Вісник Національного технічного університету "ХПІ", 2021, № 2 (6)
ISSN 2079-0031 (Print) ISSN 2411-0558 (Online)

УДК 004.932 DOI: 10.20998/2411-0558.2021.02.01

В. Д. ДМИТРІЄНКО, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПІ",
С. Ю. ЛЕОНОВ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПІ",
М. В. МЕЗЕНЦЕВ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПІ"

ЧОТИРИЗНАЧНА ЛОГІКА Н. БЕЛНАПА, БЕЛНАПІВСЬКИЙ КОМП'ЮТЕР ТА НОВІ ФУНКЦІЇ БЛИЗЬКОСТІ ПРИ ПОРІВНЯННІ ДИСКРЕТНИХ ОБ'ЄКТІВ

Ідея чотиризначної логіки Белнапа полягає в тому, що сучасні комп'ютери повинні нормально функціонувати не тільки за істиносними значеннями вхідної інформації, але й за умов суперечливості, неповноти, істиносних провалів. У логіці Белнапа вводиться чотири істиносних значення: **T** (true – істина), **F** (false – хібність), **N** (none – ніхто, ніщо, жоден), **B** (both – the two, not only the one but also the other). Для простоти роботи з цими істиносними значеннями запроваджуються такі позначення: (1, 0, n, b). Логіка Белнапа може використовуватися для отримання оцінок мір близькості дискретних об'єктів, для яких використовуються функції Jaccard and Needhem, Russel and Rao, Sokal and Michener, Хемінга та ін. При цьому виникає можливість оцінки близькості, розпізнавання та класифікації об'єктів в умовах невизначеності, коли істиносні значення беруться з множини (1, 0, n, b). На основі архітектури нейронної мережі Хеммінга розроблено нейронні мережі, що дозволяють обчислювати відстані між об'єктами, що описуються за допомогою істиносних значень (1, 0, n, b). Іл.: 1. Табл.: 4. Бібліогр.: 15 назв.

Ключові слова: чотиризначна логіка Белнапа; белнапівський комп'ютер; оцінка близькості; розпізнавання та класифікація; функція близькості; нейронна мережа.

Постановка проблеми та аналіз літератури. При зіставленні чи розпізнаванні об'єктів з якісними ознаками широко використовується кодування ознак об'єктів за допомогою бінарного або біполярного алфавіту. Після кодування ознак об'єктів утворюються двійкові вектори, для порівняння яких існує велика кількість різних заходів вимірювання подібності та відстаней, і які застосовуються у найрізноманітніших областях: в екології [1], біології [2], геології [3], таксономії [4], хімії [5], при вирішенні завдань ідентифікації у біометрії [6], при реконструкції генних мереж [7] і т.д. При цьому для оцінки подібності двійкових векторів використовується велика кількість різних функцій, за допомогою яких у тій чи іншій формі визначається міра близькості двох векторів [1, 7, 8]. Так, лише у роботі [1] наведено 76 різних функцій.

У табл. 1 наведено кілька функцій, що часто застосовуються для оцінки подібності двійкових векторів [1, 7, 8].

ISSN 2079-0031 (Print) ISSN 2411-0558 (Online)

Таблиця 1

Функції подібності

Класичні функції подібності двійкових векторів
Відстань Хеммінга $S_0 = R_X = R_{HAMMING} = g + f$
Функція Russel and Rao $S_1 = S_{RUSSELandRAO} = \frac{a}{a+b+f+g} = \frac{a}{a+b+R_X}$
Функція подібності Jaccard and Needham $S_1 = S_{JACCARD} = \frac{a}{a+f+g}$
Функція подібності Roger and Tanimoto $S_3 = S_{ROGER\ and\ TANIMOTO} = \frac{a+b}{a+2(g+f)+b}$
Функції подібності за кількістю присутніх у об'єктів ознак, які збігаються $S_4 = S_{INNERSECTION} = a$
Функція подібності за кількістю ознак. що збігаються $S_5 = S_{IUNER\ PRODUCT} = a + b$
Функція подібності по евклідовій відстані $S_6 = S_{EUCLID} = \sqrt{f+g}$
Функція подібності Yula-I and Yula-II $S_7 = S_{YULEQ-\mathrm{I}} = \frac{ab-fg}{ab+fg}$; $S_8 = S_{YULEQ-\mathrm{II}} = \frac{2fg}{ab+fg}$
Коефіцієнт кореляції (correlation) $S_9 = S_{CORREL} = \frac{ab+fg}{[(a+f)(a+g)(b+g)(b+f)]^{1/2}}$

У табл. 1 прийнято два види позначень. Перший вид позначень часто застосовується як індекс відомих функцій подібності. Зазвичай це

ISSN 2079-0031 (Print) ISSN 2411-0558 (Online)

відомі математичні терміни, що застосовуються в цій галузі або прізвища вчених, які запропонували або використовували функції подібності для порівняння двійкових об'єктів з якісними ознаками. Другий тип позначень: *a*, *b*, *f*, *g* – пов'язаний з якісними ознаками пари об'єктів, що порівнюється

$$D_r = (d_{r1}, d_{dr2}, \ldots, d_{rn}),\ D_s = d_{s1}, d_{s2}, \ldots, d_{sn}),$$

і які мають *n* ознак. При цьому наявність ознаки позначається "1", а його відсутність – "0".

Змінна *a* призначена для підрахунку ознак, які є в обох об'єктах, що порівнюються:

$$a = \sum_{i=1}^{n} d_{ri} d_{si}\ .$$

Змінна *b* використовується для визначення числа ознак, яких немає в обох порівнюваних об'єктах D_r та D_s:

$$b = \sum_{i=1}^{n} (1 - d_{ri})(1 - d_{si})\ .$$

Розрахунок змінної *g*, призначеної для підрахунку числа ознак, які є у об'єкта D_r, але немає у об'єкта D_s:

$$g = \sum_{i=1}^{n} (1 - d_{si}) d_{ri}\ .$$

Таблиця 2

Змінні для порівняння пар об'єктів з бінарними ознаками

	D_S		
D_r	1	0	Sum
1	a	$g = \sum_{i=1}^{n} d_{ri}(1 - d_{si})$	$a + g$
0	$f = \sum_{i=1}^{n} d_{si}(1 - d_{ri})$	b	$b + f$
Sum	$a + f$	$g + b$	$a + b + g + f$

ISSN 2079-0031 (Print) ISSN 2411-0558 (Online)

За допомогою змінної f обчислюється число ознак, які є у об'єкта D_s, але яких немає у об'єкта D_r:

$$f = \sum_{i=1}^{n} d_{si}(1 - d_{ri}).$$

Однак використання двійкових алфавітів для опису якісних ознак порівнюємих об'єктів породжує певні труднощі при порівнянні об'єктів в умовах невизначеності при порівнянні ознак, які можуть змінюватися у часі. Наприклад, може змінюватися колір об'єктів, що світяться, залежно від напруги живлення, колір рослин та їх квіток від погодних умов. Розміри деяких об'єктів можуть змінюватись у певних межах. Сигнали цифрових пристроїв не завжди однозначно можна віднести до одного із двох стійких станів. При порівнянні таких ознак виникають невизначеності, які необхідно описувати за допомогою третіх істиносних станів, які дозволяють описувати більш точно об'єкти в умовах невизначеностей, що виникають. Залежно від порівнюємих об'єктів, третє істиносне значення можна інтерпретувати різними способами:

– як деякий проміжний стан між "1" та "0", або як відсутність інформації, або як третє істиносне значення, яке можна розглядати як одночасно істинне та хибне;

– як невизначеність тризначної логіки у квантовій механіці тощо.

Залежно від способу введення третього істиносного значення тризначні логіки сильно відрізняються одна від одної. При порівнянні об'єктів з якісними ознаками раціонально використовувати тризначний алфавіт ("1", "0", "1/2"), де значення "0" та "1" вказують на відсутність чи наявність якісної ознаки, а "1/2" інтерпретується як щось проміжне між "0" та "1" або як одночасно справжнє та хибне [9 – 11]. В роботі [12] розглянуто використання тризначної логіки з трьома істиносними значеннями ("1", "0", "1/2") для оцінки близькості та розпізнавання двійкових об'єктів в умовах невизначеності. При цьому при порівнянні пар об'єктів з трьома істиносними значеннями використовувалися змінні, що визначаються за допомогою табл. 3 [12].

Опишемо змінні g_1, $f_{1'}$, a_1, b_2, b_1, які не визначені за допомогою табл. 2. Число розрядів у порівнянних тризначних числах D_r, D_S, які мають третє істиносне значення підраховуються за допомогою змінної a_1.

Змінна g_1 в табл. 3 (змінна b_1) служить для підрахунку ознак, які є у об'єкта D_r (відсутні у об'єкта D_r), однак однозначно не визначені для об'єкта D_s, у якому вони можуть набувати як істиносні, так і хибні значення. У тому числі третє істиносне значення можна інтерпретувати в деяких висловлюваннях одночасно і як істиносне, і як хибне. Змінна f_1 (змінна b_2) необхідна для підрахунку числа одиничних (нульових) розрядів у числі D_s, яким у числі D_r відповідає третє істиносне значення.

Таблиця 3

Змінні, які використовуються для порівняння двійкових об'єктів із трьома істиносними значеннями

	D_s			
D_r	1	1/2	0	Sum
"1"	a	g_1	g	$a+g_1+g$
"1/2"	f_1	a_1	b_2	$f_1+a_1+b_2$
"0"	f	b_1	b	$f+b_1+b$
Sum	$a+f_1+f$	$g_1+a_1+b_1$	$g+b_2+b$	

У роботі [12] проведено аналіз впливу змін змінних g_1, f_1, a_1, b_2 на подібність і відмінність зіставних об'єктів з трьома істиносними значеннями.

До теперішнього часу передбачалося, що компоненти векторів вимірювалися без втрати інформації, тобто кожній вимірюваній компоненті одного вектора відповідала відповідна компонента другого вектора. Однак у реально функціонуючих технічних системах ця умова може порушуватися через наявність збоїв та перешкод. Тоді крім трьох розглянутих істиносних випадків, коли комп'ютер вхідну інформацію сприймає або як істинну ("1"), або як хибну ("0"), або як суперечливу ("1/2") може виникати ситуація "істинно-значного провалу – ∅" [11, 13, 14]. Для цих чотирьох можливих значень вхідної інформації Белнап ввів чотири істиносних значення *T* (true – істина – "1"), *F* (false – неправдивість – "0"), *N* (none – ніхто, щось, жоден), *B* (both – the two, not only the one but also the other). Для спрощення роботи з істиносними значеннями *T*, *F*, *N*, *B* уведені позначення (1, 0, *n*, *b*).

Метою статті є розробка модифікованих функцій схожості для чотиризначних векторів на основі чотиризначної логіки Белнапа, що забезпечує нормальне функціонування сучасних комп'ютерів не тільки при істиносних значеннях вхідної інформації, але і в умовах суперечливості, неповноти та істинносних провалів вхідної інформації. При цьому логіка Белнапа використовується для отримання нових мір близькості дискретних об'єктів, їх розпізнавання та класифікації на основі класичних функцій близькості Jaccarda and Needham, Rogera and Tanimoto, функцій подібності Yula, відстаней Хеммінга, Євкліда і т.д. для двійкових об'єктів, ознаки яких закодовані за допомогою бінарного алфавіту.

На множині (1, 0, *n*, *b*) можна ввести два часткових порядки [11, 13, 14]. Більшу увагу Белнап приділяє порядку, який відображається за допомогою "логічних решіток" на рис. 1 під назвою діаграма Хассе.

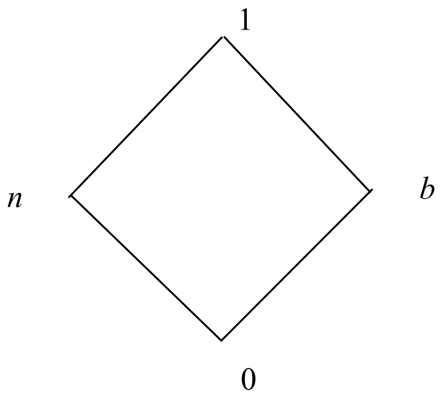

Рис. 1. Діаграма Хассе "логічних ришіток"

На цій діаграмі елементи *n* і *b* є незрівнянними. Решітчатий порядок Белнап інтерпретує як "логічний порядок $\leq$": чим вище елемент множини (1, 0, *n*, *b*) знаходиться на діаграмі Хассе, тим більше він відповідає істині. Відношення логічного порядку $\leq$, а також введення операцій диз'юнкції $\cup$ та кон'юнкції $\cap$, а також ряд додаткових умов визначає функціонування комп'ютера, що одержав назву белнапівського [11, 13, 14].

При співставленні двох *n*-розрядних тризначних чисел або векторів з *n*-бінарними компонентами необхідно отримати 4 змінні a, b, f, g (табл. 2). При встановленні подібності або міри близькості *n*-розрядних тризначних чисел необхідно вже 9 змінних: a, b, f, g, a_1, b_1, b_2, g_1, f_1 (табл. 3). При зіставленні міри близькості *n*-розрядних векторів, що

ISSN 2079-0031 (Print) ISSN 2411-0558 (Online)

містять чотиризначні компоненти кількість змінних у загальному випадку збільшується до 16 (табл. 4).

Таблиця 4

Змінні, які використовуються для порівняння об'єктів із чотирма істиносними значеннями

	D_s			
D_r	"1"	"1/2"	$\varnothing$	"0"
"1"	a	g_1	$\varnothing$	g
"1/2"	f_1	a_1	$\varnothing$	b_2
"$\varnothing$"	$\varnothing$	$\varnothing$	$\varnothing$	$\varnothing$
"0"	f	b_1	$\varnothing$	b

При співставленні двох *n*-розрядних векторів (об'єктів) D_r і D_s, у яких компоненти вектора D_r можуть приймати значення "1", "1/2", "0", а у об'єкта D_s спостерігається істиносний провал вхідної інформації або, іншими словами, виконується порівняння елементів множини "1", "1/2", "0" з деяким елементом $\varnothing$, породженим зовнішньою перешкодою або збоєм пристрою обробки інформації. У цьому випадку спостерігається втрата інформації (провал інформації) при порівнянні компонент вектора D_r "1", "1/2", "0" з компонентой $\varnothing$ вектора D_s. Аналогічний результат утворюється при порівнянні компонент вектора D_s "1", "1/2", "0" з компонентой $\varnothing$ вектора D_r. Тому в третьому рядку та в третьому стовпці табл. 4 при виконанні порівнянь компонент векторів D_r і D_s вказано на втрату (або провал) інформації. Просте відкидання таких компонентів може вносити неконтрольовані похибки в результати обчислень функцій подібності об'єктів, що описуються за допомогою двозначних і тризначних векторів.

Модифікуємо функції подібності для двійкових об'єктів для порівняння об'єктів, що описуються за допомогою тризначних векторів:

1. Функції подібності Russel and Rao для двійкових об'єктів має вигляд:

$$S_1 = \frac{a}{a+b+f+g} = \frac{a}{n}, \tag{1}$$

де *n* – число розрядів у векторів D_r і D_s.

ISSN 2079-0031 (Print) ISSN 2411-0558 (Online)

Для тризначних об'єктів ця функція має аналогічний вигляд:

$$S_1^3 = \frac{a}{a+b+f+g+g_1+f_1+a_1+b_1+b_2} = \frac{a}{n^{*3}}, \qquad (2)$$

де n^{*3} – число компонент у тризначних векторів D_r^3 і D_s^3.

Відмінність функцій S_1 і S_1^3 полягає в тому, що у знаменнику співвідношення (2) враховуються компоненти порівнюємих векторів з третім істиносним значенням.

2. Функція подібності Jaccard and Needham приведена в табл. 1. Вона відрізняється від формули (1) тим, що у її вираженні відсутня змінна *b*, за допомогою якої підраховується кількість ознак, які відсутні в обох об'єктів, які порівнюються. Для тризначних об'єктів функція подібності Jaccard and Needham набуває вигляду:

$$S_2^3 = S_{JACCARD}^3 = \frac{a}{a+f+g+g_1+f_1+a_1+b_1+b_2} = \frac{a}{n^{*3}-b}. \qquad (3)$$

3. Функція подібності Roger and Tanimoto також наведена у табл. 1. Для трійкових векторів ця функція набуває вигляду:

$$S_{ROGER\ and\ TANIMOTO}^3 = S_3^3 = \frac{a+b+a_1}{a+a_1+2(g+f+g_1+f_1+b_1+b_2)+b}. \qquad (4)$$

Вона відрізняється від класичної функції Roger and Tanimoto тим, що в чисельнику у неї з'являється третій доданок, за допомогою якого підраховується число однакових ознак із третім істиносним значенням. У знаменнику модифікованої функції подвоюється число ознак (або трійкових розрядів), які не збігаються у порівнюємих тризначних векторів.

4. Функція подібності за кількістю присутніх у об'єктів ознак, що збігаються, наведена в табл. 1. Для тризначних об'єктів ця функція набуває вигляду

$$S_4^3 = S_{INNERSECTION}^3 = a + a_1.$$

Вона відрізняється від класичної (табл. 1) наявністю другого доданку, що враховує число однакових ознак з третім істиносним значенням.

5. Функція подібності за кількістю у об'єктів ознак, що збігаються. Вона відрізняється від функції $S_{INNERSECTION}^3$ тим, що враховує ознаки, які відсутні в обох тризначних об'єктів

ISSN 2079-0031 (Print) ISSN 2411-0558 (Online)

$$S_5^3 = S_{INNERSECTION}^3 = a + a_1 + b_1 .$$

6. Відстань Хеммінга. Наведена в табл. 1. Для тризначних об'єктів вона набуває вигляд

$$R_X^3 = R_{HAMMING}^3 = g + f + g_1 + f_1 + b_2 + b_1$$

Аналогічно можуть бути отримані інші функції або індекси подібності і відстані для тризначних об'єктів. Зокрема, у роботі [12] для тризначних об'єктів отримано функції схожості Kulzinsky, індекси подібності Dice, Хаманна і т.д.

Приклад 1. Розрахуємо функцію подібності Jaccard and Needham для тризначних векторів D_r і D_s :

$$\begin{aligned} D_r &= (0\ \ 1\ \ 1/2\ \ 1/2\ \ \ 0\ \ \ 1\ \ \ 0\ \ 1\ \ 1\ \ 1/2\ \ 1\ \ 0\ \ 0\ \ 1/2\ \ 1\ \ 1/2), \\ D_s &= (1\ \ 0\ \ \ 1\ \ 1/2\ \ 1/2\ \ 1/2\ \ 0\ \ 1\ \ 1\ \ \ 1\ \ 1\ \ 1\ 1/2\ \ 0\ \ 1\ \ 1/2). \end{aligned} \tag{5}$$

Обчислимо за допомогою таблиць 2 та 3 змінні a, b, g, f, a_1. В результаті розрахунків отримаємо: $n^{*3} = 16$, a = 4; b = 1; g = 1; f = 2; $a_1 = 2$. Використовуючи значення цих змінних та співвідношення (3) можна обчислити функцію подібності (3)

$$S_{JACCARD}^3 = \frac{a}{n^{*3} - b} = \frac{4}{16 - 1} = 0{,}267 ,$$

де n^{*3} – число компонент, за якими порівнюються вектори D_r і D_S.

Тепер розглянемо ситуацію, коли в оцінці подібності векторів D_r і D_S відбувається по три істиносних провала (втрати) інформації в кожному з векторів. При цьому у векторі D_r втрачається інформація про першу, шосту та чотирнадцяту компоненти вектора D_r, а у векторі D_S – про третю, восьму та п'ятнадцяту компоненти цього вектора. Таким чином, вектори D_r і D_S не можуть порівнюватися за 1-ю, 3-ю, 6-ю, 8-ю, 14-ю і 15-у компонентами. Це можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} D_r &= (\varnothing\ \ 1\ \ 1/2\ \ 1/2\ \ \ 0\ \ \ \varnothing\ \ \ 0\ \ 1\ \ 1\ \ 1/2\ \ 1\ \ 0\ \ 0\ \ \varnothing\ \ 1\ \ 1/2), \\ D_s &= (1\ \ 0\ \ \ \varnothing\ \ 1/2\ \ 1/2\ \ 1/2\ \ 0\ \ 1\ \ \varnothing\ \ \ 1\ \ 1\ \ 1\ 1/2\ \ 0\ \ \varnothing\ \ 1/2), \end{aligned} \tag{6}$$

де $\varnothing$ – знак провалу або відсутності достовірної інформації, що вказує на те, що в даному розряді порівняння векторів D_r і D_S неможливо. У

ISSN 2079-0031 (Print) ISSN 2411-0558 (Online)

зв'язку з цим 16-розрядні вектори D_r і D_S повинні бути замінені на 10-розрядні:

$$\begin{aligned} D_{r10} &= (1\ \ 1/2\ \ 0\ \ 0\ \ 1\ \ 1/2\ \ 1\ \ \ 0\ \ \ 0\ \ 1/2), \\ D_{s10} &= (0\ \ 1/2\ \ 1/2\ \ 0\ \ \ 1\ \ 1\ \ \ 1\ \ 1\ 1/2\ \ 1/2), \end{aligned} \tag{7}$$

де позначення D_{r10} і D_{s10} вказують на те, що 16-розрядні вихідні вектори D_r і D_S (6) замінені на 10-розрядні вектори (7). Обчислення змінних *a*, *b*, *f*, *g*, a_1, b_1, b_2, g_1, f_1 дає наступні значення:

$$a = 2;\ b = g = f = a_1 = 1;\ b_1 = 2;\ b_2 = 1;\ g_1 = 0;\ f_1 = 1.$$

Використовуючи отримані значення легко обчислити функцію подібності Jaccard and Needham для тризначних двокомпонентних векторів (7)

$$S_2^3 = S_{JACCARD}^3 = \frac{a}{a + f + g + g_1 + f_1 + a_1 + b_1 + b_2} = \frac{2}{10 - 1} = 0{,}222\,.$$

Таким чином, через істиносні провали інформації зіставлення тризначних векторів D_r і D_S відбувається лише по 10 компонентам векторів та значення функції подібності $S_{JACCARD}^3$ зменшується з 0,267 до 0,222 або приблизно на 7 %. Така відносно невелика зміна функції подібності відбувається далеко не завжди при істиносних провалах інформації. Продемонструємо це за допомогою прикладу 2.

Приклад 2. Нехай у цьому прикладі використовується функція подібності для тризначних векторів $S_4^3 = S_{INNERSECTION}^3 = a + a_1$. а як порівнюємі вектори використовуються вектора D_r і D_S прикладу 1. В цьому випадку

$$S_4^3 = S_{INNERSECTION}^3 = a + a_1 = 4 + 2 = 6\,.$$

Оцінка подібності векторів D_r і D_S при істиносних провалах, заданих як у прикладі 1, дає:

$$S_4^3 = a + a_1 = 2 + 1 = 3\,.$$

Таким чином, за наявності істиносних провалів інформації оцінка схожості векторів D_r і D_S за допомогою функції S_4^3 зменшується у 2 рази.

Аналіз прикладів 1 і 2 показує, що оцінка подібності довільних тризначних векторів в умовах інформаційних провалів можлива, але при цьому в кожному конкретному випадку необхідно враховувати характер вхідної інформації та кількість провалів (втрат) інформації. Зазначимо також, що застосування чотиризначної логіки М. Белнапа в цьому випадку зводиться до усунення істиносних провалів (втрат) вхідної інформації та застосування тризначної логіки. Залежно від способу введення третього істинного значення можуть бути отримані різні підходи до оцінки схожості тризначних об'єктів (векторів). При порівнянні об'єктів (зображень, векторів) з якісними ознаками в умовах невизначеності може раціонально використовуватись тризначний алфавіт ("0", "1/2", "1"), де значення "0" і "1" вказують на відсутність чи наявність ознаки відповідно, а "1/2" нтерпретується як невизначений стан, який може бути як істинним, так і хибним [9 – 11]. Докладніше використання зазначеного тризначного алфавіту для розпізнавання та оцінки подібності двійкових об'єктів за умов невизначеності розглянуто у роботі [12].

Чотиризначна логіка М. Белнапа може використовуватися і для вирішення дискретних завдань розпізнавання в умовах невизначеності та наявності істиносних провалів у вхідній інформації. При цьому звісно припускати, що еталонні зображення, що зберігаються в пам'яті системи, що розпізнає, істиносних провалів інформації не мають. У цьому випадку узагальнена архітектура обученої нейронної мережі, що розпізнає вхідні зображення в умовах невизначеності та істиносних провалів інформації, відрізняється від архітектури узагальненої нейронної мережі Хеммінга [15].

Список літератури:

1. *Seung-Seok Choi.* A survey of Binary Similarity and Distance Measures */ Choi Seund-Seok, Cha Sung-Hyuk, Tappert Chartes C* // Systemics, Cybernetics and Informatics. – 2010. – Vol. 8. – P. 43-48.

2. *Hubalek Z.* Coefficients of Association and Similarity, Based on Binary (Presence-Absence) Data: An Evaluation, Biological Reviews. – 1982. – Vol. 57. – No. 4. – P. 669-689.

3. *Michael H.* Binary coefficients: *A* theoretical and empirical study, Mathermatical Geology. – 1976. – Vol. 8. – No. 2.

4. *Sokal R.R.* Principles of numeric taxonomy / *R.R. Sokal, P.H. Sneath*. – San Francicco, W.H. Freeman. – 1963.

5. *Willett P.* Chemical similarity searching / *P. Willett, P.H. Bornard, G.M. Drowns* // Chem Inf. Comput. Sci. – 1998. – Vol. 38. – P. 983-996.

6. *Willett P.* Similarity-based approaches to virtual screening / *P. Willett* // Biochemical Society Transactions, 2003. – Vol. 31. – P. 603-606.

7. *Бабичев С.А.* Теоретичні та практичні засади інформаційної технології обробки профілів експресій генів для реконструкції генних мереж. – Дисертація на здобуття наукового ступеня д.т.н. по спеціальності 05.13.06. – інформаційні технології. – Херсон: ХНТУ, 2018. – 382 с.

8. *Dmitrienko V.D.* Neural networks for determining affinity functions / *V.D. Dmitrienko, A.Yu. Zakovorotny, S.Yu. Leonov* // 2020 Int. Congr. on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotoc Applications (HORA), Ankara, Turkey, 2020, – P. 647-652.

9. *Томова Н.Е.* Возникновение трехзначніх логик: логіко-философский аналіз / *Н.Е. Томова* // Вестник МГУ. Серия 7. Философія. – М.: МГУ, 2009. – С. 68-74.

10. *Tomova N.E.* Natural Three-Valued logics // Logical Investigations. – 2013. – Vol. 19. – P. 344-448.

11. *Карпенко А.С.* Развитие многозначной логики / *А.С. Карпенко*. – М.: Изд-во ЛКИ, 2010. – 448 с.

12. *Дмитрієнко В.Д.* Комп‘ютерні компоненти для оцінки близькості та розпізнавання двійкових об‘єктів в умовах невизначеності / *В.Д. Дмитрієнко, С.Ю. Леонов, О.Ю. Заковоротний* // Вісник НТУ "ХПІ". Серія "Інформатика та моделювання". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2020. – № 2 (4). – С. 58-76.

13. *Belnap N.D.* How computers should think / N.D. Belnap. – G. Ryle (ed.) Contemporary Aspects of Philosophy. Stocksfield: Oriel Press. 1977. – P. 30-56.

14. *Belnap N.D.* A useful four-valued logic / *N.D. Belnap*. – Epstein.

15. *Дмитриенко В.Д.* Нейронные сети: архітектура и использование: учебное пособие / *В.Д. Дмитриенко,А.Ю. Заковоротный, С.Ю. Леонов*. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2020. – 222 с.

References:

1. Seung-Seok Choi, Cha Sung-Hyuk, and Tappert Chartes C (2010), A survey of Binary Similarity and Distance Measures / Choi Seund-Seok, *Systemics, Cybernetics and Informatics*, Vol. 8, pp. 43-48.

2. Hubalek Z. (1982), Coefficients of Association and Similarity, Based on Binary (Presence-Absence) Data, *An Evaluation, Biological Reviews*, Vol. 57, No. 4, pp. 669-689.

3. Michael H. (1976), Binary coefficients: A theoretical and empirical study, *Mathermatical Geology*, Vol. 8, No. 2.

4. Sokal R.R., and Sneath P.H. (1963), *Principles of numeric taxonomy*, San Francicco, W.H. Freeman.

5. Willett P., Bornard P.H., and Drowns G.M. (1998), Chemical similarity searching, *Chem Inf. Comput. Sci*, Vol. 38, pp. 983-996.

6. Willett P. (2003), Similarity-based approaches to virtual screening, *Biochemical Society Transactions*, Vol. 31, pp. 603-606.

7. Babichev S.A. (2018), Theoretical and practical principles of information technology for processing gene expression profiles for the reconstruction of gene networks, The dissertation on competition of a scientific degree of Ph.D. on specialty 05.13.06. - Information Technology, Херсон: HSTU, 2018, 382 p.

8. Dmitrienko, V.D., Zakovorotny, A.Yu., Leonov, S.Yu. (2020), Neural networks for determining affinity functions, *2020 Int. Congr. on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotoc Applications (HORA), Ankara, Turkey*, pp. 647-652.

9. Tomova, N.E. (2009), The emergence of three-valued logics: logical and philosophical analysis, MSU Journal. Series 7. Philosophy, Moskow, MSU, pp. 68-74.

10. Tomova, N.E. (2013), Natural Three-Valued logics, *Logical Investigations*, Vol. 19. pp. 344-448.

11. Karpenko, A.S. (2010), Development of multivalued logic, Moskow: Publishing house LKI, 448 p.

12. Dmitrienko, V.D., Leonov, S.Yu., and Zakovorotny, O.Yu. (2020), Computer components for estimating proximity and recognizing binary objects under uncertainty,

Bulletin of NTU "KhPI". Computer Science and Modeling Series, Kharkiv, STU "KhPI", No. 2 (4), pp. 58-76.

13. Belnap, N.D. (1977), *How computers should think*, G. Ryle (ed.) Contemporary Aspects of Philosophy. Stocksfield: Oriel Press., pp. 30-56.
14. Belnap N.D. *A useful four-valued logic* , Epstein.
15. Dmitrienko, V.D., Leonov, S.Yu., and Zakovorotny, O.Yu. (2020), *Neural Networks: Architecture and Usage: Tutorial*, Kharkiv, STU "KhPI", 222 p.

Статтю представив д.т.н., проф. Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" В.І. Носков.

Поступила (received) 06.12.2021

Dmitrienko Valerii, Dr. Tech. Sci., Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (057) 707-61-98, e-mail: valdmitrienko@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-2523-595X

Leonov Sergey, Dr. Tech. Sci., Professor
National Technical University "Kharkiv Politechnical Institute"
Str. Kirpichova, 2, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: (099) 911-911-3, e-mail: serleomail@gmail.com
ORCID ID 0000-0001-8139-0458

Mezentsev Mykola, Cand. Tech. Sci., Docent
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (098) 859-88-98, e-mail: mykola.mezentsev@khpi.edu.ua
ORCID ID: 0000-0001-7834-2797

УДК 004.932

Чотиризначна логіка Н. Белнапа, білнапівський комп'ютер та нові функції близькості при порівнянні дискретних об'єктів / Дмитрієнко В.Д., Леонов С.Ю., Мезенцев М.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2021. – № 2 (6). – С. 21 – 34.

Ідея чотиризначної логіки Белнапа полягає в тому, що сучасні комп'ютери повинні нормально функціонувати не тільки за істинних значень вхідної інформації, але й за умов суперечливості, неповноти справжніх провалів. У логіці Белнапа вводиться чотири істиносні значення: T (true – істина), F (false – брехня), N (none – ніхто, ніщо, жоден), B (both – the two, not only the one but also the other). Для простоти роботи з цими істіносними значеннями вводяться такі позначення: (1, 0, n, b). Логіка Белнапа може використовуватися для отримання оцінок мір близькості дискретних об'єктів, для яких використовуються функції Jaccard and Needhem, Russel і Rao, Sokal і Michener, Хемінга і т.д. При цьому виникає можливість оцінки близькості, розпізнавання та класифікації об'єктів в умовах невизначеності, коли істинні значення беруться з множини (1, 0, n, b). На основі архітектури нейронної мережі Хемінга розроблені нейронні мережі, що дозволяють обчислювати відстані між об'єктами, що описуються за допомогою істіносних значень (1, 0, n, b). Іл.: 1. Табл.: 4. Бібліогр.: 15 назв.

Ключові слова: чотиризначна логіка Белнапа; белнапівський комп'ютер; оцінка близькості; розпізнавання та класифікації; функція близькості; нейронна мережа.

УДК 004.932

Четырехзначная логика Н. Белнапа, белнаповский компьютер и новые функции близости при сравнении дискретных объектов / Дмитриенко В.Д., Леонов С.Ю., Мезенцев Н.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2021. – № 2 (6). – С. 21 – 34.

Идея четырехзначной логики Белнапа заключается в том, что современные компьютеры должны нормально функционировать не только при истинных значениях входной информации, но и в условиях противоречивости, неполноты истинностных провалов. В логике Белнапа вводится четыре истинностных значения: **T** (true – истина), **F** (false – ложь), **N** (none – никто, ничто, ни один), **B** (both – the two, not only the one but also the other). Для простоты работы с этими истинностными значениями вводятся следующие обозначения: (1, 0, n, b). Логика Белнапа может использоваться для получения оценок мер близости дискретных объектов, для которых используются функции Jaccard and Needhem, Russel and Rao, Sokal and Michener, Хемминга и т.д. При этом возникает возможность оценки близости, распознавания и классификации объектов в условиях неопределенности когда истинностные значения берутся из множества (1, 0, n, b). На основе архитектуры нейронной сети Хемминга разработаны нейронные сети, позволяющие вычислять расстояния между объектами, описываемыми с помощью истиносных значений (1, 0, n, b). Ил.: 1. Табл.: 4. Библиогр.: 15 назв.

Ключевые слова: четырехзначная логика Белнапа; белнаповский компьютер; оценка близости; распознавания и классификации; функция близости; нейронная сеть.

УДК 004.932

N. Belknap's Four-Valued Logic, Belknap Computer and New Proximity Functions for Comparing Discrete Objects / Dmitrienko V.D., Leonov S.Yu., Mezentsev M.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2021. – № 2 (6). – P. 21 – 34.

The idea of Belknap's four-valued logic is that modern computers should function normally not only with the true values of the input information, but also under the conditions of inconsistency and incompleteness of true failures. Belknap's logic introduces four true values: T (true - true), F (false - false), N (none - nobody, nothing, none), B (both - the two, not only the one but also the other). For ease of work with these true values, the following designations are introduced: (1, 0, n, b). Belknap's logic can be used to obtain estimates of proximity measures for discrete objects, for which the functions Jaccard and Needhem, Russel and Rao, Sokal and Michener, Hamming, etc. are used. In this case, it becomes possible to assess the proximity, recognition and classification of objects in conditions of uncertainty when the true values are taken from the set (1, 0, n, b). Based on the architecture of the Hamming neural network, neural networks have been developed that allow calculating the distances between objects described using true values (1, 0, n, b). Fig.: 1.Tabl.: 4. Refs.: 15 titles.

Keywords: four-valued Belknap logic; Belknap computer; proximity assessment; recognition and classification; proximity function; neural network.