

1.5. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В СЕГМЕНТЕ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ СУПЕРКОМПЬЮТЕРОВ

Варшавский Л. Е., ЦЭМИ РАН, г. Москва, Россия

В статье исследуется динамика структуры парка высокопроизводительных суперкомпьютеров из списка Top-500 по производительности и по используемой тактовой частоте процессоров. Рассматриваются сценарии роста производительности суперкомпьютеров США и Китая, построенные на основе разработанных эконометрических моделей.

1. Введение.

В настоящее время высокопроизводительные вычисления превратились в важную отрасль, обслуживающую все основные направления науки и экономики. Практически все крупные компании используют суперкомпьютеры как для повышения своего научно-производственного потенциала, так и для повышения экономической эффективности принимаемых решений. Суперкомпьютеры используются и в режиме оперативного управления производственными процессами (в частности, при создании и эксплуатации «цифровых близнецов»), при управлении мультиагентными системами в экономике и технике в режиме реального времени, а также при планировании [Макаров и др., 2022].

Суперкомпьютеры являются важным средством укрепления военного потенциала и национальной безопасности, способствующим повышению эффективности различных видов вооружений (ядерного, ракетно-космического и др.), а также систем связи и шифрования.

Всё это обуславливает актуальность исследования перспектив развития суперкомпьютерной техники, а также стратегий её развития в ведущих странах. В статье проводится анализ динамики структурных изменений в парке высокопроизводительных суперкомпьютеров из списка Top-500 по таким показателям, как производительность и тактовая частота процессоров. Исследуются сценарии роста производительности суперкомпьютеров США и Китая, построенные на основе разработанных эконометрических моделей.

2. Моделирование структуры парка высокопроизводительных суперкомпьютеров по производительности

Переход к новому поколению высокопроизводительной техники во многих случаях сопровождается стабилизацией структуры различных типов оборудования по производительности. Так, в частности,

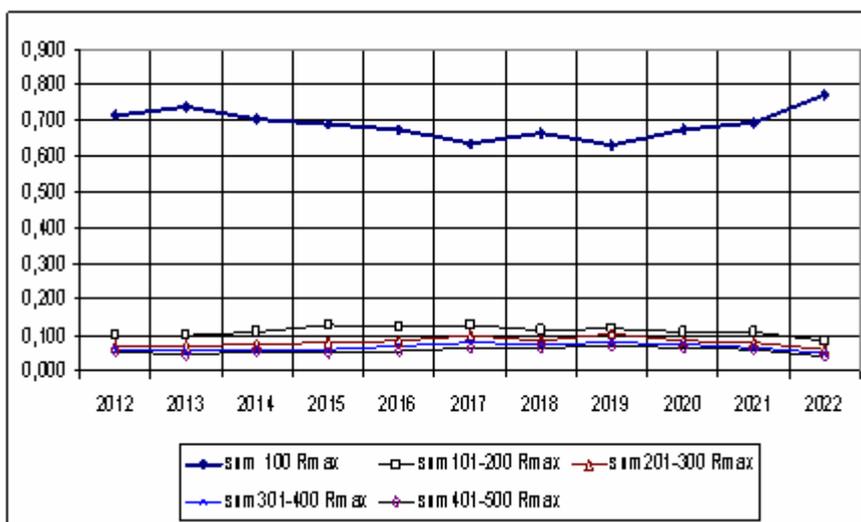


Рис. 1. Динамика доли 5 групп суперкомпьютеров в списке Top-500, где первая группа охватывает наиболее мощные суперкомпьютеры (1–100), вторая—менее мощные (101–200), остальные три— суперкомпьютеры с порядковыми номерами, соответственно 201–300, 301–400, 401–500. (построено по данным <https://top500.org>).

происходило в энергетике (в традиционной и атомной) и в авиации. Так происходит и в отрасли высокопроизводительных вычислений. По мере освоения петафлопсной производительности, за период с 2013 по 2019 г. происходило некоторое уменьшение доли группы-100 наиболее производительных суперкомпьютеров в списке 500 наиболее производительных суперкомпьютеров (Top-500, <https://top500.org>). Однако с 2020 г., в связи с резким ростом производительности суперкомпьютеров-чемпионов и переходом к эксафлопсной

эре, началось увеличение этой доли (с 63% в 2019 г. до 77% в 2022 г., рис.1). Похожая динамика имела место в соотношении между суммарными производительностями группы¹ из первых 100 суперкомпьютеров и группы из последних 100 наименее мощных устройств (рис. 2).

Для оценки выравнивания и однородности структуры количественных показателей суперкомпьютеров может быть использован показатель энтропии:

$$H_t = - \sum_{i=1}^5 s_i \text{LN}(s_i), \tag{1}$$

где s_i — доля i -ой группы суперкомпьютеров в исследуемом суммарном показателе.

В настоящей работе для оценки изменения структуры производительности суперкомпьютеров R_{\max} по данным июньских выпусков <https://top500.org> построена агрегированная модель, основанная на использовании связи между темпом роста производительности суперкомпьютеров-чемпионов и непосредственно энтропией:

$$H_t = \frac{\alpha_0 H_{t-1}}{1 + \alpha_1 H_{t-1}} + \gamma \text{LN}(R_{\max t} / R_{\max t-1}). \tag{2}$$



Рис. 2. Динамика соотношения между суммарными производительностями группы из первых 100 суперкомпьютеров и группы из последних 100 наименее мощных устройств в списке Top 500 (построено по данным (<https://top500.org>))

Оценки параметров модели, полученные с использованием нелинейного метода наименьших квадратов (МНК), составляют: $a_0=4.297$; $a_1=2.705$; $\gamma=-0.291$, а коэффициент вариации — 0.062. Равновесное значение энтропии при нулевом входе составляет $H_\infty = 1.219$, что соответствует доле 1-ой группы, равной 0.527. Положение равновесия является устойчивым, что свидетельствует о возможной стабилизации структуры за счёт приближения производительности менее мощных суперкомпьютеров к производительности суперкомпьютеров первой группы при исчерпании повышения мощности суперкомпьютеров-чемпионов в отдаленной перспективе.

Расчеты на перспективу при сценарии роста производительности суперкомпьютера-рекордсмена до 10 и 100 эксафлопс (10^{18} флопс) в 2025 и 2030 гг., соответственно (такие уровни являются целевыми для разработчиков национальных лабораторий США²), показывают, что в связи с резким увеличением производительности суперкомпьютеров-чемпионов в начальный период (со среднегодовым темпом роста 2.09) происходит снижение энтропии. Затем, по мере уменьшения темпов роста производительности суперкомпьютеров-чемпионов (до 1.58), энтропия увеличивается (рис. 3). Иными словами, в период повышенного темпа роста производительности суперкомпьютера-рекордсмена происходит повышение концентрации вычислительных мощностей в первой группе, а в дальнейшем, по мере снижения темпа роста — некоторое снижение.

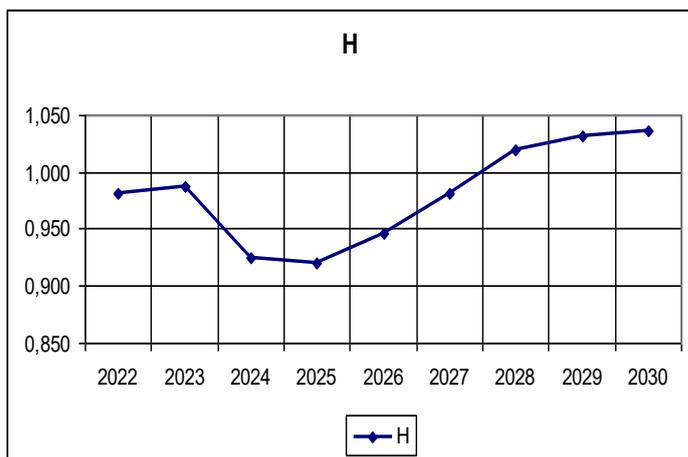


Рис. 3. Прогнозная динамика энтропии (1), рассчитанная на основе модели (2)

¹ В соответствии с индексом Linpack — R_{\max} , характеризующим скорость решения линейных уравнений большой размерности.

² <https://www.nextplatform.com/2022/06/30/so-you-think-you-can-design-a-20-exaflops-supercomputer/>

3. Исследование структуры парка высокопроизводительных суперкомпьютеров ведущих стран по тактовой частоте процессоров

Тактовая частота процессоров, используемых в суперкомпьютерах, является одним из важных факторов, определяющих быстродействие этих устройств. До начала 2000-х гг., пока возможно было обеспечивать пропорциональное уменьшение топологических размеров микросхем и тактовой частоты (в этом состоит так называемое правило Деннарда), инженерам удавалось добиваться роста производительности устройств, главным образом, за счет их миниатюризации и увеличения частоты [Dennard, 1974]. Однако уже в середине первого десятилетия XXI века, из-за обострения проблемы отвода тепла и возникновения в чипах токов утечки (как из-за работы на высоких частотах, так и за счет проявления квантовых эффектов, в частности, туннельного эффекта [Варшавский 2013] [Варшавский 2022b]), рост производительности микросхем и компьютеров в целом стал связываться с увеличением числа ядер в процессорах.

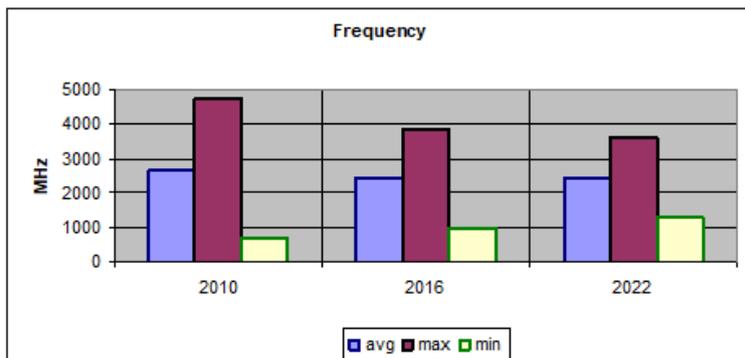


Рис. 4 Динамика средней (avg), максимальной (max) и минимальной (min) тактовой частоты в МГц, используемой в суперкомпьютерах из списка Top-500 (построено по данным <http://top500.org>)

Показательной является судьба микропроцессора Tejas, разработанного компанией Intel. Тактовую частоту процессора предполагалось повысить к 2010 г. до 10–15 ГГц. Однако из-за повышенного тепловыделения Intel в 2005 г. объявил об отказе от производства микропроцессора Tejas и в 2006 г. перешел к выпуску двухядерного процессора Core³, а впоследствии — многоядерных процессоров [3, 4] (впоследствии было установлено, что имеет место степенная зависимость потребляемой процессором мощности от его тактовой частоты [Митропольский, 2015], [Варшавский 2022b]).

Переход к многоядерности, обеспечивающий параллелизм и ускорение вычислений, существенно сдерживает увеличение частоты, ведущей к росту потребления энергии и увеличению тепловыделения⁴.

В связи с вышеуказанными проблемами, средняя тактовая частота процессоров, используемых в высокопроизводительных суперкомпьютерах, за последние годы стабилизировалась на уровне 2427 МГц. В то же время, за период с 2010 по 2022 г. максимальная используемая частота снизилась с 4700 МГц до 3600 МГц, а минимальная частота — повысилась с 700 МГц до 1300 МГц (рис. 4). Интересно отметить, что в 2005 минимальная используемая частота в суперкомпьютерах из списка Top-500 составляла 333 МГц.

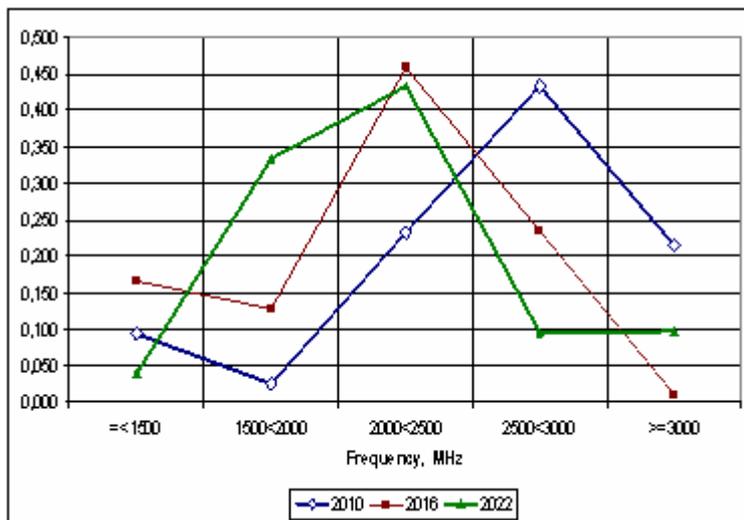


Рис. 5 Удельный вес суперкомпьютеров с различными диапазонами тактовой частоты процессоров в МГц в общем списке top500 (построено по данным <http://top500.org>)

Если в 2010 г. максимальная доля суммарной производительности Rmax суперкомпьютеров из списка Top-500 приходилась на диапазон частот 2500–3000 МГц, то в 2016 и 2022 г. — на диапазон частот 2000–2500 МГц. При этом доля суммарной производительности суперкомпьютеров, использующих диапазон частот 1500–2500 МГц, повысилась с 0.258 в 2010 г. до 0.767 в 2022 г. (рис. 5).

Вместе с тем, в ряде наиболее мощных суперкомпьютеров используются тактовые частоты как до 1500 МГц (китайский Sunway с частотой 1450 МГц), так и свыше 3000 МГц (американские Summit и Sierra, с частотами соответственно 3070 и 3100 МГц). Естественно, что одним из главных средств достижения высокой производительности суперкомпьютеров при использовании низких тактовых частот является увеличение числа процес-

³ URL: <http://pe4.info/1-7.php> (Дата обращения -1.03.2002).

⁴ URL: <https://www.nextplatform.com/2023/01/19/more-cpu-cores-isnt-always-better-especially-in-hpc/> (Дата обращения 21.01.2023).

сорных ядер. Так, в суперкомпьютере Sunway производительностью 93 Петафлопс свыше 10.8 млн. ядер, в то время, как в суперкомпьютерах Summit и Sierra производительностью, соответственно, 148.6 и 94.6 Петафлопс — 1.57 и 1.41 млн. ядер (эти суперкомпьютеры входят в первую десятку из списка Top-500). Следует отметить, что в наиболее производительных американских суперкомпьютерах большая часть ядер (свыше 90%) приходится на ускорители (в основном на графические процессоры GPU), характеризующиеся повышенным потреблением энергии по сравнению с центральными процессорами (CPU). Во многом с этим связано то, что суперкомпьютеры Summit и Sierra, использующие повышенные тактовые частоты, характеризуются не самой высокой энергоэффективностью (по данным <http://top500.org> за май 2022 г., соответственно, 14.72 и 12.72 гигафлопс/Вт).

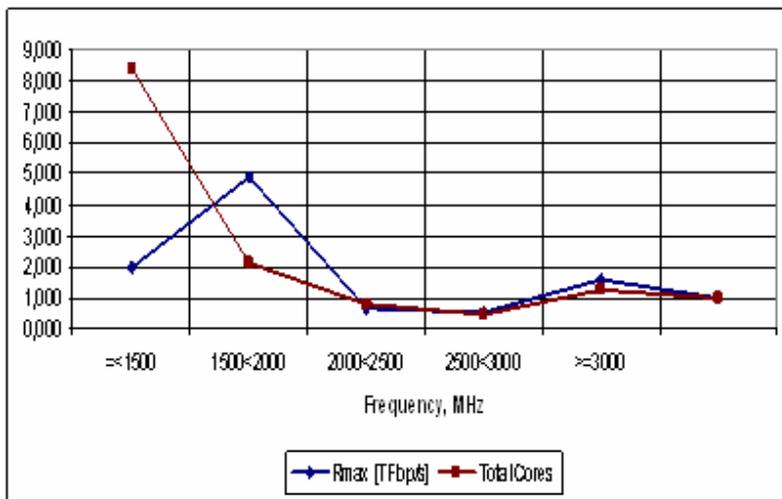


Рис. 6. Эластичности суммарных производительности (R_{max}) и числа ядер (Total Cores) суперкомпьютеров в списке top500 при различных диапазонах тактовой частоты процессоров в МГц (построено по данным <http://top500.org>)

листов, повышение быстродействия устройств оперативной памяти, в частности, памяти с высокой пропускной способностью (high bandwidth memory — HBM) ⁴.

4. Исследование динамики производительности высокопроизводительных суперкомпьютеров ведущих стран (на примере США и Китая)

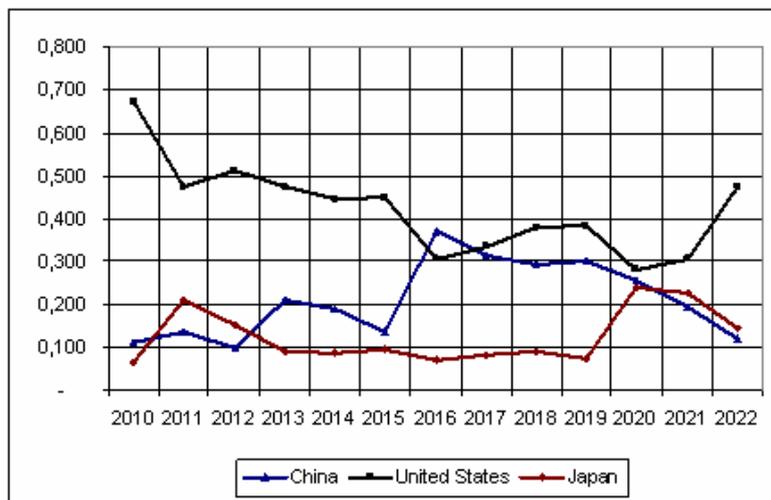


Рис. 7 Динамика доли суперкомпьютеров 3-х стран в общей производительности 500 самых высокопроизводительных суперкомпьютеров (без учета 2-х эксафлопсных суперкомпьютеров Китая, введенных в 2021 г., и не включенных в список Top-500; построено по данным <http://top500.org>).

наиболее производительных суперкомпьютеров устойчиво повышалась с 29% до почти 54%, а Китая — устойчиво снижалась с 36% до 4,5%. В 2022 г.в эту группу входило 33 американских суперкомпьютеров, в то время, как китайских — всего 2.

На рис.6 по данным майского выпуска <http://top500.org> за 2022 г. приведены зависимости эластичностей суммарных производительности и числа ядер суперкомпьютеров, использующих разные частоты (т.е. отношение долей суммарных производительности и числа ядер к долям числа суперкомпьютеров в списке Top-500, использующих разные частотные диапазоны).

В связи с исчерпанием возможности повышения тактовой частоты процессоров и высокой энергоемкостью процессоров-ускорителей, в настоящее время одним из способов повышения производительности и энергоэффективности суперкомпьютеров

считается, по мнению специалистов, в частности, памяти с высокой пропускной способностью (high bandwidth memory — HBM) ⁴.

В рейтингах высокопроизводительных суперкомпьютеров Top-500 большая часть суммарной производительности этого оборудования (примерно 3/4), измеряемой индексом Linpack (R_{max}), традиционно приходится на 3 страны: США, Китай и Японию (рис. 7). В последнее десятилетие началась острая конкуренция за лидерство в исследуемой области между указанными странами и, прежде всего, между США и Китаем.

Суперкомпьютеры этих стран попеременно занимают первое место по производительности в списке Top-500. Интересно отметить, что за период с 2016 по 2022 г. доля США в суммарной производительности группы из 100

Особый интерес представляет развитие суперкомпьютерных технологий в Китае, успешно осуществляющего импортозамещение в рамках своей программы. Первые суперкомпьютеры производились на основе импортных компонентов. В начале 2010-х гг. китайский суперкомпьютер производительностью более 1 Петафлопс стал наиболее мощным в списке Top-500. В последующие годы ведущее место в указанных рейтингах попеременно занимали китайские суперкомпьютеры с процессорами собственной архитектуры и производства, а также американские и японские. В значительной степени китайским инженерам удалось добиться импортозамещения основных компонентов. Особенность последних моделей китайских суперкомпьютеров-чемпионов состоит в использовании десятков тысяч процессоров, включающих в себя сотни ядер, с относительно небольшой тактовой частотой. В одном из последних суперкомпьютеров эксафлопсной производительности (Sunway Oceanlite), который Китай, стремясь избежать дополнительных санкций США, не включил в список Top-500, используются процессоры с 390 ядрами (общее число ядер в системе составляет порядка 40 млн.), работающими с тактовой частотой 1.45 ГГц. Использование сравнительно низкой тактовой частоты позволяет несколько компенсировать повышенный расход энергии и выделение тепла, связанных с резким увеличением числа ядер 5, [Варшавский, а].

Следует отметить, что в настоящее время процессоры с такой частотой используются в относительно небольшом числе суперкомпьютеров (в 2022 г. в 6% из списка Top-500).

Большая часть высокопроизводительных вычислительных систем использует процессоры с частотами в диапазоне 2–3 ГГц (см. п. 3). Переход к архитектуре с повышенным числом ядер в наиболее мощных китайских суперкомпьютерах связан, в частности, со стремлением избежать санкций США на поставку процессоров повышенной производительности (включая процессоры-ускорители, в т.ч. на основе графических процессоров), а также оборудования для производства микросхем с малым топологическим размером (14 нм и меньше).

В настоящей работе на основе данных из <http://top500.org>, а также с учетом ввода в 2021 г. двух китайских эксафлопсных суперкомпьютеров, не вошедших в Top-500, разработано несколько вариантов модели гонки производительности высокопроизводительных суперкомпьютеров США и Китая.

Так, один из вариантов представляет собой модель векторной авторегрессии VAR вида:

$$\begin{pmatrix} X_{1t} \\ X_{2t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{1,t-1} \\ X_{2,t-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi_{1t} \\ \xi_{2,t-1} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $X = \begin{pmatrix} x_{it} \\ x_{it-1} \end{pmatrix}$ — векторы, составленные из натуральных логарифмов суммарных производительностей суперкомпьютеров США ($i=1$) и Китая ($i=2$), A, B — матрицы и векторы соответствующей размерности ($i=1,2$), ξ_{it} — натуральный логарифм производительности суперкомпьютера-чемпиона в году t ,

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 2\lambda_1 & -\lambda_1^2 & 0 & a_{21} \end{pmatrix}, \quad A_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{12} & 0 & 2\lambda_2 & -\lambda_2^2 \end{pmatrix}, \quad B_i = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ b_{i1} & b_{i2} \end{pmatrix}; \quad (4)$$

На основе нелинейного МНК получены следующие оценки параметров векторной авторегрессии (3)–(4):

$$\lambda_1=0.882; \quad a_{21}=0.000; \quad \lambda_2=0.847; \quad a_{12}=0.0455; \quad b_{11}=0.417; \quad b_{12}=0.423; \quad b_{21}=b_{22}=0.000.$$

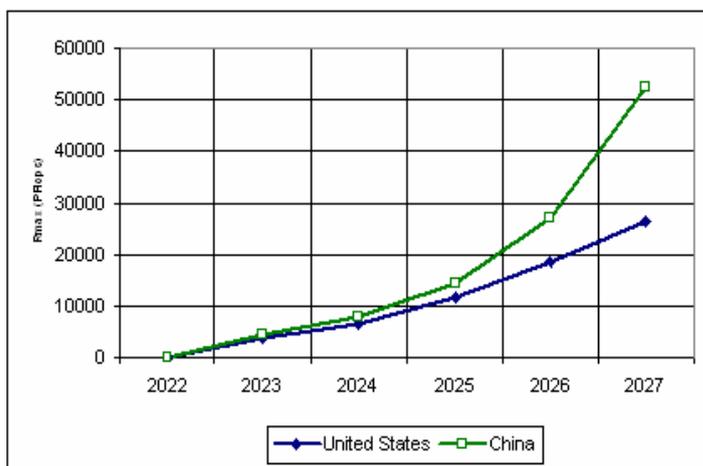


Рис. 8 Динамика суммарной производительностей суперкомпьютеров США и Китая, рассчитанная на основе модели (3)–(4).

Структура матриц построенной модели (3)–(4) свидетельствует о том, что можно попытаться получить необходимые динамические соотношения путём раздельного оценивания динамики взаимосвя-

Коэффициенты вариации для зависимостей с переменными x_{it} составили 0.044 (при $i=1$) и 0.071 (при $i=2$). На рис. 8 приведен прогнозный сценарий динамики суммарной производительности суперкомпьютеров на 5-летний период при условии роста производительности суперкомпьютеров-чемпионов до 10 эксафлопс в 2025 г. и далее до 100 эксафлопс в 2030 г. Расчеты по этой модели показывают, что уже в 2025 г. суммарная производительность суперкомпьютеров Китая может составлять 14.4 эксафлопс, а США — 11.8 эксафлопс. В 2027 г. суммарная производительность китайских суперкомпьютеров будет в 2 раза выше американских.

⁵ <https://www.tomshardware.com/news/two-chinese-exascale-supercomputers> (Дата обращения 15.07.2022).

зей для США и Китая. Другая построенная нами модель состоит из двух распределенных запаздываний, связывающих: 1). натуральные логарифмы производительности суперкомпьютера-чемпиона ξ_{1t} (входная переменная) и суммарной производительности суперкомпьютеров США x_{1t} ; 2). суммарные производительности суперкомпьютеров Китая x_{2t} и США x_{1t} (входная переменная). Эти распределенные запаздывания имеют следующий вид:

$$x_{1t} = 2\lambda_{11} x_{1t-1} - \lambda_{11}^2 x_{1t-2} + b_{11} \xi_{1t} + b_{12} \xi_{1t-1} \quad (5)$$

$$x_{2t} = 2\lambda_{22} x_{2t-1} - \lambda_{22}^2 x_{2t-2} + a_{21} x_{1t-1}. \quad (6)$$

На основе нелинейного МНК получены следующие оценки параметров распределенных запаздываний (5)–(6): $\lambda_{11}=0.812$; $b_{11}=0.524$; $b_{12}=-0.501$; $\lambda_{22}=0.835$; $a_{21}=0.503$, причём коэффициенты вариации для $x_{i,t}$ составили, соответственно, 0.040 и 0.073.

На рис. 9 приведен прогнозный сценарий динамики суммарной производительности суперкомпьютеров на 5-летний период при таком же сценарии роста производительности суперкомпьютеров-чемпионов, как и для предыдущей модели. Расчеты показывают, что при действии зависимостей (5)-(6) в перспективе, уже в 2025 г. суммарные производительности суперкомпьютеров в США и Китае будут составлять, соответственно, 14.8 и 12.2 экзафлопс, а в 2027 г. — примерно по 45 экзафлопс, после чего начнётся существенное превышение производительности китайских суперкомпьютеров.

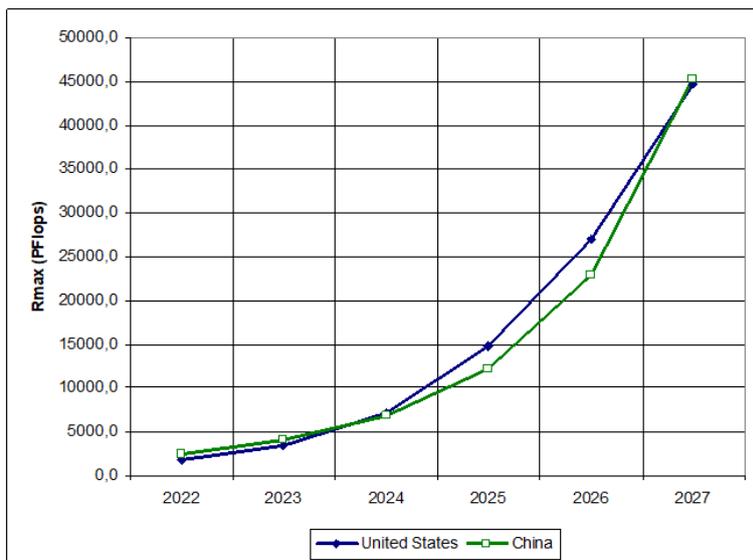


Рис. 9. Динамика суммарной производительностей суперкомпьютеров США и Китая, рассчитанная на основе модели (5)–(6).

Другая построенная нами модель состоит из двух распределенных запаздываний, связывающих: 1). натуральные логарифмы производительности суперкомпьютера-чемпиона в списке Top-500 ξ_{1t} (входная переменная) и суммарной производительности суперкомпьютеров США x_{1t} ; 2). натуральные логарифмы производительности суперкомпьютера-чемпиона Китая ξ_{2t} (входная переменная) и сум-

марной производительности суперкомпьютеров Китая x_{2t} . Эти распределенные запаздывания имеют следующий вид:

$$x_{1t} = 2\lambda_{11} x_{1t-1} - \lambda_{11}^2 x_{1t-2} + b_{11} \xi_{1t} + b_{12} \xi_{1t-1} \quad (7)$$

$$x_{2t} = 2\lambda_{22} x_{2t-1} - \lambda_{22}^2 x_{2t-2} + b_{21} \xi_{2t} + b_{22} \xi_{2t-1}. \quad (8)$$

На основе нелинейного МНК получены следующие оценки параметров распределенных запаздываний:

$$\lambda_{11}=0.812; b_{11}=0.524; b_{12}=-0.501; \lambda_{22}=0.628; b_{21}=0.450; b_{22}=-0.252,$$

причём коэффициенты вариации для уравнений (7) и (8) составили, соответственно, 0.040 и 0.062. На рис. 10 приведен прогнозный сценарий динамики суммарной производительности суперкомпьютеров на 5-летний период при таком же сценарии роста производительности суперкомпьютеров-чемпионов ξ_{1t} в модели (5), как и для предыдущей модели. В то же время в модели (8) принимались прогнозные значения входной переменной ξ_{2t} , соответствующие возможностям суперкомпьютеров с многоядерной архитектурой типа Sunway Oceanlite (оцененным экспертно), равные в 2025 г. 4 экзафлопс (при числе ядер 80 млн.), и в 2030 г. 7 экзафлопс (при числе ядер 100 млн.)⁶. Расчеты показывают, что при действии зависимостей (7)-(8) в перспективе, уже в 2025 г. суммарные производительности суперкомпьютеров в США и Китае будут составлять, соответственно, 14.8 и 23.5 экзафлопс, а в 2027 г. — 45 и 69 экзафлопс, после чего продолжится усиление отрыва суммарной производительности суперкомпьютеров Китая от США.

⁶ По некоторым оценкам максимальная производительность китайского суперкомпьютера-чемпиона с многоядерной архитектурой процессоров может составить только 4 экзафлопс, и то без учета последних санкций США, введенных в октябре 2022 года.

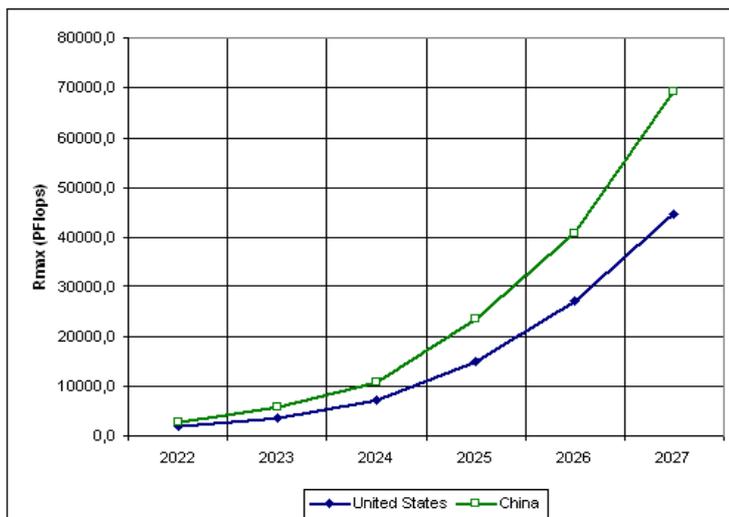


Рис. 10. Динамика суммарной производительностей суперкомпьютеров США и Китая, рассчитанная на основе модели (7)–(8).

5. Выводы

Проведенный анализ показывает, что значительные структурные сдвиги в производительности суперкомпьютеров из списка 500 происходят в моменты ввода суперкомпьютеров-чемпионов. В дальнейшем краткосрочном периоде происходит выравнивание структуры суперкомпьютеров по производительности.

За последние 15 лет по мере роста производительности и числа ядер произошло существенное сужение диапазона используемой в суперкомпьютерах тактовой частоты,

Использование различных построенных эконометрических моделей в прогнозных сценариях роста суммарной производительности наиболее мощных суперкомпьютеров разных стран приводит к разным результатам. В связи с возможностью резких изменений производительности суперкомпьютеров-чемпионов уже в ближайшие 3–5 лет, а также с возможностью введения разного рода санкций, эконометрический подход целесообразно объединять с экспертными оценками.

Литература

1. Варшавский Л.Е. Проблемы повышения энергоэффективности аппаратных средств в области информационных технологий//Труды ИСА РАН. 2013. т. 63. вып. 3. С. 3–19.
2. Варшавский Л.Е. а. Экономико-статистический анализ тенденций развития суперкомпьютеров//Концепции, 2022, №1 (41), с.70–77.
3. Варшавский Л.Е. б. Социально-экономические проблемы развития информационно-коммуникационных технологий (ИКТ).– М.: ЦЭМИ РАН, 2022. – с.158.
4. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д., Сидоренко М.Ю., Хабриев Б.Р. Суперкомпьютерные технологии в общественных науках М.: Департамент научных изданий, ГАУГН, 2022. – 386 с. ISBN 978-5-604-80427-8.
5. Митропольский Ю.И. Элементная база и архитектура будущих суперкомпьютеров//Микроэлектроника. 2015.—Том 44.—№3, с. 163–179.
6. Dennard R. H., Gaensslen F. H., Yu H-N, Rideout V.I., Bassous E., and LeBlanc A. R., Design of ion-implanted MOSFET's with very small physical dimensions// IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1974. SC-9, pp. 256–268.

References in Cyrillics

1. Varshavskij L.E. Problemy povysheniya jenergojeffektivnosti apparatnyh sredstv v oblasti informacionnyh tehnologij//Trudy ISA RAN. 2013. t. 63. vyp. 3. S. 3–19.
2. Varshavskij L.E. a. Jekonomiko-statisticheskij analiz tendencij razvitija superkomp'juterov//Konceptii, 2022, #1 (41), s.70–77.
3. Varshavskij L.E. b. Social'no-jekonomicheskie problemy razvitija informacionno-kommunikacionnyh tehnologij (IKT).– M.: CJeMI RAN, 2022. – s.158.
4. Makarov V.L., Bahtizin A.R., Sushko E.D., Sidorenko M.Ju., Habriev B.R. Superkomp'juternye tehnologii v obshhestvennyh naukah M.: Departament nauchnyh izdaniy, GAUGN, 2022. – 386 s. ISBN 978-5-604-80427-8.
5. Mitropol'skij Ju.I. Jelementnaja baza i arhitektura budushhih superkomp'juterov//Mikrojelektronika. 2015.—Tom 44.—#3, s. 163–179.

Ключевые слова

Суперкомпьютеры, структура, эконометрические модели.

Варшавский Леонид Евгеньевич – д.э.н., главный научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Центральный экономико-
математический институт Российской академии наук"
г. Москва, Россия. E-mail: hodvar1@gmail.com

Leonid Varshavsky. Modeling the dynamics of the structure and performance of high-performance supercomputers.

Keywords

Supercomputers, structure, econometric models

DOI: 10.34706/DE-2023-01-05

JEL classification C02 – Математические методы; M15 Управление информационными технологиями.

Abstract.

The article discusses the dynamics of the structure and performance of a fleet of high-performance supercomputers from the Top 500 list. Econometric models of the interrelated development of the performance of supercomputers in the USA and China are considered. The predictive properties of several econometric models constructed in the work are investigated. The structure of the fleet of high-performance supercomputers is analyzed by the processor clock frequency used.