Пифагоровы нечеткие числа и нечеткий анализ загрузки многоядерного процессора

Т. Г. Черноусова

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)

E-mail chtg@bmstu.ru

Аннотация. **Теория нечетких множеств, предложенная Л. Заде, получила свое дальнейшее развитие в теориях интуиционистских и пифагоровых нечетких множеств, позволивших вести перспективные прикладные исследования в ряде областей, в частности, исследования многоядерных процессоров. Анализируя ключевые понятия интуиционистских и пифагоровых нечетких множеств, показаны их принципиальные отличия между собой. На базе пифагоровых нечетких чисел предложен алгоритм нечеткого анализа загрузки ядер процессора, архитектурное решение которого выполнено по технологии Intel big. LITTLE.**

Ключевые слова: пифагоровы нечеткие числа; функция оценки; функция точности; алгоритм нечеткого анализа загрузки многоядерного процессора

I. Введение

Теория нечетких множеств (НМ) американского математика Л. Заде [1] послужила основой для развития теории интуиционистских нечетких множеств (ИНМ) (Intuitionistic Fuzzy Set (IFS)). Первая работа по ИНМ опубликована К. Атанассовым в 1983 году [2]. До появления его работы элементы нечеткого множества (НМ) (fussy set (FS)) рассматривались как элементы, характеризуемые только степенью принадлежности μ, а степень непринадлежности ν находилась как разность между единицей и степенью принадлежности μ. В интуиционистской модели, предложенной К. Атанассовым, любой элемент НМ характеризуется не только степенью принадлежности μ его к данному множеству, но и степенью непринадлежности ν, которые отчасти не зависят друг от друга. Однако по свойству ИНМ сумма степеней принадлежности μ и непринадлежности ν любого его элемента не может быть больше единицы: $0 \le \mu + \nu \le 1$. Для преодоления ограничений, имеющихся в теории ИНМ, разработана теория пифагоровых нечетких множеств (ПНМ) (Pythagorean Fuzzy Set (PFS)), которая впервые изложена Р. Ягером [3] и основана на теории пифагоровых чисел. Согласно Р. Ягеру для любого элемента ПНМ его степени принадлежности μ и непринадлежности ν этому множеству связаны между собой неравенством: $0 \le \mu^2 + \nu^2 \le 1$.

В статье представлен алгоритм нечеткого анализа загрузки многоядерного процессора, архитектурное решение которого построено согласно технологии Intel big. LITTLE. Оценка загрузки процессора осуществляется с помощью пифагоровых нечетких чисел (ПНЧ) (Pythagorean fuzzy number (PFN)) [4]. Сравнение нечеткой загрузки высокопроизводительных P-ядер и энергоэффективных E-ядер процессора поможет существенно снизить временные затраты и энергопотребление на системном уровне при планировании исполнения ряда сложных приложений [5–9].

II. Характеристика ИНМ и ПНМ

Определение НМ. НМ $A1$ есть набор упорядоченных пар на универсуме X:

$$A1 = \left\{ (u, \mu_{A1}(u)) \middle| u \in X \right\}, \tag{1}$$

где функция принадлежности $\mu_{A1}(u)$ элемента u множеству $A1$ такая, что

$$\mu_{A1} : X \to [0,1]. \tag{2}$$

Функция принадлежности $\mu_{A1}(u)$ устанавливает степень или меру принадлежности элемента u НМ $A1$ [1, 2]. Из (2) следует, что $\mu_{A1}(u)$ принимает значения на отрезке $[0,1]$. Заметим, если $\mu_{A1}(u) = 0$ или $\mu_{A1}(u) = 1$, то $\mu_{A1} : X \to \{0,1\}$. Это значит, что $\mu_{A1}(u)$ принимает значения на множестве $\{0,1\}$. Тогда НМ $A1$ (1) преобразуется в традиционное четкое множество.

Определение ИНМ. ИНМ B есть набор упорядоченных троек на универсуме X:

$$B = \left\{ (u, \mu_B(u), \nu_B(u)) \middle| u \in X \right\}, \tag{3}$$

где функция принадлежности $\mu_B(u)$ элемента u множеству B такая, что $\mu_B : X \to [0,1]$, а функция непринадлежности $\nu_B(u)$ элемента u множеству B такая, что $\nu_B : X \to [0,1]$. Из данного определения следует, что $\mu_B(u)$ и $\nu_B(u)$ принимают значения на отрезке $[0,1]$, причем для любого $u \in X$ имеет место быть неравенство [13–15]:

$$0 \le \mu_B(u) + \nu_B(u) \le 1. \tag{4}$$

Укажем, что $\mu_B(u)$ устанавливает степень или меру принадлежности множеству B, а $\nu_B(u)$ устанавливает степень или меру непринадлежности множеству B. Тогда степень нерешительности (hesitation degree) ИНМ B или интуиционистский нечеткий индекс η_B ИНМ B определяется следующим образом:

$$\eta_B = 1 - (\mu_B(u) + \nu_B(u)), \tag{5}$$

При этом $\eta_B : X \to [0,1]$. Если $\mu_B(u) + \nu_B(u) = 1$, то согласно (5) $\eta_B = 0$. Это значит, что ИНМ B становится НМ. Исходя из этого, можно заключить, что НМ есть частный случай ИНМ.

Определение ПНМ. ПНМ есть набор упорядоченных троек на универсуме X:

$$A = \left\{ (u, \mu_A(u), \nu_A(u)) \middle| u \in X \right\}, \tag{6}$$

где функция принадлежности $\mu_A : X \to [0,1]$ и функция непринадлежности $\nu_A : X \to [0,1]$ для всех $u \in X$ связаны между собой неравенством:

$$0 \le \mu_A^2(u) + \nu_A^2(u) \le 1. \tag{7}$$

Обозначим степень нерешительности ПНМ A или пифагоров нечеткий индекс (Pythagorean fuzzy index (PFI)) ПНМ A через π_A. Тогда согласно (5), (7) пифагоров нечеткий индекс (ПНИ) π_A для $\forall u \in X$ находится следующим образом:

$$\pi_A = \sqrt{1 - \mu_A^2(u) - \nu_A^2(u)}, \tag{8}$$

при этом $\pi_A : X \to [0,1]$. Из (8) следует, что $\pi_A^2 + \mu_A^2(u) + \nu_A^2(u) = 1$. Если в этом равенстве $\pi_A = 0$, тогда $\mu_A^2(u) + \nu_A^2(u) = 1$. В табл. 1 показана сравнительная характеристика между ИНМ B (2) и ПНМ A (5).

Определение ПНЧ. Если задано ПНМ A (6), в котором функции принадлежности μ_A и непринадлежности ν_A удовлетворяют (7), а ПНИ π_A удовлетворяет (8), тогда говорят, что пара (μ_A, ν_A) есть ПНЧ. Обозначим эту пару через α:

$$\alpha = (\mu_A, \nu_A). \tag{9}$$

ПНЧ (9) характеризуется функцией оценки (score function) $S(\alpha)$, а также функцией точности (accuracy function) $H(\alpha)$ [3, 4]:

$$S(\alpha) = 0,5(1 + \mu_A^2 - \nu_A^2), \tag{10}$$

$$H(\alpha) = \mu_A^2 + \nu_A^2. \tag{11}$$

ТАБЛИЦА I. Сравнение ИНМ B и ПНМ A

ИНМ *B*	ПНМ *A*
1	**2**
$0 \le \mu_B(u) + \nu_B(u) \le 1$	$0 \le \mu_A^2(u) + \nu_A^2(u) \le 1$
$\eta_B = 1 - (\mu_B(u) + \nu_B(u))$	$\pi_A = \sqrt{1 - \mu_A^2(u) - \nu_A^2(u)}$
$\eta_B + \mu_B(u) + \nu_B(u) = 1$	$\pi_A^2 + \mu_A^2(u) + \nu_A^2(u) = 1$

Пусть заданы ПНЧ $\alpha_1 = (\mu_{A1}, \nu_{A1})$, $\alpha_2 = (\mu_{A2}, \nu_{A2})$. Согласно (10), (11) ПНЧ α_1 описывается $S(\alpha_1)$ и $H(\alpha_1)$:

$$S(\alpha_1) = 0,5(1 + \mu_{A1}^2 - \nu_{A1}^2), \tag{12}$$

$$H(\alpha_1) = \mu_{A1}^2 + \nu_{A1}^2. \tag{13}$$

Наряду с этим ПНЧ α_2 определяется $S(\alpha_2)$ и $H(\alpha_2)$:

$$S(\alpha_2) = 0,5(1 + \mu_{A2}^2 - \nu_{A2}^2), \tag{14}$$

$$H(\alpha_2) = \mu_{A2}^2 + \nu_{A2}^2. \tag{15}$$

Выполним сравнение ПНЧ α_1, α_2 по функциям μ_{A1} и μ_{A2}, а также ν_{A1} и ν_{A2} [4]:

$$\text{если } \mu_{A1} \ge \mu_{A2} \,\&\, \nu_{A1} \le \nu_{A2}, \text{ то } \alpha_1 \ge \alpha_2. \tag{16}$$

Проведем сравнение ПНЧ α_1 и α_2 по функциям $S(\alpha_1)$ (12), $S(\alpha_2)$ (14) [4]:

$$\text{Если } S(\alpha_1) > S(\alpha_2), \text{ то } \alpha_1 > \alpha_2; \tag{17}$$

$$\text{если } S(\alpha_1) < S(\alpha_2), \text{ то } \alpha_1 < \alpha_2. \tag{18}$$

В случае, когда $S(\alpha_1) = S(\alpha_2)$, тогда производится сравнение функций $H(\alpha_1)$ (13) и $H(\alpha_2)$ (15) [4]:

$$\text{если } H(\alpha_1) > H(\alpha_2), \text{ то } \alpha_1 > \alpha_2; \tag{19}$$

$$\text{если } H(\alpha_1) < H(\alpha_2), \text{ то } \alpha_1 < \alpha_2; \tag{20}$$

$$\text{если } H(\alpha_1) = H(\alpha_2), \text{ то } \alpha_1 = \alpha_2. \tag{21}$$

Учитывая (13) и (15), пифагоровы нечеткие индексы π_{A1}, π_{A2} ПНЧ α_1 и α_2 находятся из равенств:

$$H(\alpha_1) + \pi_{A1}^2 = 1; \tag{22}$$

$$H(\alpha_2)+\pi_{A2}^2=1. \qquad (23)$$

Сравнение (22), (23) приводит к следующему результату:

если $H(\alpha_1)>H(\alpha_2)$, то $\pi_{A1}<\pi_{A2}$ и $\alpha_1>\alpha_2$; (24)

если $H(\alpha_1)<H(\alpha_2)$, то $\pi_{A1}>\pi_{A2}$ и $\alpha_1<\alpha_2$; (25)

если $H(\alpha_1)=H(\alpha_2)$, то $\pi_{A1}=\pi_{A2}$ и $\alpha_1=\alpha_2$. (26)

Итак, (16) – (26) позволяют найти соотношения между ПНЧ α_1 и α_2, а также между ПНИ π_{A1},π_{A2}.

III. Оценка нечеткой загрузки процессоров

Определение загрузки процессора. Под загрузкой многопоточного многоядерного процессора понимается процент времени, в течение которого выполняется приложение или иное задание. Если этот процент времени представлен как ПНЧ (9), то будем говорить о нечеткой загрузке процессора.

Например, процессор для выполнения приложения предоставляет 100 % своих вычислительных ресурсов, но в процессе его исполнения используется только 88,8 % ресурсов. По определению ПНЧ (9), данный результат воспроизводится таким образом: $\alpha=(0.188,0.118)$. По формулам (10), (11) вычислим функции оценки и точности:

$$S(\alpha)=0.5(1+0.7885-0.0139)=0.8873;$$
$$H(\alpha)=0.7885+0.0139=0.8024.$$

По формуле (8) определим ПНИ π_A рассматриваемого ПНЧ:

$$\pi_A=\sqrt{1-0.8024}=\sqrt{0.1976}=0.4445.$$

Согласно табл. I имеем:

$$\pi_A^2+H(\alpha)=0.1976+0.8024=1.$$

В табл. II показаны результаты загрузки одного из первых четырехъядерных процессоров Intel Core 2 Quad Q6600 (2,4 ГГц, 4 потока) при выполнении многопоточного приложения 1, решающего уравнение Лапласа [10]. Многопоточность этого приложения реализована посредством OpenMP. В зависимости от количества потоков измерения производились с помощью команд gprof, time операционной системы (ОС) LINUX. Считаем, что затраченное время на исполнение приложения 1 только одним потоком, является базовым. По отношению к базовому 2-поточное исполнение приложения 1 позволило ускорить его работу в 3.1 раза, 4-поточное исполнение – уже в 7.5 раз, а 8-поточное – в 4.3 раза. Таким образом, результаты измерений показали максимальную загрузку процессора при 4-поточном исполнении приложения 1.

ТАБЛИЦА II. Выполнение приложения 1

Потоки	Linux time-Real	Linux time – % Change	Linux time-Speedup
1	2	3	4
1	98.275	Base	Base
2	31.440	-68.0%	3.1
4	13.174	-86.6%	7.5
8	22.805	-76.8%	4.3

Согласно формулам (7) – (11) расчеты функций оценки $S(\alpha_i)$ и точности $H(\alpha_i)$, а также π_i для нечеткой загрузки процессора при исполнении приложения 1 в зависимости от числа потоков представлены в табл. III. Для базового однопоточного исполнения приложения 1 имеем: $H(\alpha_1)=S(\alpha_1)=1$, $\pi_1=0$.

Отметим, что анализ нечеткой загрузки процессора, выполненный по $S(\alpha_i)$, $H(\alpha_i)$ и π_i является нечетким. Обозначим число потоков через I. Тогда для $\forall i(i=\overline{2,I})$ определим максимальное $S(\alpha_i)$ $(S_{\max}(\alpha_i))$, максимальное $H(\alpha_i)$ $(H_{\max}(\alpha_i))$ и минимальное π_i $(\pi_{i\min})$ по следующему алгоритму 1:

Шаг 1: Вычисление π_i по формуле (8).

Шаг 2: Вычисление $S(\alpha_i)$ по формуле (10).

Шаг 3: Вычисление $H(\alpha_i)$ по формуле (11).

Шаг 4: Нахождение $S_{\max}(\alpha_i)$ по соотношениям (17) – (21).

Шаг 5: Нахождение $\pi_{i\min}$ по соотношениям (24) – (26) одновременно влечет за собой определение $H_{\max}(\alpha_i)$ по тем же соотношениям.

Найденные по алгоритму 1 $S_{\max}(\alpha_4)$, $H_{\max}(\alpha_4)$, $\pi_{4\min}$ совместно указывают на максимальную нечеткую загрузку многоядерного процессора. Согласно табл. III максимальная нечеткая загрузка процессора производится при 4-поточном выполнении приложения 1, что соответствует данным табл. II.

Intel является первой компанией, которая реализовала концепцию одновременной многопоточности (Simultaneous Multithreading (SMT)), создав HT – технологию (Hyper – Threading Technology или HT – Technology). По этой технологии ОС рассматривает любое физическое ядро как два логических ядра, обеспечивая тем самым высокий уровень многозадачности. Другой инновацией Intel является использование big. LITTLE технологии, по которой высокопроизводительные P-ядра и энергоэффективные E-ядра с пониженным энергопотреблением располагаются на одном кристалле процессора. Так Intel Core i9 – 12900K, построенный на архитектуре Alder Lake, имеет на одном кристалле восемь высокопроизводительных P-ядер с HT-технологией и восемь энергоэффективных Е-ядер. Р-ядра рассматриваемого процессора являются 2-поточными, а Е – ядра - однопоточными. Таким образом, Intel Core i9-12900K имеет 24 потока (16 +8). Обратим внимание, что Alder Lake располагает аппаратной технологией Intel Thread Director, согласно которой производится телеметрический сбор данных о состоянии процессора и передача их ОС Windows11. Учитывая полученные данные, планировщик ОС принимает решение о распределении потоков по конкретным ядрам процессора.

ТАБЛИЦА III. НЕЧЕТКИЙ АНАЛИЗ ПРИЛОЖЕНИЯ 1

Потоки	α_i	$H(\alpha_i)$	$S(\alpha_i)$	π_i
1	2	3	4	5
1	α_1 $1.0, 0.0$	1	1	0
2	α_2 $0.68, 0.32$	0.56	0.68	0.66
4	α_3 $0.866, 0.134$	0.77	0.86	0.48
8	α_4 $0.768, 0.232$	0.64	0.77	0.60

Произведем анализ выполнения одних и тех же приложений на Р-ядрах, Е-ядрах и покажем загрузку Intel Core i9-12900K при совместном их использовании. Отметим, что во всех рассматриваемых случаях базовая частота процессора составляет 3.9 ГГц.

В табл. IV представлены результаты выполнения приложения 2. В соответствии с алгоритмами машинного обучения данное приложение производит классификацию изображений. Посредством приложения 2 выполнен анализ 2500 фотографий по таким тегам, как «автомобиль», «собака», «цветок». В табл.V показаны расчеты $S(\alpha_i)$, $H(\alpha_i)$ и π_i для проведения нечеткого анализа приложения 2 [11].

Обозначим минимальные значения функций оценки и точности соответственно через $S_{\min}(\alpha_i)$ и $H_{\min}(\alpha_i)$, а максимальное значение π_i через $\pi_{i\max}$. Тогда исходя из архитектурных решений Intel по концепции big. LITTLE нечеткий анализ выполнения приложения 2 на Р-ядрах или Е-ядрах может производиться по алгоритму 2:

Шаг 1: Выполнение алгоритма 1.

Шаг 2: Анализ ПНЧ α_i, соответствующего максимальному значению $S_{\max}(\alpha_i)$: если $\mu_i^2 - \nu_i^2 \to 1$, то приложение имеет максимальную нечеткую загрузку на Р-ядрах с НТ-технологией; при отключении НТ-технологии – на Р-ядрах; в противном случае переход к шагу 3.

Шаг 3: Определение $S_{\min}(\alpha_i)$, $H_{\min}(\alpha_i)$, $\pi_{i\max}$ по соотношениям (17) – (21), (24) – (26).

Шаг 4: Анализ ПНЧ α_i, соответствующего минимальному значению $S_{\min}(\alpha_i)$: $\mu_i^2 - \nu_i^2 \to 0$, при этом $S_{\min}(\alpha_i) \to 0,5$; приложение назначается на энергоэффективные Е-ядра.

ТАБЛИЦА IV. ВЫПОЛНЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ 2

Ядра	Реальное время выполнения, с.	Загрузка ядер, %	Ускорение, количество раз
1	2	3	4
Е-ядра	286.8	Base	1
8Р-ядра без НТ-технологии	228.6	-20.3%	1.25
8Р-ядра с НТ-технологией	28.1	-90.2%	10.2
Core i9 - 12900K	48.4	-83.12%	5.9

ТАБЛИЦА V. НЕЧЕТКИЙ АНАЛИЗ ПРИЛОЖЕНИЯ 2

Ядра	α_i	$H(\alpha_i)$	$S(\alpha_i)$	π_i
1	2	3	4	5
Е-ядра	α_1 $1.0, 0.0$	1	1	0
8Р-ядра без НТ - технологии	α_2 $0.2, 0.8$	0.7	0.2	0.55
8Р-ядра с НТ-технологией	α_3 $0.9, 0.1$	0.82	0.9	0.42
Core i9-12900K	α_4 $0.83, 0.17$	0.72	0.83	0.53

Найденные по алгоритму 2 для приложения 2 $S_{\max}(\alpha_3)$, $H_{\max}(\alpha_3)$, $\pi_{3\min}$ совместно указывают на максимальную нечеткую загрузку Р-ядер с НТ-технологией $(0.9^2 - 0.1^2 = 0.8 \to 1)$, что соответствует данным табл. III.

Приложение 3 реализует алгоритм сжатия данных WinRAR. В табл. VI представлены результаты выполнения этого приложения [11]. В табл.VII показаны расчеты $S(\alpha_i)$, $H(\alpha_i)$ и π_i для проведения нечеткого анализа приложения 3.

ТАБЛИЦА VI. ВЫПОЛНЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ 3

Ядра	Реальное время выполнения, с.	Загрузка ядер, %	Ускорение, количество Раз
1	2	3	4
Е- ядра	56.27	Base	1
8Р- ядра без НТ-технологии	27.38	-51.34 %	2.06
Core i9-12900K	20.65	-63.3%	2.7

В соответствии с шагом 2 алгоритма 2 для максимального ПНЧ α_3 определяется разность: $\mu_3^2 - \nu_3^2 = 0.63^2 - 0.37^2 = 0.26$. Согласно значению этой разности производится переход к шагу 3. На этом шаге определяются $S_{\min}(\alpha_2), H_{\min}(\alpha_2)$ и $\pi_{2\max}$. Выполним анализ $\alpha_2 : \mu_2^2 - \nu_2^2 = 0.51^2 - 0.49^2 = 0.02 \to 0.$ Следовательно, приложение 3 необходимо назначить на Е-ядра.

ТАБЛИЦА VII. НЕЧЕТКИЙ АНАЛИЗ ПРИЛОЖЕНИЯ 3

Ядра	α_i	$H(\alpha_i)$	$S(\alpha_i)$	π_i
1	2	3	4	5
Е-ядра	α_1 $1.0, 0.0$	1	1	0
8Р-ядра без НТ-технологии	α_2 $0.51, 0.49$	0.5	0.51	0.71
Core i9-12900K	α_3 $0.63, 0.37$	0.53	0.63	0.69

Нечеткий анализ загрузки ядер Intel Core i9-12900K показывает, что приложения, связанные с большим объемом вычислений в таких областях, как искусственный интеллект, машинное обучение, необходимо назначать на высокопроизводительные Р-ядра. В то же время, приложения, не связанные со значительными вычислениями, следует назначать на энергоэффективные Е-ядра. Сжатие данных является примером такого приложения. Обозначим нечеткую загрузку процессора через FP. Тогда по теории ПНЧ FP можно представить следующим образом: $FP = \{\alpha_i, S(\alpha_i), H(\alpha_{i/}), \pi_i\}$.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно теории ПНЧ функции оценки $S(\alpha_i)$ и точности $H(\alpha_i)$, а также пифагоров нечеткий индекс π_i позволяют сравнить выполнение приложений на ядрах процессоров, выполненных по технологии big.LITTLE. На примере архитектурного решения Intel Core i9-12900K показан алгоритм нечеткого анализа загрузки процессора для Р-ядер и Е-ядер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Т.8. №3. С. 338 – 353.

[2] Atanassov K.T. Intuitionistic Fuzzy Sets // VII ITKR's Session, Sofia, Central Science and Technical Library, Bulgarian Academy of Sciences 1697/84. 1983.

[3] Yager R.R. Pythagorean fuzzy subsets // Proceedings of joint IFSA World Congress and NAFIPS Annual Meeting, Edmonton. Canada. 2013. C. 57-61.

[4] Zhang X., Xu Z. Extension of TOPSIS to multiple criteria decision making with Pythagorean fuzzy sets // International Journal of Intelligent Systems. 2014. Т.29. №12. С. 1061-1078.

[5] Kachurin Yu.Yu., Kryukov A.V., Kananykhin O.A., Fedorinov A.V. Calculation of contrast for computer simulated resolution chart image // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Т. 2127. № 1.

[6] Dimitrienko Yu., Gubareva E., Tumanov A., Modeling of aeroelastic composite plates vibrations based on asymptotic theory // E3S Web of Conferences. 2023. Т. 376. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337601039

[7] Dimitrienko Yu., Zakharov A., Koryakov M. Simulation of energetic composite materials combustion // E3S Web of Conferences. 2023. Т. 376. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20233760101

[8] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. Simulation of Parameters of Plasma Dynamics of a Magneto Plasma Compressor // Applied Sciences (Switzerland). 2023. Т. 13. № 9. http://dx.doi.org/10.3390/app13095538

[9] Blinov A.S., Malastowski N.S., Myagkov L.L. Numerical simulation of transient heat transfer of a catalyst substrate // AIP Conference Proceedings. 2023. Т.2700. http://dx.doi.org/10.1063/5.0124919

[10] Prinslow G. Overview of Performance Measurement and Analytical Modeling Techniques for Multi – core Processors https://www.cse.wustl.edu/~jain/cse567-11/ftp/multcore/index.html

[11] Intel Core i9-12900K E-Cores Only Performance Review. 2021. №19. https://www.techpowerup.com/review/intel-core-i9-12900k-e-cores-only-performance