

МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ В СИСТЕМАХ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

Клименко А.Б.

Российский государственный гуманитарный университет, Москва, Россия

Anna_klimenko@mail.ru

Аннотация. В данной работе предложена детерминированная модель распределения вычислительных ресурсов, содержащая параметры ресурсной стоимости транзита данных и процесса планирования, что позволяет повысить точность оценивания эффективности процесса планирования вычислений.

Ключевые слова: распределенные вычисления, краевые вычисления, оптимизация, распределение ресурсов, ресурсная стоимость планирования, моделирование распределения ресурсов.

Введение

В настоящее время продолжается интенсивная интеграция Интернета Вещей и краевых вычислений, что позволяет сократить нагрузку на сетевую инфраструктуру, а также время обработки данных. Однако, учитывая постоянный прирост не только объемов данных, но и приложений, вопрос планирования вычислений и распределения вычислительных ресурсов по-прежнему актуален, несмотря на широкий круг публикаций по данной тематике [1-5]. В целом, могут быть выделены два основных направления в рамках планирования вычислений/распределения вычислительных ресурсов [6]:

1. Статическое – данные о вычислительной задаче заранее известны и неизменны в процессе планирования;

2. Динамическое – соответственно, данные могут меняться.

Также по признаку применяемых алгоритмов выделяют основные направления:

1. Простые эвристики (best fit, FCFS, EFT, HEFT и др.), которые реализуют жадные стратегии [7-8];

2. Метаэвристики, которые реализуют циклическое применение эвристических правил и вероятностное принятие результатов, что в целом позволяет избегать локальных минимумов оптимизируемой целевой функции [9-11].

Используемые в рамках статического планирования модели распределения ресурсов также можно разделить на следующие основные направления:

1. задачи оптимизации в рамках теории расписаний (целочисленное или смешанно-целочисленное программирование) [12, 13];

2. задачи упаковки [14].

В рамках данной работы рассматривается сценарий, когда обработка данных осуществляется сообществом автономных вычислительных узлов, в пределах которого расположены планировщик и источник данных. Соответственно, процессы планирования и приема-передачи данных в рамках сообщества имеют ресурсную стоимость, которую следует учитывать. В противном случае при планировании вычислений появляются неучтенные ресурсные расходы, которые неявным образом влияют на результат планирования. Отметим, что ресурсные расходы на планирование и транзит данных важны в свете ресурсной ограниченности устройств [15, 16], поскольку превышение расходования ресурсов может быть причиной сокращения времени функционирования автономной системы и, следовательно, невыполнения поставленных задач.

Проведенный анализ источников показал, что в рамках детерминированных моделей статического планирования не представлены модели распределения вычислительных ресурсов, где бы производился учет как транзитной нагрузки на узлы при передаче данных, так и ресурсная стоимость процессов планирования и приема-передачи данных. Соответственно, целью данного исследования является разработка детерминированной модели распределения вычислительных ресурсов, которая бы позволяла учитывать перечисленное.

1. Описание функционирования сети

Будем полагать, что имеется некоторый фрагмент сети, где ресурсы каждого узла могут быть распределены для решения вычислительных задач, а эффективность распределения будет оценена путем использования выбранных показателей эффективности. Также будем полагать, что имеется два программных компонента – планировщик и источник данных, которые могут быть расположены произвольным образом на узлах, в том числе, могут быть расположены на одном узле, а также могут

перезапускаться на доступных узлах с целью обеспечения отказоустойчивости системы. Предполагается наличие планировщика и источника данных без уточнения их расположения. Источник данных получает данные и, возможно, код обработчика данных, что в дальнейшем будем называть вычислительной задачей (ВЗ). ВЗ может быть представлена контейнером либо виртуальной машиной. Планировщик планирует выполнение ВЗ с выделением некоторых вычислительных ресурсов доступных узлов. Также будем считать, что система функционирует в дискретном времени, и планировщик и источник данных в момент начала принятия решения о распределении вычислительных ресурсов обладают всеми данными о поступившей в систему ВЗ, кроме того, полагаем, что эти данные не изменяются до конца принятия решения о распределении вычислительных ресурсов. Временем обмена служебными данными между источником данных и планировщиком будем пренебрегать, полагая объем данных достаточно малым. После того, как планировщик осуществил выделение ресурсов, фрагменты ВЗ мигрируют на целевые узлы и там исполняются. Далее результаты собираются в источнике данных для отправки пользователю. На рис. 1 представлена графическая модель сети, которая состоит из 7 вычислительных узлов, при этом узел 1 является источником данных – получателем ВЗ, на узле 2 размещен планировщик ресурсов, а узлы 3-7 могут предоставлять вычислительные ресурсы для выполнения фрагментов ВЗ, если это предусмотрено.

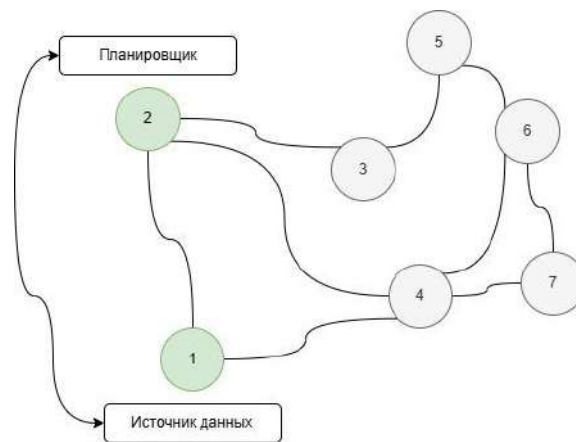


Рис. 1. Графическая модель сети

В процессе функционирования сети допускается изменение расположения планировщика и источника данных, что объясняется динамикой систем Интернета Вещей.

2. Модель распределения вычислительных ресурсов

Будем полагать, что имеется ЛПР, владеющее устройствами сети, и предоставляющее вычислительную среду для выполнения ВЗ обработки данных. Также будем считать, что ЛПР имеет возможность выбора критериев, по которым оценивается качество распределения вычислительных ресурсов. Критерии поделены на два условных множества – общие для сети устройств и индивидуальные, относящиеся к распределению ресурсов конкретного устройства.

Множества общих и индивидуальных для узлов критериев эффективности распределения вычислительных ресурсов (РВР) формализуем следующим образом.

- множество общих критериев эффективности распределения задач S_0 ,
- множество индивидуальных критериев эффективности распределения задач, специфичные отдельным узлам: P_0 .

Множества S_0 и P_0 формируются на основании предварительно сформулированных и нормализованных критериев, и потенциально могут быть расширены добавлением других критериев эффективности распределения ВР:

$$S_0 = \{ \min_{H, Ro} Co_{norm}, \min_{H, Ro} E_{0_norm}, \min_{H, Ro} Q_0(\tau), \min_{H, Ro} \Delta, \min_{H, Ro} V_{0_norm} \}; \quad (1)$$

$$P_0 = \{ P_i^0 \} = \{ \{ \min_{H, Ro} Co_{i_norm}^1, \min_{H, Ro} E_{i_norm}, \min_{H, Ro} Q_i(\tau), \min_{H, Ro} V_{i_norm} \} \}, i = 1..M, \quad (2)$$

$H = \|h_{ij}\|$ – матрица назначений ВЗ на ВУ,

$$h_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если задача } j \text{ назначена на устройство } i; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Ro – множество маршрутов передачи данных между задачами, сформированных при распределении ВЗ по ВУ,

- $\min_{H,Ro} Co_{norm}$ – минимизация стоимости привлеченной элементной базы;
- $\min_{H,Ro} Co_{i_{norm}}^1$ – минимизация стоимости эксплуатации узла;
- $\min_{H,Ro} E_{i_{norm}}$ – минимизация энергозатрат для решения ВЗ узлом;
- $\min_{H,Ro} E_{0_{norm}}$ – минимизация суммарных энергозатрат;
- $\max_{H,Ro} P_i(\tau) (\min_{H,Ro} Q_i(\tau))$ – максимизация ВБР одного узла (минимизация интенсивности отказов одного узла);
- $\max_{H,Ro} P_0(\tau) (\min_{H,Ro} Q_0(\tau))$ – максимизация стоимостной функции ВБР фрагмента сети (минимизация разности 1 и стоимостной функции ВБР фрагмента сети);
- $\min_{H,Ro} \Delta$ – выравнивание вычислительной нагрузки;
- $\min_{H,Ro} V_{0_{norm}}$ – минимизация нагрузки на сеть.

Будем считать, что элементы упорядочены, и смена порядка их следования не допускается. Для этого будем представлять имеющиеся критерии в виде кортежей(векторов), элементами которых соответственно являются критерии:

$$S'_0 = (\min_{H,Ro} Co_{norm}, \min_{H,Ro} E_{0_{norm}}, \min_{H,Ro} Q_0(\tau), \min_{H,Ro} \Delta, \min_{H,Ro} V_{0_{norm}}) \quad (3)$$

$$P'_0 = (\min_{H,Ro} Co_{1_{norm}}^1, \min_{H,Ro} E_{1_{norm}}, \min_{H,Ro} Q_1(\tau), \min_{H,Ro} V_{1_{norm}}, \dots, \quad (4)$$

$$\min_{H,Ro} Co_{m_{norm}}^1, \min_{H,Ro} E_{m_{norm}}, \min_{H,Ro} Q_m(\tau), \min_{H,Ro} V_{m_{norm}})$$

Также будем полагать, что имеется возможность выбора того или иного критерия в соответствии с целями лица принимающего решение и использование его в составе интегрального критерия. Для этого определим матрицы:

$$s^0 = |s_z|, z = 1..|S_0|; \quad (5)$$

$$p^0 = |p_x|, x = 1..|P_i^0| \cdot M, \quad (6)$$

где

$$s_z = \begin{cases} 1, & \text{если } z - \text{й элемент выбран в качестве критерия оценки РВР,} \\ & 0, \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

$$p_x = \begin{cases} 1, & \text{если } x \text{ для узла } m \text{ выбран как критерий,} \\ & 0, \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

Полагаем, что заданы: множество графов задач, реализующих одну пользовательскую задачу с возможностью выбора для решения: $G_I = \{\{G_{I_s}\}_v\}$, $G_{I_s} = \{g_j, R\}$, где G_{I_s} – ациклический орграф, g_j – ресурсные требования задачи, включая прием и передачу данных в сеть; R – множество ребер, взвешенных значениями объемов передаваемых данных между задачами [бит]. R также может быть описано ранее введенной матрицей смежности $V=|v_{ij}|$, определяющей объемы информационных обменов между задачами.

В рамках $\{G_{I_s}\}_v$ графы отличаются значениями g_i и весами r_i , матрица смежности задач одна. Каждое множество $\{G_{I_s}\}_v$ описывает семейство графов, семейства могут иметь различную матрицу смежности.

Граф доступного фрагмента сети представляется неориентированным графом $G_2 = \{Y, C\}$, $Y = \{\gamma_i\}$ – известные характеристики узла, $i=1..M$; $VC = \{vc_{kl}\}$ – скорости каналов связи, $k=1..Z$, $l=1..Z$, где M – количество узлов подлежащих рассмотрению, Z – количество каналов связи.

$$\gamma_i = \langle p_i, c_i, c_{0i}, e_i^{comp}, \lambda_0^i, \tau_0^i \rangle, \quad (7)$$

где

- p_i – производительность узла,
- c_i – стоимость привлечения узла к вычислениям,
- c_{0i} – стоимость процессорной операции узла,
- e_i^{comp} – энергозатраты на выполнение одной инструкции,

- λ_0^i – интенсивность отказов узла в начале эксплуатации,
- τ_0^i – предполагаемое время эксплуатации узла.
- S'_0, P'_0, s^0, p^0 ;
- T_0 – время выполнения ВЗ.

Рассмотрим переменные математической модели процесса распределения вычислительных ресурсов.

- Вычислительная сложность процесса планирования g_r .
- Матрица назначения подзадач ВЗ на устройства:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

где $a_{ij} = \begin{cases} t_{ij}, & \text{если задача } j \text{ назначена на узел } i, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$

t_{ij} – время назначения задачи j на узле i .

Ранее введенная матрица назначений задач на узлы H также может быть получена из матрицы A соответственно:

$$h_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если задача } a_{ij} \neq 0, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

- Матрица распределения ресурсов вычислительных устройств:

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & \cdots & u_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{n1} & \cdots & u_{nm} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где u_{ij} – количество вычислительных ресурсов, выделяемых устройством i для решения задачи j , $0 \leq u_{ij} \leq 1$.

- множество Ro маршрутов передачи данных между задачами, закрепленными за узлами, $Ro = \{Ro_{jk}\}, j \leq N, k \leq N$.
- Кроме того, вводятся дополнительные матрицы, которые также будут использованы в качестве переменных.
- A_Φ , которая представляет собой матрицу A , расширенную моментами времени передачи данных для всех узлов, принимающих участие в вычислениях.
- U_Φ , которая представляет собой расширенную матрицу U значениями ВР выделенными для передачи данных.

Введение матриц A_Φ и U_Φ является необходимым для учета ресурсных затрат на транзит данных. При этом исходный граф задач преобразуется следующим образом, в зависимости от сформированных маршрутов Ro (рис. 2).

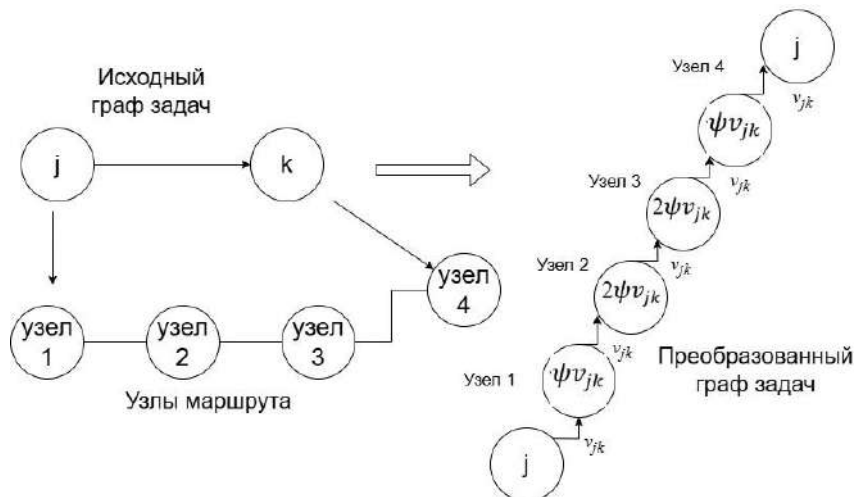


Рис. 2. Преобразование исходного графа задач

Соответственно, появляется некоторое количество новых задач, являющихся реализацией приема-передачи данных узлом, для которых узлы, осуществляющие транзит, также выделяют ресурсы.

Рассмотрим ограничения на переменные математической модели процесса распределения вычислительных ресурсов. В общем случае, имеется множество ограничений $constr = \{constr_k\}$, которые формируются на основании особенностей используемых вычислительных устройств.

Также обязательными будем считать следующие ограничения:

- Время начала выполнения j -й задачи на i -м устройстве не может быть меньшим, чем время окончания предшествующих задач и время передачи данных по сформированному маршруту Ro_{kj} :

$$\forall t_{ij}^\Phi, t_{lk}^\Phi \text{ из } A_\Phi \max \left(\left(t_{lk}^\Phi + \frac{g_k^\Phi}{u_{lk}^\Phi p_l} \right) + \tau(Ro_{kj}) \right) \leq t_{ij}^\Phi, \quad (10)$$

где $\tau(Ro_{kj})$ – время передачи данных по маршруту от задачи k к задаче j , $i, l \in [1..M]$, g_k^Φ – вычислительная сложность задачи, предшествующей задаче i в графе Θ задач, полученном путем модификации исходного графа задач с учетом маршрутов передачи данных.

- Каждый вычислительный узел сети не должен бы перегружен, т.е. загруженность его процессора должна быть менее 100%. При этом, если вычислительный узел участвует в транзите данных, такая нагрузка тоже учитывается и суммируется с нагрузкой по решению ВЗ.

$$\forall u_{ij}^\Phi \text{ из } U_\Phi \sum_{j=1}^N u_{ij}^\Phi \leq 1. \quad (11)$$

- Ограничение на время выполнения ВЗ:

$$\forall i, j, \max \left(\left(t_{ij}^\Phi + \frac{g_j^\Phi}{u_{ij}^\Phi p_j} \right) \right) \leq T_0. \quad (12)$$

Результатом процесса распределения вычислительных ресурсов является принятие решения о выборе таких значений переменных $A, U, Ro, A_\Phi, U_\Phi, g_r$ таких, что:

$$I = \min_{A, U, Ro, A_\Phi, U_\Phi, g_r} \left(\prod_{z=1}^{|S_0|} \mu(S'_0[z]s_z) \cdot \prod_{x=1}^{|P_0^0| \cdot M} \mu(P'_0[x]p_x) + \alpha(g_r) + \beta(A) \right), \quad (13)$$

где $\alpha(g_r)$ – некоторая штрафная функция, реализующая влияние ресурсной стоимости планирования вычислений на результат планирования,

$\beta(A)$ – ресурсная стоимость миграции ВЗ на узлы, где выделяются ресурсы для решения ВЗ,

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x = 0, \\ x, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

3. Экспериментальное исследование влияния ресурсной стоимости планирования и передачи данных

3.1. Моделирование ресурсной стоимости распределения вычислительных ресурсов

Даны:

- 50 задач произвольной вычислительной сложности (500 ... 50000 млн оп-й)
- 10 узлов различной производительности (500-5000 млн. оп/с) с заданным различным энергопотреблением нДж/оп (2-10, случ. образом).
- Критерии оптимизации – минимизация энергозатрат на вычисление комплекса задач и выравнивание вычислительной нагрузки.
- Задано увеличение вычислительной сложности задачи планирования: 50, 100, 150, 200 ... 5000 вызовов ЦФ. Для моделирования будем полагать, что в одном вызове ЦФ 100 млн оп-й, соответственно вычислительные сложности будут 5000, 10000, ... 500000 оп-й.
- Ограничение на время выполнения $T=150$ с.
- Задачу планирования выполняет самый производительный узел, т.е. 5000 оп/с.

На рис. 3 показано сравнение значений свертки для подсчета значения без учета операции планирования и с учетом.



Рис. 3. Сравнение значений свертки

Таким образом, показано ухудшение значения свертки ЦФ при учете вычислительной сложности задачи планирования. При этом на графике рис. 3 можно видеть, что до определенного порогового значения ресурсной стоимости планирования (7500 млн.оп.) происходит улучшение получаемого значения свертки.

3.2. Проверка ресурсной стоимости миграции ВЗ на узлы

Для проверки влияния ресурсной стоимости миграции ВЗ на узлы рассмотрим следующие исходные данные (рис. 4, 5):

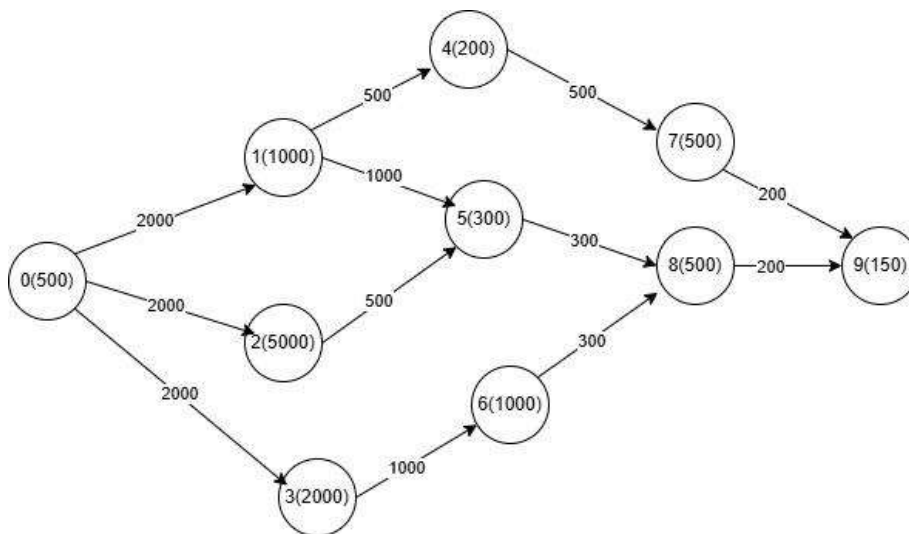


Рис. 4. Графовое представление вычислительной задачи (вершины взвешены вычислительными сложностями подзадач)

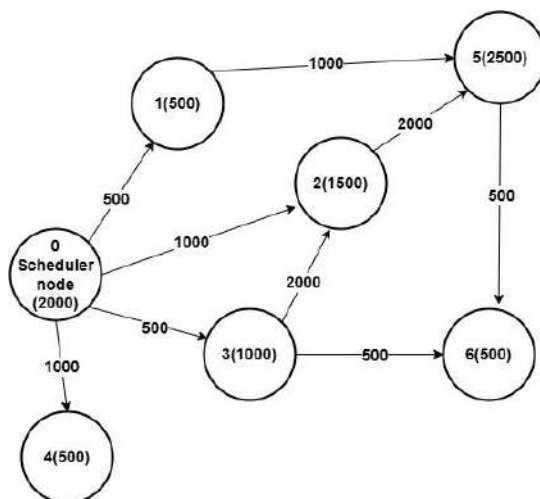


Рис. 5. Графовое представление фрагмента сети. Узел 0 содержит планировщик и источник данных

При распределении вычислительных ресурсов было применено эвристическое правило – распределять ВЗ таким образом, чтобы сократить количество перемещений задач и маршрут их перемещения, начиная от узла 0, который здесь принят за источник данных.

Таблица 1. Результаты распределения вычислительных ресурсов

	Значение свертки критериев	Распределение вычислительных подзадач	Загруженность устройств/используемые ресурсы	Время миграции подзадач
Распределение задач на основе оптимизации по свертке критериев	$1,46 \cdot 10^{-6}$	0220020146	0,25; 0,12; 0,38; 0,02; 0,13; 0,008; 0,057	5,9
Распределение задач с применением эвристик по снижению миграции подзадач	$7,05 \cdot 10^{-6}$	0000201146	0,32; 0,35; 0,04; 0,02; 0,13; 0,08; 0,05	5,2
Ресурсоемкость миграции: 7600(оп) при распределении на основе оптимизации свертки критериев, 2600(оп) с применением эвристик				

4. Проверка ресурсной стоимости транзита данных

На рис. 6 приведены, соответственно, граф фрагмента сети и граф вычислительной задачи для решения. Вершины графа сети взвешены производительностями, вершины графа вычислительной задачи – вычислительными сложностями.

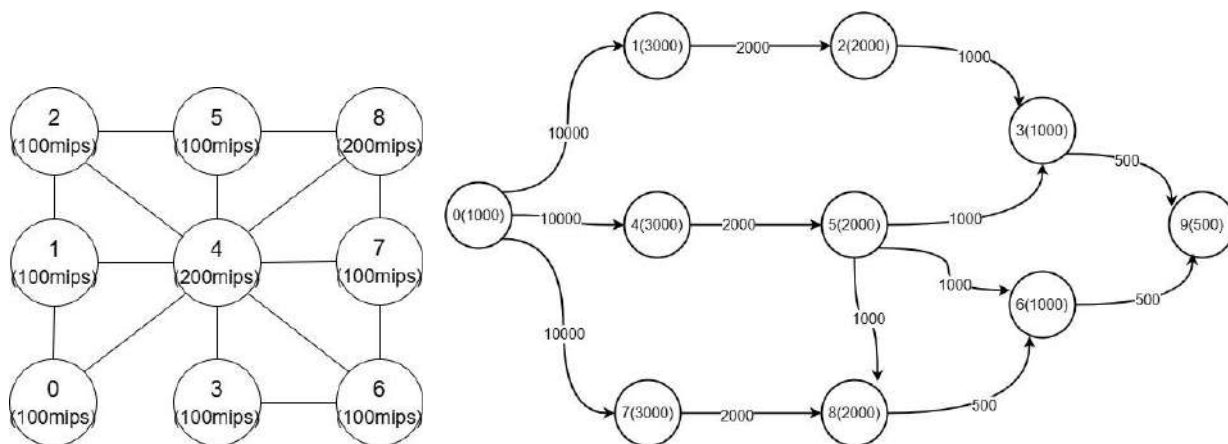


Рис. 6. Фрагмент вычислительной сети и вычислительная задача

При использовании классической модели составления расписания для параллельных независимых машин и задач с ограничением на следование, было получено распределение, представленное на рис. 7.

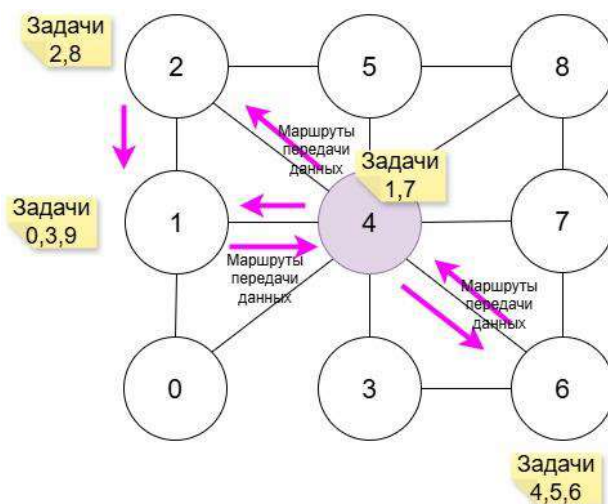


Рис. 7. Распределение задач без учета транзита данных

На рис. 8 видно, что при этом в наличии многочисленные обмены данными через сеть между задачами, размещенными на различных узлах. Также перегружен узел 4 по причине транзита значительного объема данных.

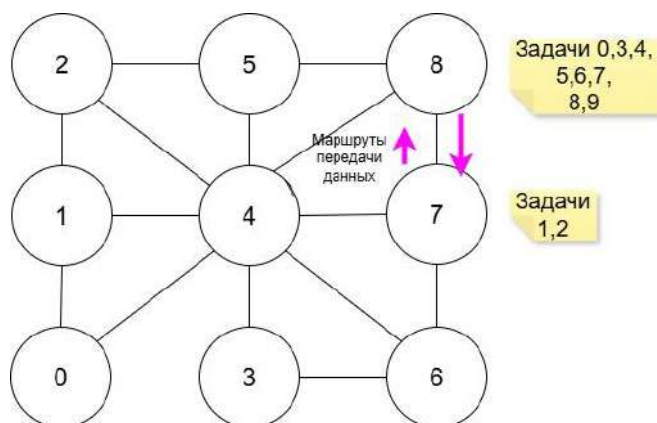


Рис. 8. Распределение задач с учетом транзита данных

При этом общее энергопотребление системы (рис. 9) снижено на 34% при использовании модели с учетом транзита данных.

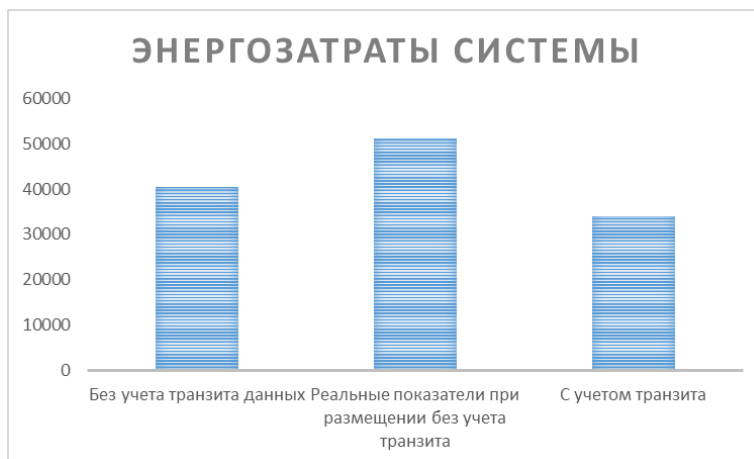


Рис. 9. Общие энергозатраты системы

Таким образом, вполне очевидной является целесообразность использования модели ИПРВР в ГГДВС при распределении вычислительных задач.

5. Заключение

Таким образом, представленная в данной статье модель распределения вычислительных ресурсов отличается от существующих наличием параметров, учитывающих ресурсную стоимость транзита данных, миграции ВЗ к вычислительным ресурсам, а также ресурсную стоимость планирования. Проведенные эксперименты продемонстрировали актуальность новых введенных параметров, что в итоге позволяет осуществлять более точную оценку эффективности процесса распределения вычислительных ресурсов.

Литература

1. *Goudarzi M., Palaniswami M., Buyya R.* Scheduling IoT applications in edge and Fog computing environments: A taxonomy and future directions // *ACM Comput. Surv.* – 2023. – Т. 55, № 7. – С. 1–41.
2. *Al-kahtani M.S., Khan F., Taekeun W.* Application of Internet of Things and sensors in healthcare // *Sensors (Basel).* – 2022. – Vol. 22, № 15. – P. 5738.
3. *Begum M.B. et al.* An efficient and secure compression technique for data protection using burrows-wheeler transform algorithm // *Heliyon.* – 2023. – Vol. 9, № 6.
4. *Liu F., Huang J., Wang X.* Joint task offloading and resource allocation for device-edge-cloud collaboration with subtask dependencies // *IEEE Trans. Cloud Comput.* – 2023. – Vol. 11, № 3. – P. 3027–3039.
5. *Cheng K., Fang X., Wang X.* Energy efficient edge computing and data compression collaboration scheme for UAV-assisted network // *IEEE Transactions on Vehicular Technology.* – 2023. – Vol. 72, № 12.
6. *Love C.E., Jordan H.F.* An investigation of static versus dynamic scheduling // [1990] *Proceedings. The 17th Annual International Symposium on Computer Architecture.* IEEE Comput. Soc. Press, 2002. – P. 192–201.
7. *Heng Wang and Jianguang Deng* 2023 *J. Phys.: Conf. Ser.* 2504 012060.
8. *Pujiyanta A., Novianto F.* Job scheduling on grid computing using first fit, best fit, and worst fit // *Khazanah Informatika Jurnal Ilmu Komputer dan Informatika.* – 2022. – Vol. 8, № 2.
9. *Kiani F.* A multi-objective metaheuristic method for node placement in dynamic IoT environments // *Discov. Internet Things.* – 2025. – Vol. 5, № 1.
10. *Houssein E.H. et al.* Metaheuristic algorithms and their applications in wireless sensor networks: review, open issues, and challenges // *Cluster Comput.* – 2024. – Vol. 27, № 10. – P. 13643–13673.
11. *Sharma S. et al.* High-impact applications of IoT system-based metaheuristics // *Nature-Inspired Methods for Smart Healthcare Systems and Medical Data.* Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. – P. 121–131.
12. *Toporkov V., Yemelyanov D.* Scheduling optimization in heterogeneous computing environments with resources of different types // *Theory and Engineering of Dependable Computer Systems and Networks.* Cham: Springer International Publishing, 2021. – P. 447–456.
13. *Toporkov V., Yemelyanov D., Tselishchev A.* Allocation of distributed resources with group dependencies and availability uncertainties // *Computational Science – ICCS 2023.* Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. – P. 606–620.
14. *Dow E.M.* Decomposed multi-objective bin-packing for virtual machine consolidation // *PeerJ Comput. Sci.* – 2016. – Vol. 2, № e47. – P. e47.
15. *Klimenko A.* Multicriteria Data Processing Management in the Geographically Distributed Computing Systems with QoS Time Requirements. 2023 16th International Conference Management of large-scale system development (MLSD), Moscow, Russian Federation, 2023. – P. 1–5. DOI: 10.1109/MLSD58227.2023.10303770.
16. *Klimenko A., Barinov A.* A Distributed Method of Computationally Hard Optimization Based on Edge Devices Usage. 2024 17th International Conference on Management of Large-Scale System Development (MLSD), Moscow, Russian Federation, 2024. – P. 1–5. DOI: 10.1109/MLSD61779.2024.10739574.