I |
| 7 | 98.4892836394747 | 7 |
| D | 98.4829690567741 | D |
| M | 98.4688609066347 | M |
| B | 98.4452731025364 | B |
| C | 98.4026993951962 | C |
| U | 98.2383398630475 | U |
| P | 98.1690559410207 | P |
| Q | 98.1645130239037 | Q |
| K | 98.0124662030652 | K |
| E | 97.7553499295027 | E |
| R | 97.69528010223 | R |
| 0 | 97.0946681326751 | 0 |
| O | 96.7176520448414 | O |

Tabuľka 1 – výsledok experimentu 1

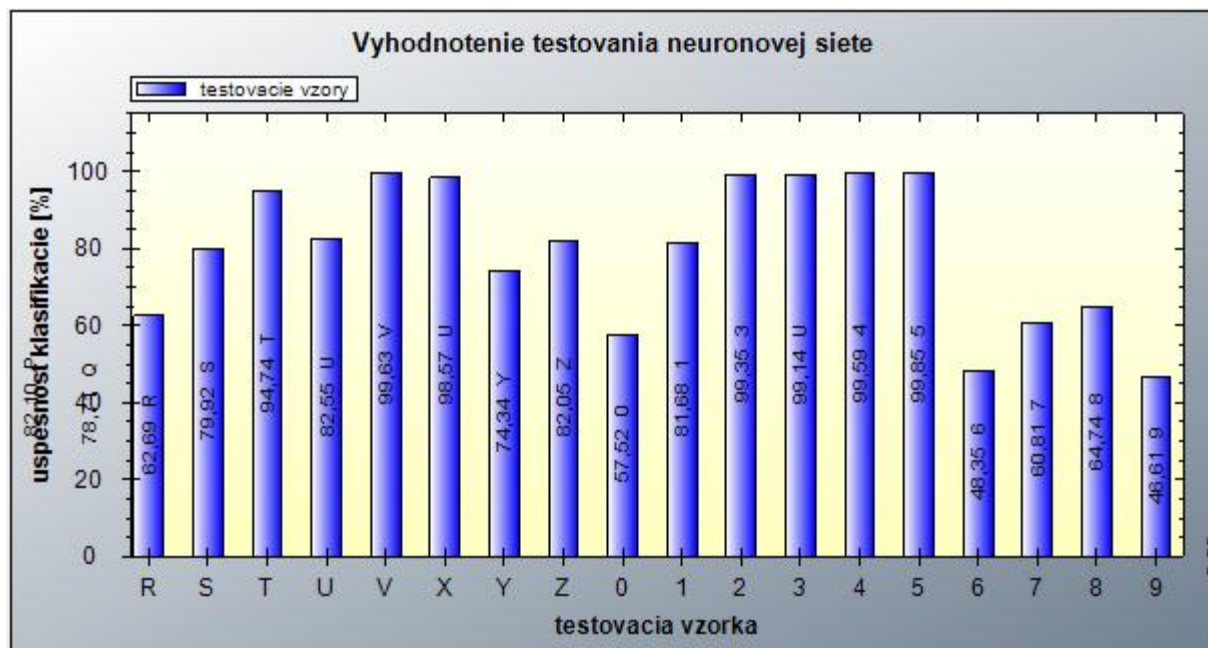
Neurónová sieť v tomto experimente správne klasifikovala 35 testovacích vzorov z celkového počtu 35. Úspešnosť klasifikácie je 100 %.

Experiment 2

V tomto experimente použijeme rovnakú (rovnako natréňovanú) neurónovú sieť ako v predošlom experimente. Testovaciu množinu vzorov však upravíme tak, že všetky testovacie vzory otočíme o 2°. Výsledky experimentu sú znázornené na obr.10, obr.11 a v tabuľke 2.



Obr.10 – Vyhodnotenie experimentu 2 : písmená A – Q



Obr.11 – Vyhodnotenie experimentu 2 : písmená R – 9

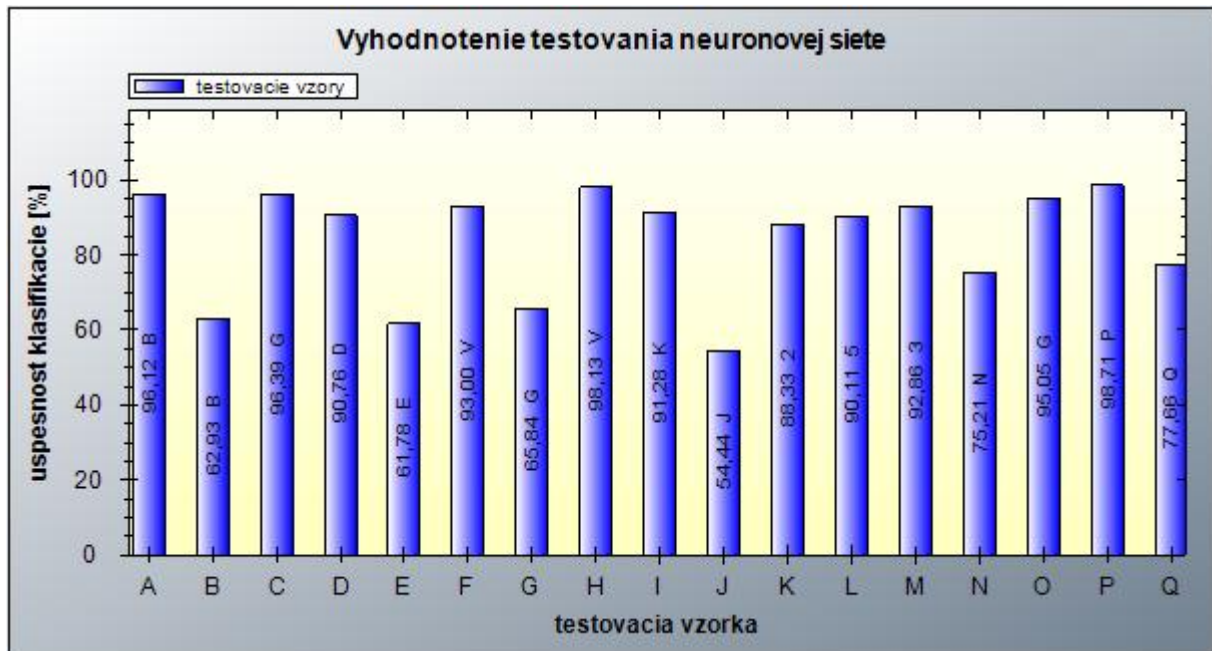
| Testovací vzor | Hit rate | Trénovací vzor |
|----------------|------------------|----------------|
| 5 | 99.8485762350638 | 5 |
| V | 99.6283696927788 | V |
| 4 | 99.5940225726254 | 4 |
| A | 99.4242400820303 | A |
| 2 | 99.353329227438 | 3 |
| 3 | 99.1397701335328 | U |
| X | 98.569135683152 | U |
| C | 98.1704656976932 | G |
| G | 97.9958657858344 | G |
| J | 97.3272365173037 | J |
| M | 96.8941942251011 | M |
| B | 94.9153469908066 | B |
| T | 94.7442591353166 | T |
| D | 94.6748929477417 | C |
| H | 94.6354621809666 | E |
| K | 94.474097117594 | K |
| E | 92.3162064642524 | E |
| F | 82.7563157946265 | F |
| U | 82.5463792341836 | U |
| P | 82.0960976435067 | P |
| Z | 82.0507610541435 | Z |
| L | 81.742654641097 | L |
| 1 | 81.681469982242 | 1 |
| O | 81.220555115552 | O |
| I | 80.4554177866883 | I |
| S | 79.9230542374619 | S |
| Q | 78.7135659226496 | Q |
| Y | 74.3366105615767 | Y |
| N | 72.3168325885071 | N |
| 8 | 64.7428630539324 | 8 |
| R | 62.6945026070812 | R |
| 7 | 60.8126910430725 | 7 |
| 0 | 57.5181388724829 | 0 |
| 6 | 48.3530231531397 | 6 |
| 9 | 46.6074343526504 | 9 |

Tabuľka 2 – výsledok experimentu 2

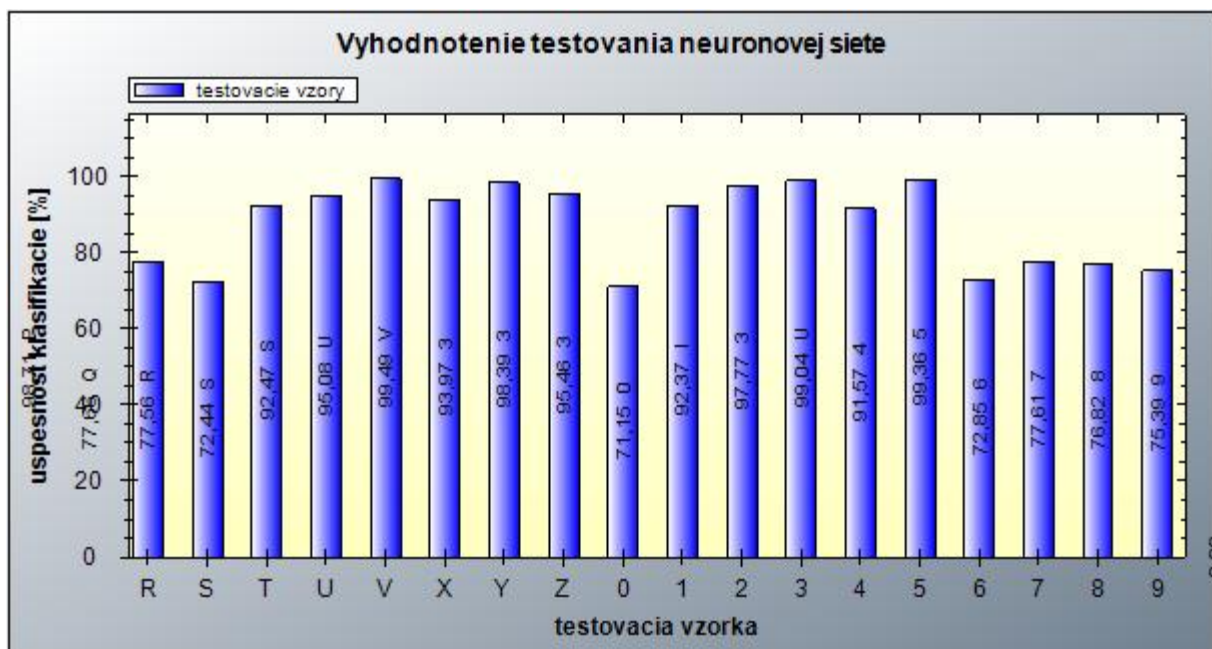
Neurónová sieť v tomto experimente správne klasifikovala 29 testovacích vzorov z celkového počtu 35. Úspešnosť klasifikácie je 82,85%.

Experiment 3

V tomto experimente použijeme rovnakú (rovnako natréňovanú) neurónovú sieť ako v predošlom experimente. Testovaciu množinu vzorov však upravíme tak, že všetky testovacie vzory otočíme o 10°, nakoľko pri otočení o 5° boli výsledky takmer identické s výsledkami experimentu 2. Výsledky experimentu sú znázornené na obr.12, obr.13 a v tabuľke 3.



Obr.12 – Vyhodnotenie experimentu 3 : písmená A – Q



Obr.13 – Vyhodnotenie experimentu 3 : písmená A – Q

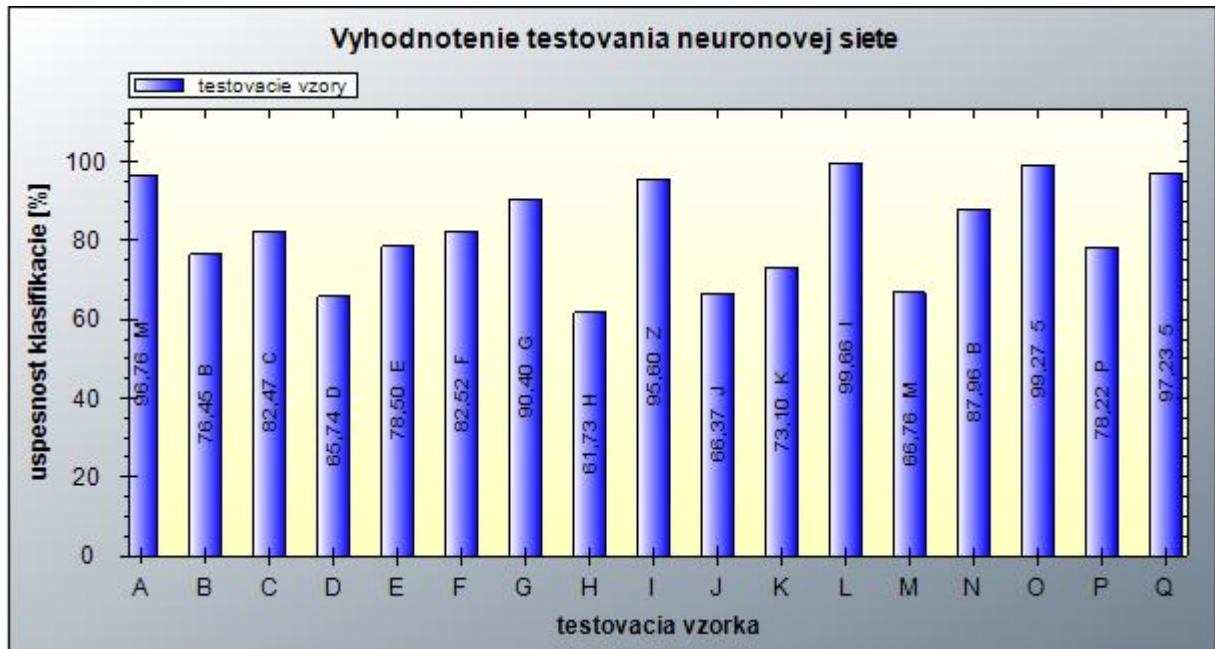
| Testovací vzor | Hit rate | Trénovací vzor |
|----------------|------------------|----------------|
| V | 99.4929014311632 | V |
| 5 | 99.3605381373633 | 5 |
| 3 | 99.0366862365324 | U |
| P | 98.7122496508024 | P |
| Y | 98.3858194802364 | 3 |
| H | 98.134283396307 | V |
| 2 | 97.7691145956396 | 3 |
| C | 96.3930362960133 | G |
| A | 96.1189845629237 | B |
| Z | 95.4607416537898 | 3 |
| U | 95.0801458509659 | U |
| O | 95.0547157627326 | G |
| X | 93.9665913442946 | 3 |
| F | 92.996393454635 | V |
| M | 92.8637564063624 | 3 |
| T | 92.4684727192034 | S |
| 1 | 92.368841213359 | I |
| 4 | 91.5732187312818 | 4 |
| I | 91.2770931188939 | K |
| D | 90.7578671894915 | D |
| L | 90.1144105422449 | 5 |
| K | 88.3275660415351 | 2 |
| Q | 77.6560291310689 | Q |
| 7 | 77.6091278817352 | 7 |
| R | 77.559668331588 | R |
| 8 | 76.8245546122154 | 8 |
| 9 | 75.3870074751223 | 9 |
| N | 75.2070452197771 | N |
| 6 | 72.8520170504265 | 6 |
| S | 72.4432645491208 | S |
| 0 | 71.1466162834428 | 0 |
| G | 65.8369005797234 | G |
| B | 62.9256146492988 | B |
| E | 61.784309612401 | E |
| J | 54.4391248366862 | J |

Tabuľka 3 – výsledok experimentu 3

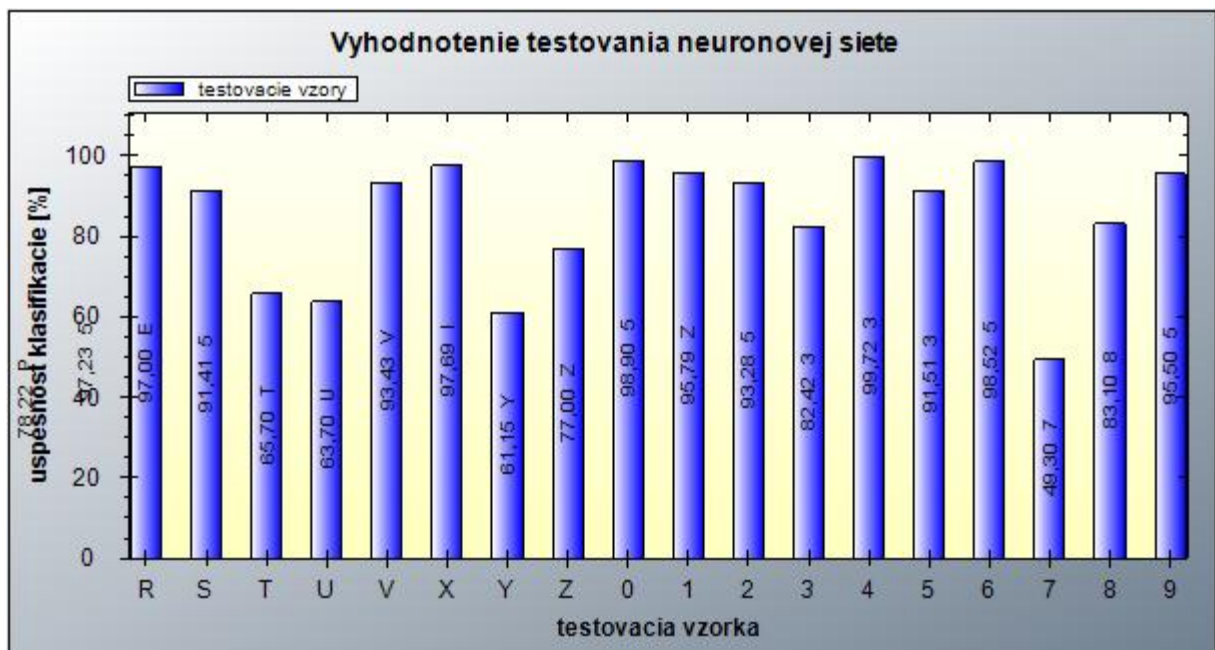
Neurónová sieť v tomto experimente správne klasifikovala 19 testovacích vzorov z celkového počtu 35. Úspešnosť klasifikácie je 54,28%.

Experiment 4

V tomto experimente použijeme rovnakú (rovnako natrénovanú) neurónovú sieť ako v predošlom experimente. Testovaciu množinu vzorov však upravíme tak, že všetky testovacie vzory posunieme o 2px doprava. Výsledky experimentu sú znázornené na obr.14, obr.15 a v tabuľke 4.



Obr.14 – Vyhodnotenie experimentu 4 : písmená A – Q



Obr.15 – Vyhodnotenie experimentu 4 : písmená R – 9

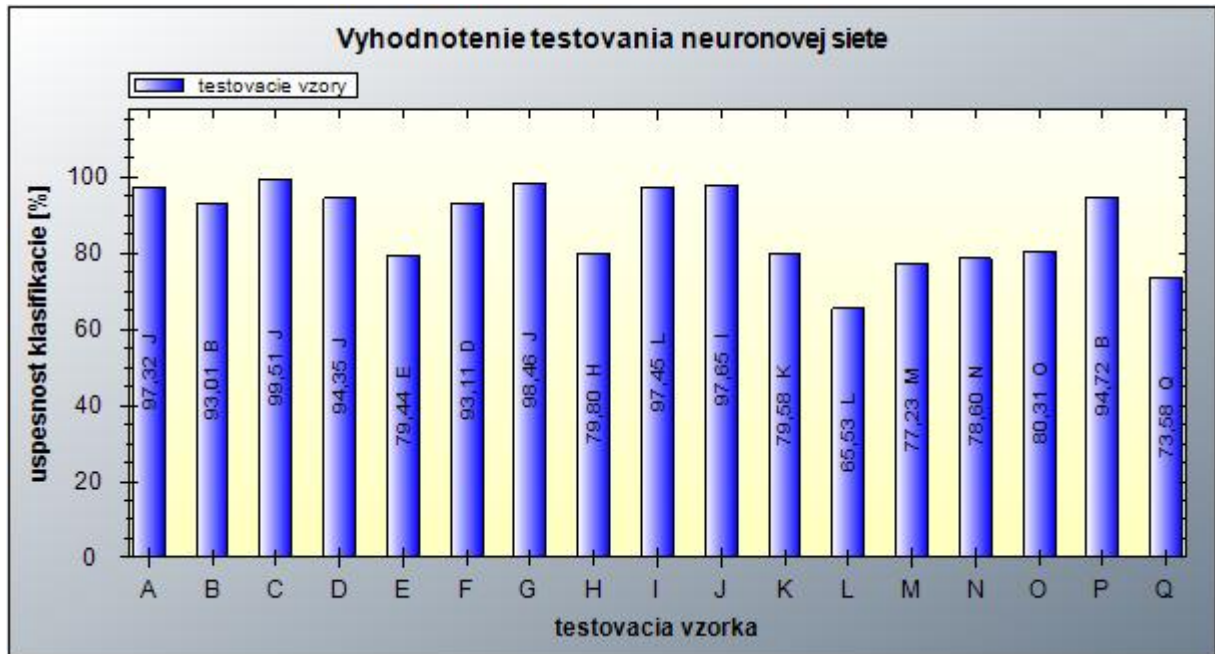
| Testovací vzor | Hit rate | Trénovací vzor |
|----------------|------------------|----------------|
| 4 | 99.719840692668 | 3 |
| L | 99.6561323754404 | I |
| O | 99.2683738874183 | 5 |
| 0 | 98.9012697331544 | 5 |
| 6 | 98.5222496399488 | 5 |
| X | 97.6866271477846 | I |
| Q | 97.2324890136994 | 5 |
| R | 96.9971051816338 | E |
| A | 96.7578622379616 | M |
| 1 | 95.7880778264481 | Z |
| I | 95.5951837339735 | Z |
| 9 | 95.5004248834125 | 5 |
| V | 93.4290483197862 | V |
| 2 | 93.2795629000529 | 5 |
| 5 | 91.5064649927641 | 3 |
| S | 91.4146899153989 | 5 |
| G | 90.3969327607854 | G |
| N | 87.9645191934065 | B |
| 8 | 83.0954088525291 | 8 |
| F | 82.5243663319478 | F |
| C | 82.4680980541929 | C |
| 3 | 82.4171149614826 | 3 |
| E | 78.4969867364219 | E |
| P | 78.2190451562274 | P |
| Z | 77.0018088551502 | Z |
| B | 76.4528897031831 | B |
| K | 73.1009993671906 | K |
| M | 66.7606477592291 | M |
| J | 66.3665614843106 | J |
| D | 65.7406402395557 | D |
| T | 65.6957998295018 | T |
| U | 63.6964091840194 | U |
| H | 61.7276213773808 | H |
| Y | 61.1521064074214 | Y |
| 7 | 49.3013976527765 | 7 |

Tabuľka 4 – výsledok experimentu 4

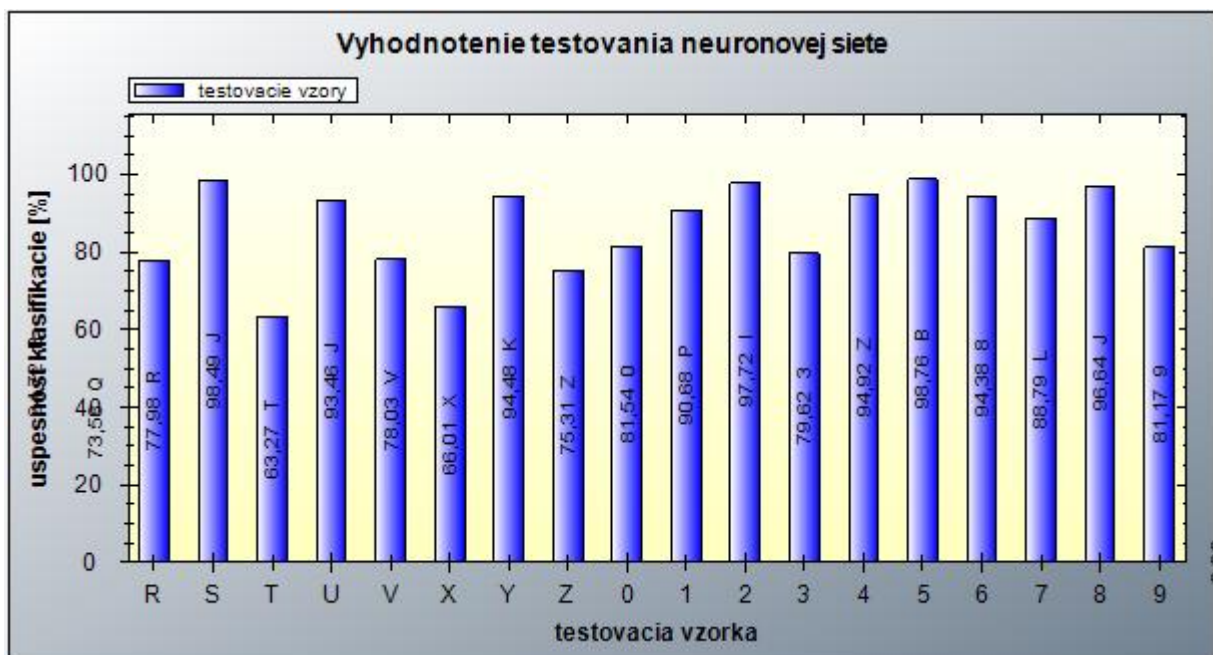
Neurónová sieť v tomto experimente správne klasifikovala 17 testovacích vzorov z celkového počtu 35. Úspešnosť klasifikácie je 48,57%.

Experiment 5

V tomto experimente použijeme rovnakú (rovnako natrénovanú) neurónovú sieť ako v predošlom experimente. Testovaciu množinu vzorov však upravíme tak, že všetky testovacie vzory posunieme o 3px doľava. Výsledky experimentu sú znázornené na obr.16, obr.17 a v tabuľke 5.



Obr.16 – Vyhodnotenie experimentu 5 : písmená A – Q



Obr.17 – Vyhodnotenie experimentu 5 : písmená R – 9

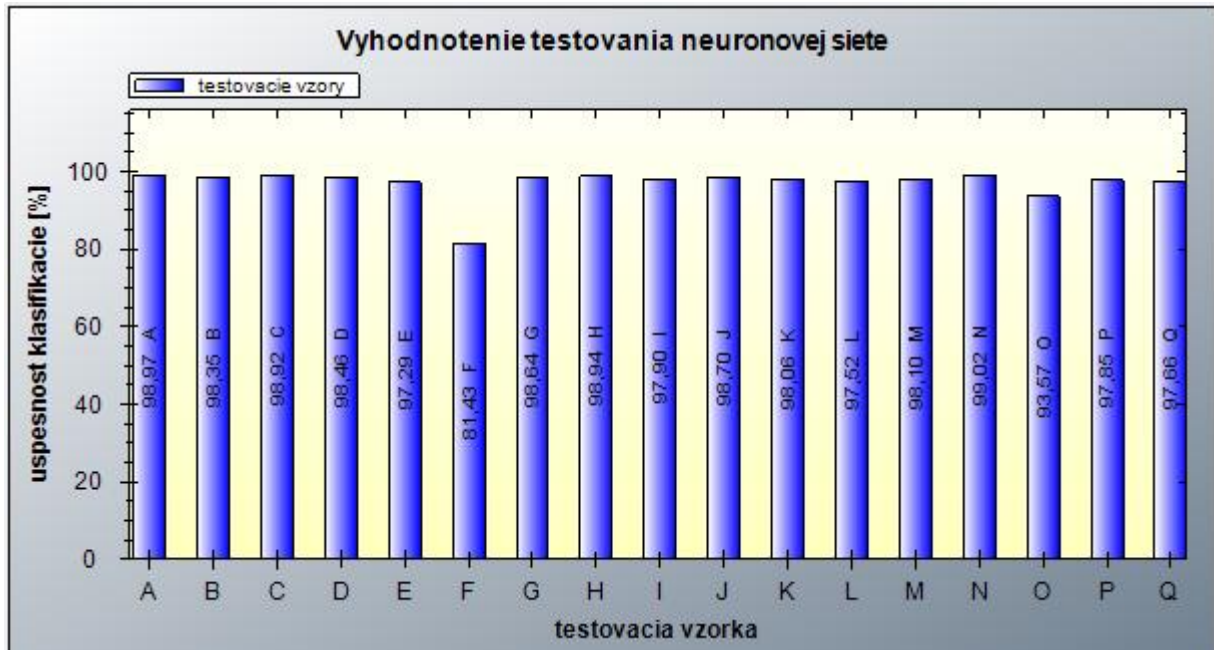
| Testovací vzor | Hit rate | Trénovací vzor |
|----------------|------------------|----------------|
| C | 99.5141756891669 | J |
| 5 | 98.7643414096544 | B |
| S | 98.4894237594052 | J |
| G | 98.4561914417411 | J |
| 2 | 97.7247963333879 | I |
| J | 97.6461848665074 | I |
| I | 97.4463483153491 | L |
| A | 97.3153441356746 | J |
| 8 | 96.6410707562544 | J |
| 4 | 94.9159252900008 | Z |
| P | 94.7205220861724 | B |
| Y | 94.4840779548244 | K |
| 6 | 94.3758347075585 | 8 |
| D | 94.3520527715049 | J |
| U | 93.4630980312116 | J |
| F | 93.107081325278 | D |
| B | 93.0117364553596 | B |
| 1 | 90.6791976403217 | P |
| 7 | 88.788238428547 | L |
| 0 | 81.5429649054495 | 0 |
| 9 | 81.1748420458313 | 9 |
| O | 80.3070937705883 | O |
| H | 79.798099642796 | H |
| 3 | 79.6216907778236 | 3 |
| K | 79.582147627596 | K |
| E | 79.4384098184394 | E |
| N | 78.5952732015374 | N |
| V | 78.0313416906247 | V |
| R | 77.9833671873031 | R |
| M | 77.2335842732985 | M |
| Z | 75.3057354151245 | Z |
| Q | 73.5806848133163 | Q |
| X | 66.0056667641953 | X |
| L | 65.52579234825 | L |
| T | 63.2709900235107 | T |

Tabuľka 5 – výsledok experimentu 5

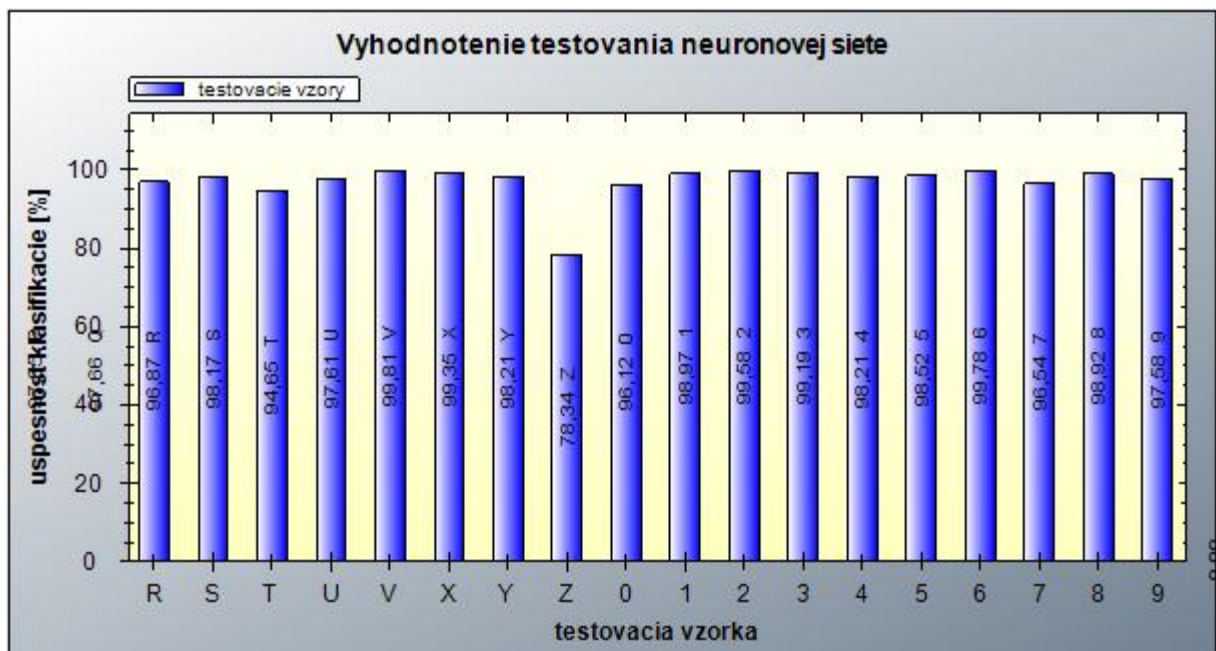
Neurónová sieť v tomto experimente správne klasifikovala 17 testovacích vzorov z celkového počtu 35. Úspešnosť klasifikácie je 48,57%.

Experiment 6

V tomto experimente použijeme rovnakú (rovnako natrénovanú) neurónovú sieť ako v predošlom experimente. Testovaciu množinu vzorov však upravíme tak, že všetky testovacie vzory poškodíme mierou 10%. Výsledky experimentu sú znázornené na obr.18, obr.19 a v tabuľke 6.



Obr.18 – Vyhodnotenie experimentu 6 : písmená A – Q



Obr.19 – Vyhodnotenie experimentu 6 : písmená R – 9

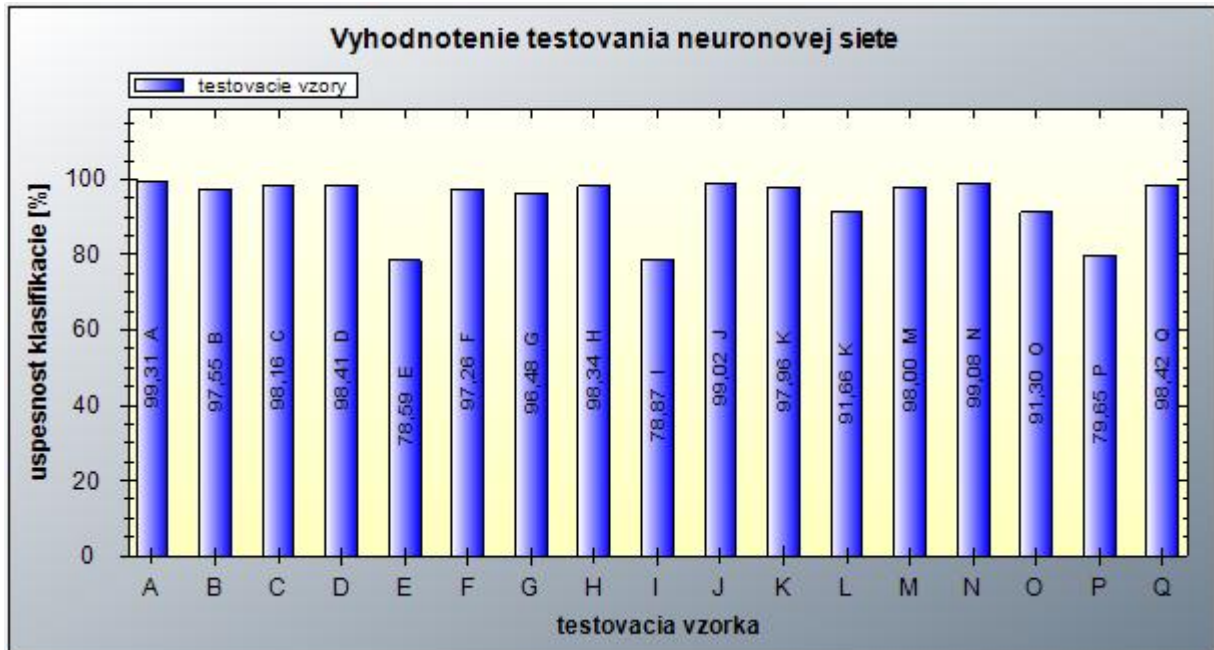
| Testovací vzor | Hit rate | Trénovací vzor |
|----------------|------------------|----------------|
| V | 99.8076685560118 | V |
| 6 | 99.7785820322979 | 6 |
| 2 | 99.5787107099132 | 2 |
| X | 99.3466894263339 | X |
| 3 | 99.1935632787868 | 3 |
| N | 99.0199537169615 | N |
| A | 98.9675356571057 | A |
| 1 | 98.9659867701681 | 1 |
| H | 98.9394811079791 | H |
| C | 98.9185821956037 | C |
| 8 | 98.916982496913 | 8 |
| J | 98.7003324003644 | J |
| G | 98.6374098631223 | G |
| 5 | 98.5237863277999 | 5 |
| D | 98.4603071173908 | D |
| B | 98.3549787199717 | B |
| Y | 98.2141670584573 | Y |
| 4 | 98.2056904927542 | 4 |
| S | 98.1652500930257 | S |
| M | 98.1034694731013 | M |
| K | 98.06155816396 | K |
| I | 97.8967041665262 | I |
| P | 97.8538089253946 | P |
| Q | 97.6564955843784 | Q |
| U | 97.6065212953599 | U |
| 9 | 97.5766384233172 | 9 |
| L | 97.5173345974912 | L |
| E | 97.2855156504316 | E |
| R | 96.8732794603594 | R |
| 7 | 96.5435958372452 | 7 |
| 0 | 96.1190145440466 | 0 |
| T | 94.6493888270921 | T |
| O | 93.5667963541928 | O |
| F | 81.4273071787901 | F |
| Z | 78.3391778798075 | Z |

Tabuľka 6 – výsledok experimentu 6

Neurónová sieť v tomto experimente správne klasifikovala 35 testovacích vzorov z celkového počtu 35. Úspešnosť klasifikácie je 100 %.

Experiment 7

V tomto experimente použijeme rovnakú (rovnako natréňovanú) neurónovú sieť ako v predošlom experimente. Testovaciu množinu vzorov však upravíme tak, že všetky testovacie vzory poškodíme mierou 20%. Výsledky experimentu sú znázornené na obr.20, obr.21 a v tabuľke 7.



Obr.20 – Vyhodnotenie experimentu 7 : písmená A – Q



Obr.21 – Vyhodnotenie experimentu 7 : písmená R – 9

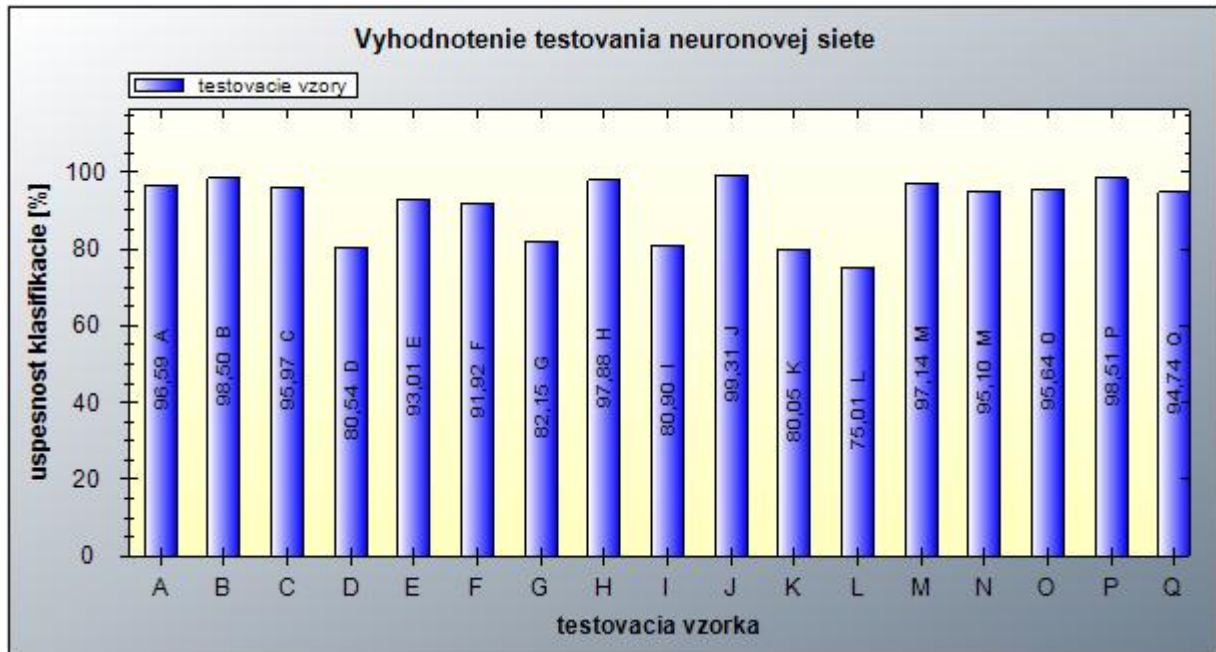
| Testovací vzor | Hit rate | Trénovací vzor |
|----------------|------------------|----------------|
| 2 | 99.8042362278918 | 2 |
| A | 99.3062015215466 | A |
| N | 99.0790357634821 | N |
| J | 99.0194824926859 | J |
| 8 | 98.8112611786474 | 8 |
| 5 | 98.7815563571214 | 5 |
| X | 98.6563955446047 | X |
| Q | 98.4176690158207 | Q |
| D | 98.4142546409002 | D |
| U | 98.4130472554942 | U |
| H | 98.3397619509828 | H |
| 4 | 98.2242392750332 | 4 |
| C | 98.1636547219409 | C |
| V | 98.1254618925083 | V |
| M | 97.9970265229186 | M |
| K | 97.9620039174973 | K |
| B | 97.5537939751183 | B |
| T | 97.5032252854135 | T |
| F | 97.2591017422025 | F |
| G | 96.4806476935726 | G |
| S | 96.4321971716045 | S |
| Y | 95.0006604071407 | Y |
| 7 | 94.9044850361941 | 7 |
| L | 91.6588795982177 | K |
| O | 91.301775356688 | O |
| 1 | 81.3040950099706 | 1 |
| P | 79.648770186159 | P |
| Z | 79.5929025476085 | Z |
| 3 | 79.5029399333293 | 3 |
| I | 78.8685953239232 | I |
| E | 78.5875848089067 | E |
| 9 | 77.8662585272018 | 9 |
| R | 76.8898972631706 | R |
| 0 | 76.7348442884669 | 0 |
| 6 | 64.2551289183536 | 6 |

Tabuľka 7 – výsledok experimentu 7

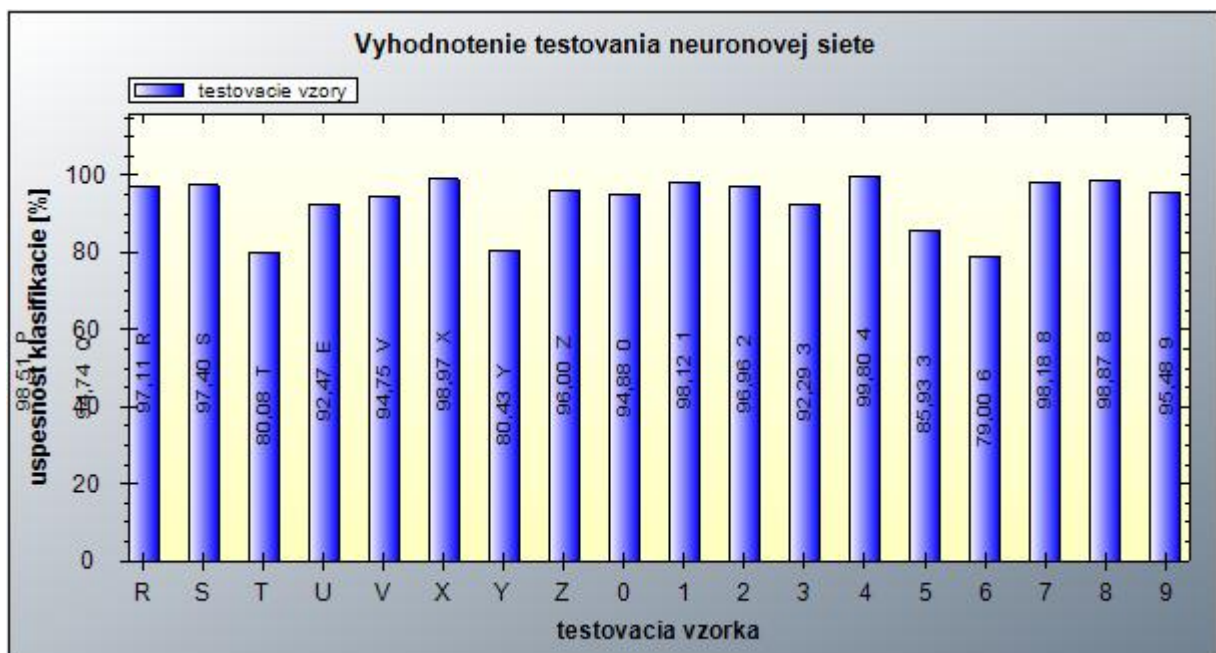
Neurónová sieť v tomto experimente správne klasifikovala 35 testovacích vzorov z celkového počtu 35. Úspešnosť klasifikácie je 100 %.

Experiment 8

V tomto experimente použijeme rovnakú (rovnako natrénovanú) neurónovú sieť ako v predošlom experimente. Testovaciu množinu vzorov však upravíme tak, že všetky testovacie vzory poškodíme mierou 30%. Výsledky experimentu sú znázornené na obr.22, obr.23 a v tabuľke 8.



Obr.22 – Vyhodnotenie experimentu 8 : písmená A – Q



Obr.23 – Vyhodnotenie experimentu 8 : písmená R – 9

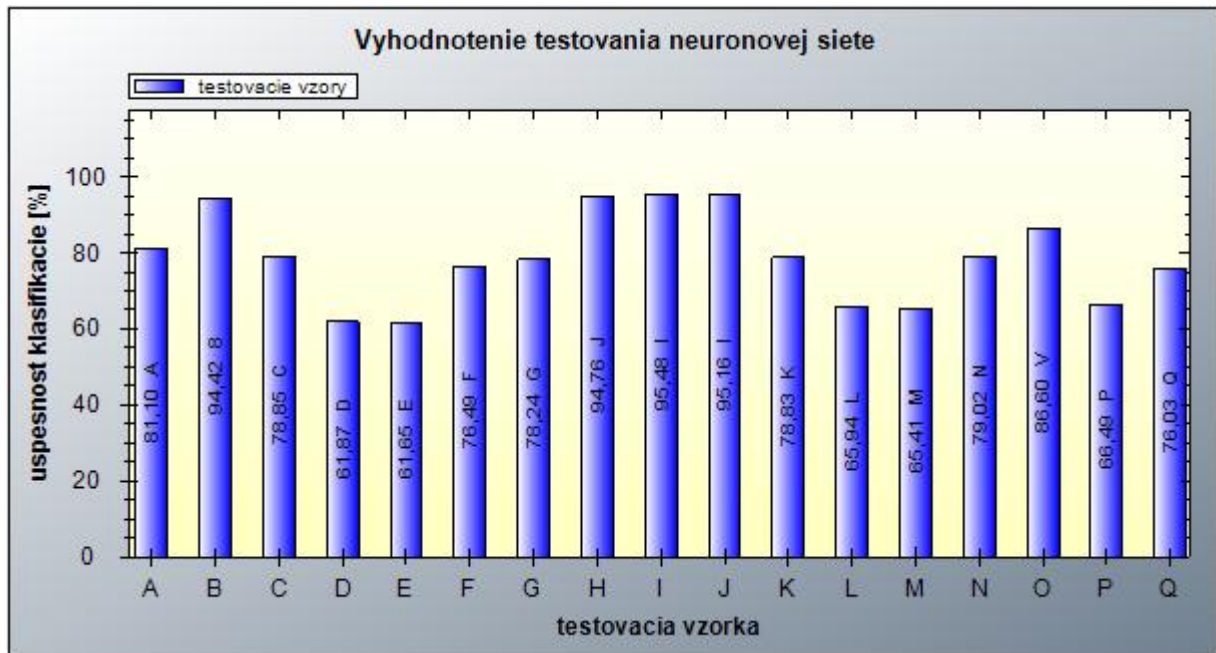
| Testovací vzor | Hit rate | Trénovací vzor |
|----------------|------------------|----------------|
| 4 | 99.8042401732991 | 4 |
| J | 99.3086508041653 | J |
| X | 98.9653993564719 | X |
| 8 | 98.8703835508539 | 8 |
| P | 98.5058001164918 | P |
| B | 98.5004728827202 | B |
| 7 | 98.1839820164743 | 8 |
| 1 | 98.1164753975389 | 1 |
| H | 97.8789570482461 | H |
| S | 97.4041988684866 | S |
| M | 97.1391313013683 | M |
| R | 97.1085843018571 | R |
| 2 | 96.9565924823173 | 2 |
| A | 96.5855539924928 | A |
| Z | 96.0011949652606 | Z |
| C | 95.9712914094814 | C |
| O | 95.6396258561892 | 0 |
| 9 | 95.4788199718189 | 9 |
| N | 95.1009137435353 | M |
| 0 | 94.8838067198835 | 0 |
| V | 94.750982800699 | V |
| Q | 94.744679845808 | Q |
| E | 93.0139639613838 | E |
| U | 92.4666112941641 | E |
| 3 | 92.2867436251706 | 3 |
| F | 91.9183189922333 | F |
| 5 | 85.9263747512301 | 3 |
| G | 82.1450925946679 | G |
| I | 80.9015927949191 | I |
| D | 80.538352534531 | D |
| Y | 80.4340716321309 | Y |
| T | 80.0839892359035 | T |
| K | 80.0531537093675 | K |
| 6 | 79.0046212773931 | 6 |
| L | 75.0129533151208 | L |

Tabuľka 8 – výsledok experimentu 8

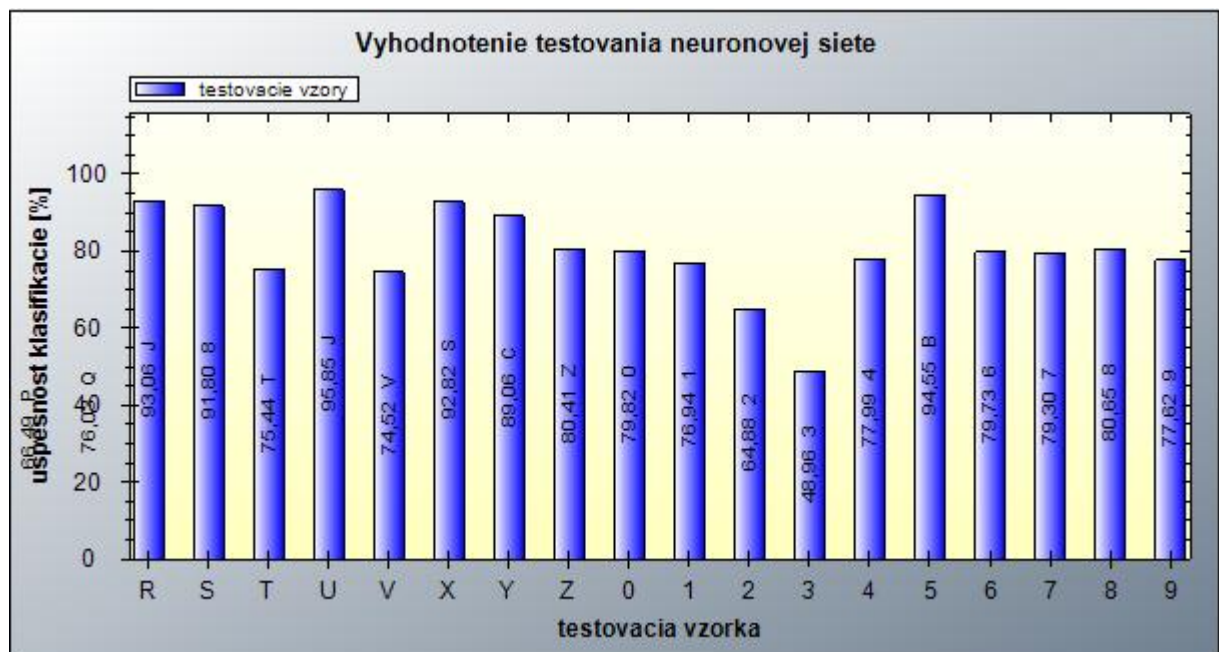
Neurónová sieť v tomto experimente správne klasifikovala 31 testovacích vzorov z celkového počtu 35. Úspešnosť klasifikácie je 88,57%.

Experiment 9

V tomto experimente použijeme rovnakú (rovnako natréňovanú) neurónovú sieť ako v predošlom experimente. Testovaciu množinu vzorov však upravíme tak, že všetky testovacie vzory otočíme o 2° a zároveň ich posunieme o 2px doľava. Výsledky experimentu sú znázornené na obr.24, obr.25 a v tabuľke 9.



Obr.24 – Vyhodnotenie experimentu 9 : písmená A – Q



Obr.25 – Vyhodnotenie experimentu 9 : písmená R – 9

| Testovací vzor | Hit rate | Trénovací vzor |
|----------------|------------------|----------------|
| A | 81.0969605234092 | A |
| U | 95.8462740221704 | J |
| I | 95.4828294681034 | I |
| J | 95.1610890268601 | I |
| H | 94.7622454910279 | J |
| 5 | 94.5463160061574 | B |
| B | 94.4200291800475 | 8 |
| R | 93.0648878409657 | J |
| X | 92.8242783563605 | S |
| S | 91.8035058121591 | 8 |
| Y | 89.0637916350705 | C |
| O | 86.6038173324482 | V |
| 8 | 80.6532468039929 | 8 |
| Z | 80.4083814988597 | Z |
| 0 | 79.8240903376856 | 0 |
| 6 | 79.73253784801 | 6 |
| 7 | 79.298899457071 | 7 |
| N | 79.024533425937 | N |
| C | 78.8538446339515 | C |
| K | 78.8311031804484 | K |
| G | 78.2427236433369 | G |
| 4 | 77.9934875825275 | 4 |
| 9 | 77.6231042787698 | 9 |
| 1 | 76.9367499259683 | 1 |
| F | 76.4864892728848 | F |
| Q | 76.0265997649905 | Q |
| T | 75.4423478533979 | T |
| V | 74.5187111894793 | V |
| P | 66.4884261635715 | P |
| L | 65.9355772181481 | L |
| M | 65.4103367085989 | M |
| 2 | 64.8844116027853 | 2 |
| D | 61.8745836414784 | D |
| E | 61.6494579971749 | E |
| 3 | 48.9583224385796 | 3 |

Tabuľka 9 – výsledok experimentu 9

Neurónová sieť v tomto experimente správne klasifikovala 25 testovacích vzorov z celkového počtu 35. Úspešnosť klasifikácie je 71,42%.