

УДК 004.383.8.032.26

Компьютерное моделирование вычислительных систем на основе мемристоров на языке GPSS

Подгорнова Ю.А., Никишов Д.А., Щаников С.А.

При разработке систем искусственного интеллекта на базе мемристоров необходимо определить, какие значения основных показателей качества их функционирования: точности, отказоустойчивости, надежности, производительности, быстродействия, энергопотребления и т.д. - будут в итоге достигнуты. Оценить указанные параметры можно с помощью имитационного моделирования на разных уровнях структурно-функциональной иерархии системы. В данной работе показано, что на системном уровне для решения данной задачи подходящим инструментом является GPSS. В ходе экспериментов на языке GPSS были разработаны модели распределенных вычислительных систем на базе мемристоров с одним и несколькими источниками данных и с одним и несколькими блоками обработки данных.

Ключевые слова: мемристоры, нейроморфные системы, аппаратные ускорители, язык GPSS, модели данных, производительность, быстродействие.

Введение

В процессе разработки систем искусственного интеллекта на базе мемристоров (включая нейроморфные системы и искусственные нейронные сети (ИНС)) для конкретного проектного решения необходимо определить, какие значения основных показателей качества их функционирования (точности [1, 3, 4], отказоустойчивости [5], надежности [2], производительности, быстродействия, энергопотребления и т.д.) будут в итоге достигнуты. Такие системы являются сложно формализуемыми или не формализуемыми, нелинейными, динамическими, многомерными, мультирежимными объектами, с вероятностным характером всех внутренних и внешних явлений и процессов, что в большинстве практических случаев не позволяет применять для их анализа и синтеза только аналитические методы. Если условно принять, что все свойства и характеристики электронных компонентов системы будут соответствовать номинальным значениям, то достигнутые значения показателей качества будут зависеть от большого числа параметров (архитектуры, структуры, конструкции, технологии, методов и алгоритмов и пр.). На практике дополнительное влияние на качество функционирования аппаратных ускорителей искусственного интеллекта будут оказывать неизбежно возникающие дестабилизирующие факторы различной природы [6-8], и это может привести к тому,

что созданная система не будет соответствовать заданным требованиям, что является значительной проблемой.

В настоящее время данная проблема успешно решается с применением методов системной инженерии и имитационного моделирования [9]. С точки зрения системной инженерии процесс разработки аппаратных ускорителей ИИ можно представить в виде V-диаграммы [10]. Состав моделей для конкретного проекта должен быть необходимым и достаточным для проектирования системы и проведения оптимизации её ключевых параметров и показателей качества.

Имитационное моделирование широко применяется практически во всех сферах деятельности человека, начиная от моделей технических [11-13] и технологических систем [14-16], а также систем массового обслуживания [17-19], и заканчивая проблемами развития человечества [20-22] и вселенной [23, 24], для изучения алгоритмов поведения систем и ее подсистем в процессе функционирования, когда невозможно проводить эксперименты на реальной системе и когда недоступно получение аналитического решения математической модели. Оно позволяет осуществить исследования проектируемой или анализируемой системы по схеме операционного анализа, включающей взаимосвязанные этапы: содержательная постановка задачи, разработка концептуальной модели, разработка и

программная реализация имитационной модели, проверка адекватности модели и оценка точности результатов моделирования, планирование и проведение экспериментов, принятие решений.

Одним из самых распространенных на сегодняшний день языков моделирования, облегчающих процесс написания имитационных программ, является язык GPSS [25-29], созданный фирмой IBM.

Язык GPSS широко используется при разработке многопроцессорных систем и кластерных ЭВМ для подбора оптимальных параметров. Приведем примеры таких работ.

Кривчиков В. С. разработал модель подбора оптимального набора ресурсов ЭВМ при разработке системы построения панорамных изображений, позволяющую учитывая загруженность системы получать оптимальную производительность системы. Эта модель может быть использована не только для анализа данной конкретной системы, но и для анализа поведения любой многопоточной (многопроцессорной) системы [30].

Авторы Степанова А.С. и Чепин Е. В. [31] разработали и реализовали в GPSS модель многопроцессорной системы, с помощью которой исследовали производительность многопроцессорной системы в зависимости от числа процессоров, работающих над вычислительной задачей.

Бахарева Н.Ф. и Коннов А.Л. [32] представили модель неоднородного трафика мультисервисной сети ЦЕНТРОБАНКА РФ. На основе этой модели с использованием методов уравнений баланса потоков в сети и двумерной диффузионной аппроксимации процессов функционирования СМО, а также системы моделирования GPSS World, были получены основные показатели производительности сети, а также подобраны оптимальные параметры такой сети с учетом интенсивности обработки поступающих запросов и количеством обслуживаемых устройств. и можно оценить эффективность алгоритмов диспетчеризации в мультипрограммных и мультипроцессорных системах.

Володин А.Ю. в [33] рассмотрел особенности построения модели симметричной мультипроцессорной системы на мультядерных процессорах в виде сети массового обслуживания. Однородная структура системы позволила значительно упростить расчет модели путем преобразования сети с несколькими классами заявок к сети с одним классом заявок и меньшим числом обслуживаемых устройств.

Авторами Черненьким В.М., Семкиным П.С. в [34] предложена модель, реализованная на псевдоязыке и языке GPSS, процессов функционирования операционных систем, основанная на концепции потоковых схем. По результатам моделирования построены кривые зависимостей, с помощью которых можно оценить эффективность алгоритмов диспетчеризации в мультипрограммных и мультипроцессорных системах.

Основные параметры для моделирования

Для систем параллельной обработки данных ключевыми показателями являются производительность и быстродействие. Производительность – количество выполненных операций в единицу времени [34, 35]:

$$P = \frac{N}{t},$$

где P – производительность, N - количество операций, t – время равное 1 с.

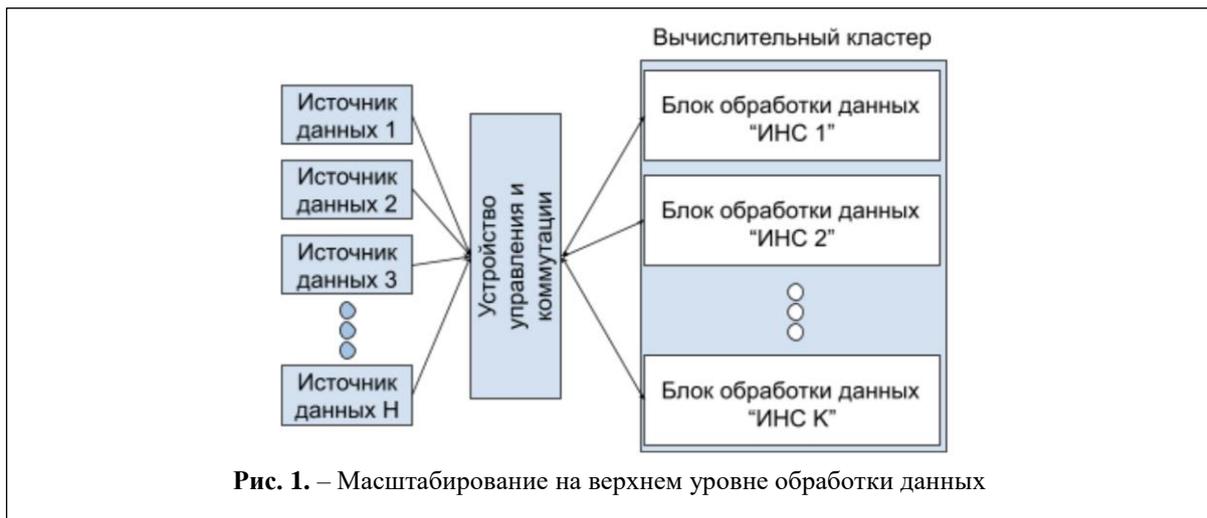
Операция – обработка одного семпла данных. Единица времени – секунда. Производительность зависит от быстродействия.

Быстродействие – среднее время выполнения 1 операции [34, 35]:

$$S = \frac{t}{N},$$

где S - быстродействие.

Разрабатываемая система потенциально имеет несколько уровней масштабирования. Отдельный вычислительный узел системы, обладающий полным функционалом, то есть узел, на котором выполняется работа модели ИНС, условно назовем блок обработки дан-



ных (БОД). Такой блок получает на вход данные, «пропускает» их через модель нейронной сети и выдает результат. На самом верхнем уровне масштабирования системы БОДы можно объединить в вычислительный кластер. Такой кластер с точки зрения пользователя сможет обслуживать одно или несколько устройств ввода информации, в зависимости от производительности и быстродействия.

Важно также отметить, что такая архитектура будет совпадать с конструкцией системы только в том случае, если один БОД позволяет выполнять одну ИНС. Если количество параметров ИНС превышает максимальное количество аппаратных параметров одного БОД, то такую ИНС придется выполнять конструктивно на нескольких блоках.

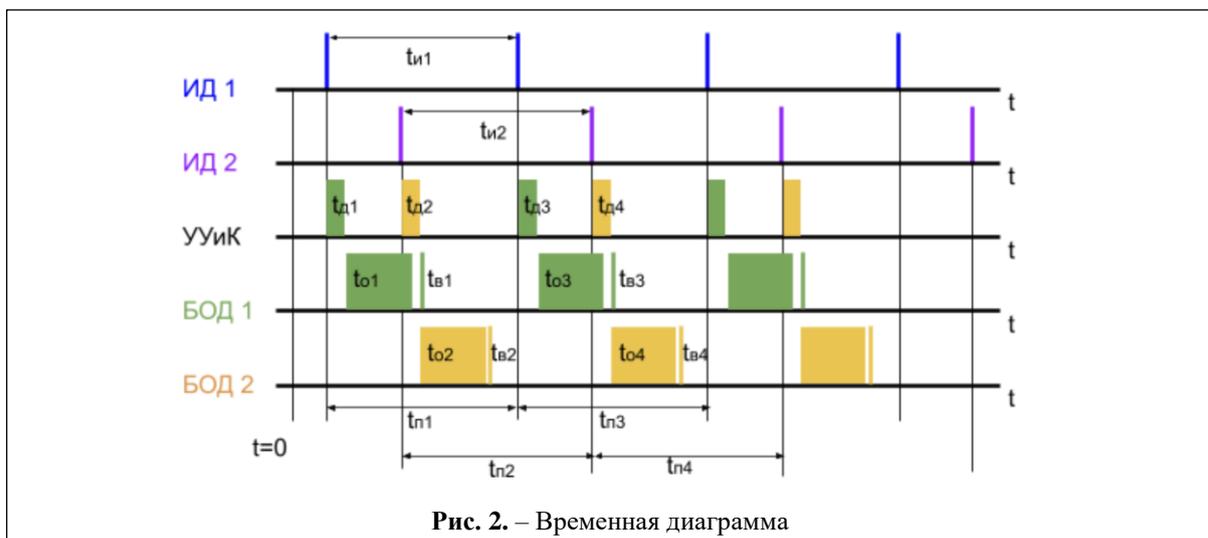
В соответствии с рис. 1 на показатели работы системы будут влиять следующие факторы:

– период получения данных от источника t_u . Частота прихода данных от источников данных (единица измерения - семплов в единицу времени, например для ip камеры - fps (frames per second)). Если на входе системы подключена одна камера с fps = 60 кадров/с, то производительность системы P не будет превышать 60, если на вход системы подключено 5 ip камер, то производительность системы не будет превышать 300 и т.д. Зная производительность системы, можно рассчитать максимальное количество подключаемых источников данных, например, при $P = 60$, можно подключить 1 камеру с fps = 60 или 2 камеры при fps = 30 (рис. 2);

– время доставки семпла данных до БОД t_d ;

– время обработки семпла в БОД t_o ;

– время возврата результата из БОД в УУиК t_b .



В зависимости от значений этих временных параметров будет формироваться период прихода данных в БОД tn .

Модели обработки данных на языке GPSS

В простейшем случае в такой системе может быть один источник данных и один блок обработки данных. В пакете GPSS World для создания модели необходимо использовать следующие блоки:

- 1) GENERATE – блок, через который транзакты входят в модель;
- 2) ADVANCE – блок, реализующий задержку транзакта на время;
- 3) QUEUE – блок входа в очередь устройства;
- 4) SEIZE – блок занятия одноканального устройства;
- 5) DEPART – блок выхода из очереди;
- 6) TERMINATE – блок, через который транзакты удаляются из модели;
- 7) START – блок начала моделирования.

Модель для такого случая представлена на рис. 3 и будет иметь следующее описание на языке GPSS:

GENERATE 17; генерация заявки каждые 17 мс

ADVANCE 5; t_d время доставки данных

Обработка транзактов на 1 устройстве обслуживания;

QUEUE Q_AI_1; занимаем очередь

SEIZE AI_1; занимаем устройство

DEPART Q_AI_1

ADVANCE 10; t_s время обработки и возврата данных

RELEASE AI_1; освобождаем устройство

TERMINATE;

Таймер моделирования;

GENERATE 1701; время моделирования 1701 мс

TERMINATE 1

START 1

В данной модели за единицу модельного времени принята 1 миллисекунда. Для

устройства ввода информации, например, камеры, частота захвата кадров может составлять 60 fps. Тогда данные в систему будут поступать примерно каждые 17 мс. Для моделирования 100 пакетов данных необходимо запустить имитационную модель на 1701 единиц модельного времени, что будет соответствовать 1,7 секунды. После запуска модели формируется стандартный отчет (рис. 4).

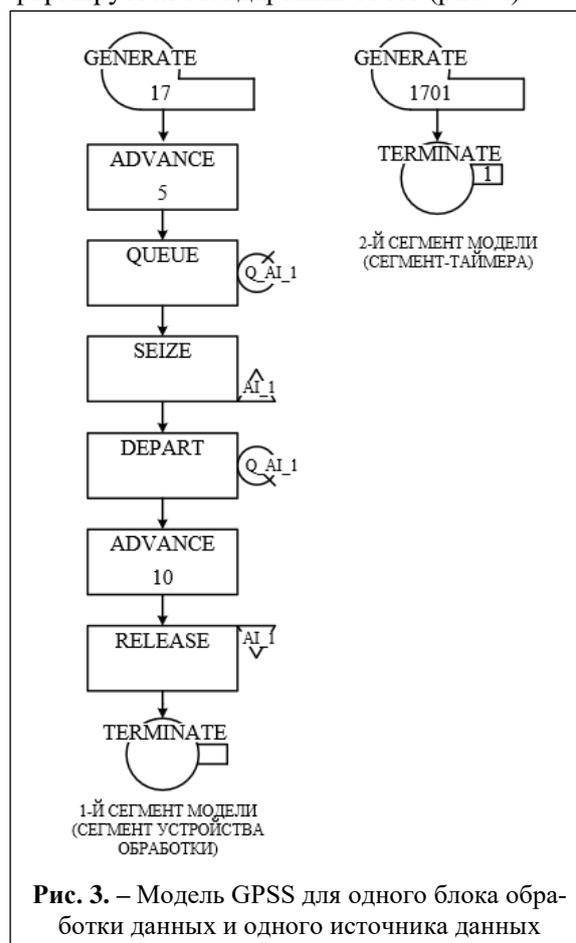


Рис. 3. – Модель GPSS для одного блока обработки данных и одного источника данных

Основные результаты (рис. 4) работы модели следующие: на вход модели поступило 100 заявок (ENTRY COUNT), через одноканальное устройство (FACILITY AI_1) прошло 99 заявок (ENTRIES), 99 заявок покинули устройство через блок RELEASE, 1 текущая заявка (CURRENT) находится в блоке доставки к устройству (ADVANCE), коэффициент загрузки одноканального устройства 0,582 (UTIL.), среднее время обработки заявки устройством (AVE. TIME) составляет 10 мс. Устройство в любой момент времени может обработать только 1 заявку, если в процессе обработки появляется новая заявка, то

START TIME	END TIME	BLOCKS	FACILITIES	STORAGES					
0.000	1701.000	10	1	0					
NAME	VALUE								
AI_1	10001.000								
Q_AI_1	10000.000								
LABEL	LOC	BLOCK TYPE	ENTRY COUNT	CURRENT COUNT	RETRY				
	1	GENERATE	100	0	0				
	2	ADVANCE	100	1	0				
	3	QUEUE	99	0	0				
	4	SEIZE	99	0	0				
	5	DEPART	99	0	0				
	6	ADVANCE	99	0	0				
	7	RELEASE	99	0	0				
	8	TERMINATE	99	0	0				
	9	GENERATE	1	0	0				
	10	TERMINATE	1	0	0				
FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE. TIME AVAIL.	OWNER	PEND	INTER	RETRY	DELAY	
AI_1	99	0.582	10.000	1	0	0	0	0	
QUEUE	MAX CONT.	ENTRY	ENTRY(0)	AVE. CONT.	AVE. TIME	AVE. (-0)	RETRY		
Q_AI_1	1	0	99	99	0.000	0.000	0.000	0	

Рис. 4. – Пример вывода результата моделирования (стандартный отчет)

она ожидает в очереди Q_AI_1, максимальная длина очереди (MAX) - 1 заявка, общее количество входов в очередь (ENTRY) - 99 заявок.

Для оценки влияния времени обработки и доставки данных на производительность системы проведем имитационное моделирование несколько раз для разных значений этих параметров. Результаты занесем в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты имитационного моделирования для системы с одним блоком обработки данных и одним источником данных

t_u , мс	t_c , мс	Кол-во обработанных сэмплов	Производительность	% занятости устройств
5	5	99	58	29,1
5	10	99	58	58,2
5	15	98	57	87,2
5	20	83	49	98,7
5	25	67	39	98,7
5	30	55	32	98,7
10	5	99	58	29,1

10	10	98	57	58,1
10	15	98	57	86,9
10	20	83	49	98,4
10	25	66	38	98,4
10	30	54	31	98,4

Из таблицы 1 видно, что при $t_c = 30$ мс производительность системы снижается до 32, что означает то, что система успевает обрабатывать 1/3 входящих сэмплов данных. Время доставки данных до устройства обработки незначительно влияет на обработку, поскольку количество обработанных сэмплов и производительность изменяются в пределах 1%.

Простейшая модель усложнялась, ниже представлены эксперименты и их результаты.

А. Добавление одного дополнительного источника данных.

В такой модели дополнительно используются блоки ASSIGN – это блок, предназначенный для установки/изменения параметра транзакции, TEST - блок, необходимый для перенаправления, либо задержки транзакции в зависимости от заданного условия: в данном случае, если $P1 = 1$, то заявка идет в следующий блок, иначе - переходит по метке

POTOK2, TRANSFER – блок, осуществляющий безусловное перенаправление транзакции на блок по указанной метке, а также SAVEVALUE – блок, с помощью которого увеличивается текущее содержимое параметра на указанное значение, например «SAVEVALUE SCH2+,1» означает, что содержимое параметра SCH2 будет увеличиваться на 1 при соблюдении соответствующих условий.

Начальная задержка генерации данных для второго источника задана для смещения времени получения заявок на 10 мс от первого источника с помощью команды «GENERATE 17,,10».

Результаты эксперимента показали следующее: блок обработки данных работает в полную силу, однако производительность резко снижается, так при $t_c = 30$ мс из 200 заявок, поданных в систему, будет обработано только 56 (28%). Это говорит о том, что для обработки данных, поступающих от двух источников, нужно увеличивать количество БОД.

Б. Добавление многоканального устройства с двумя каналами обработки данных блоком STORAGE.

Такое многоканальное устройство будет имитировать работу системы с несколькими параллельно работающими блоками обработки данных.

Результаты эксперимента показали, что многоканальное устройство с двумя параллельно работающими блоками обработки данных способно обслуживать поступающие сэмплы данных через одного независимо от изменения времени обработки в устройстве. Таким образом, данная модель системы способна обрабатывать данные с камеры с частотой захвата кадров на уровне 60 fps.

В. Увеличение количества блоков обработки данных.

Пусть количество блоков обработки данных будет равно двум и количество источников равно двум, повторим эксперимент. Модель системы представлена на рис. 5.

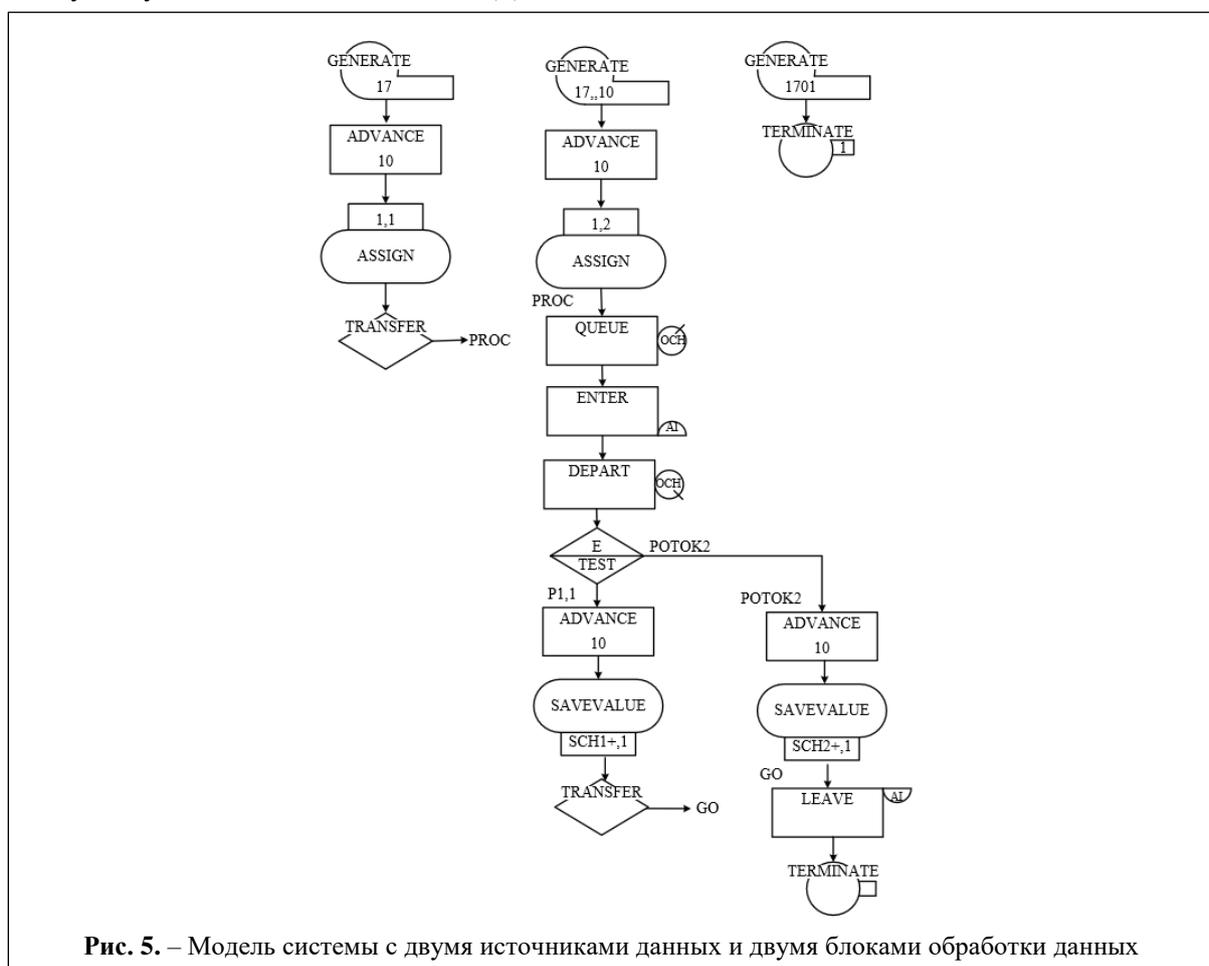
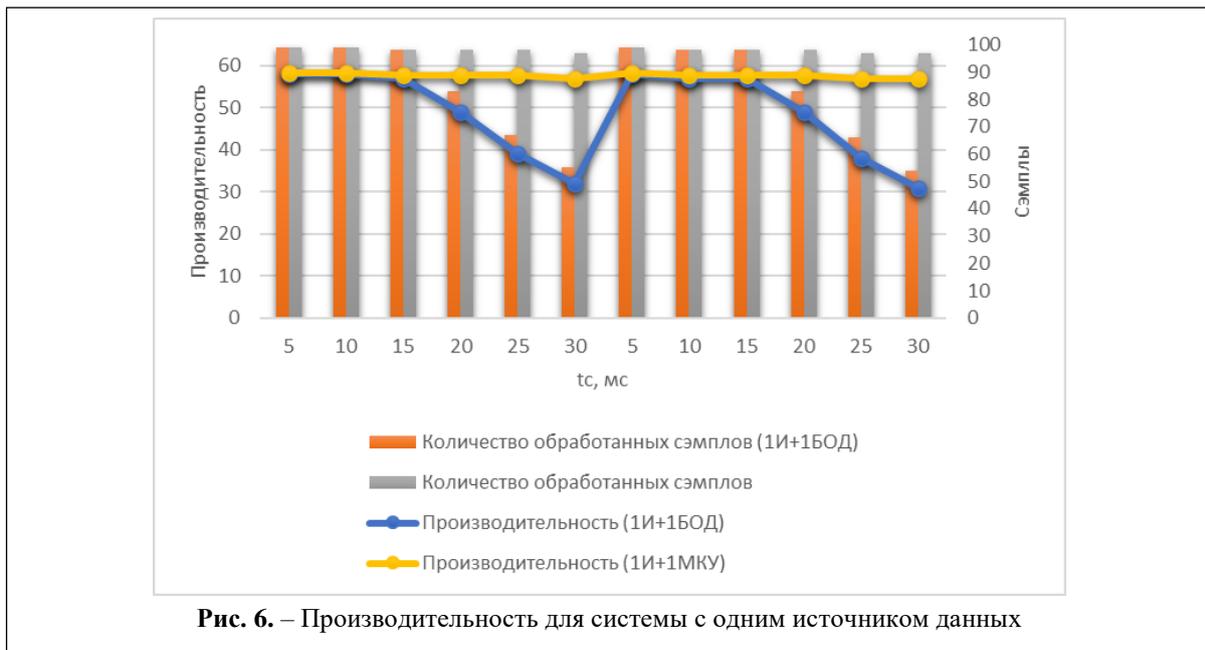


Рис. 5. – Модель системы с двумя источниками данных и двумя блоками обработки данных



Анализ результатов имитационного моделирования показал, что многоканальное устройство с двумя параллельно работающими блоками обработки данных не справляется с обработкой данных, поступающих от двух источников: при $tc = 30$ мс производительность системы равна 65 при полной нагрузке устройства.

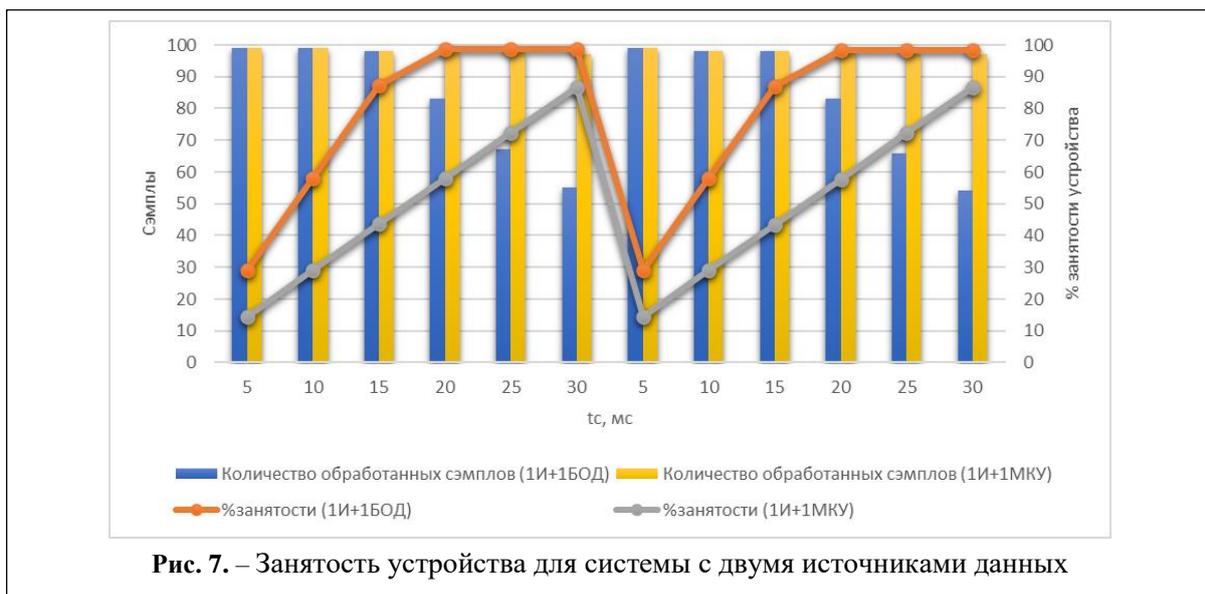
Результаты и обсуждение

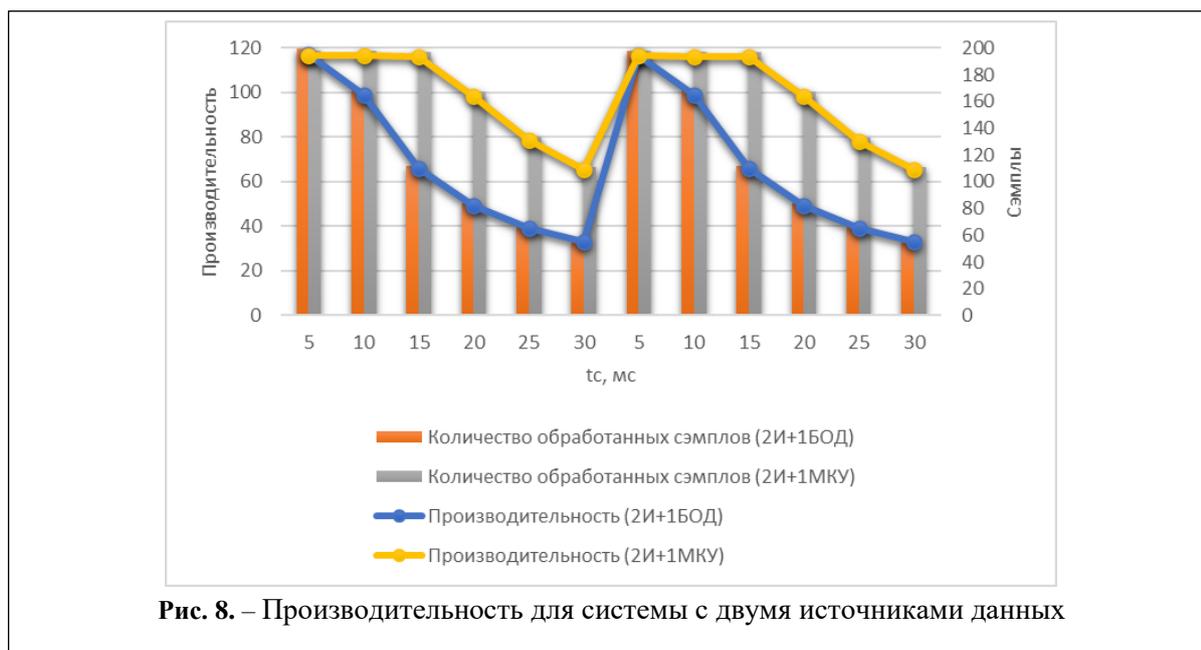
На рис. 6-9 представлены сводные результаты моделирования.

Производительность системы с двумя источниками данных резко снижается с увели-

чением времени обработки заявок как в одноканальном устройстве, так и в многоканальном с двумя параллельно работающими каналами. Таким образом, для поддержания работоспособности системы на прежнем уровне, необходимо увеличить количество блоков обработки данных.

Производительность системы с одним источником данных резко снижается с увеличением времени обработки заявок в одноканальном устройстве, например, при $to = 30$ мс в блоке обработки данных производительность равна 32 сэмплам/мс. Рассматривая производительность системы, в которой одноканальное устройство заменено на многоканальное с





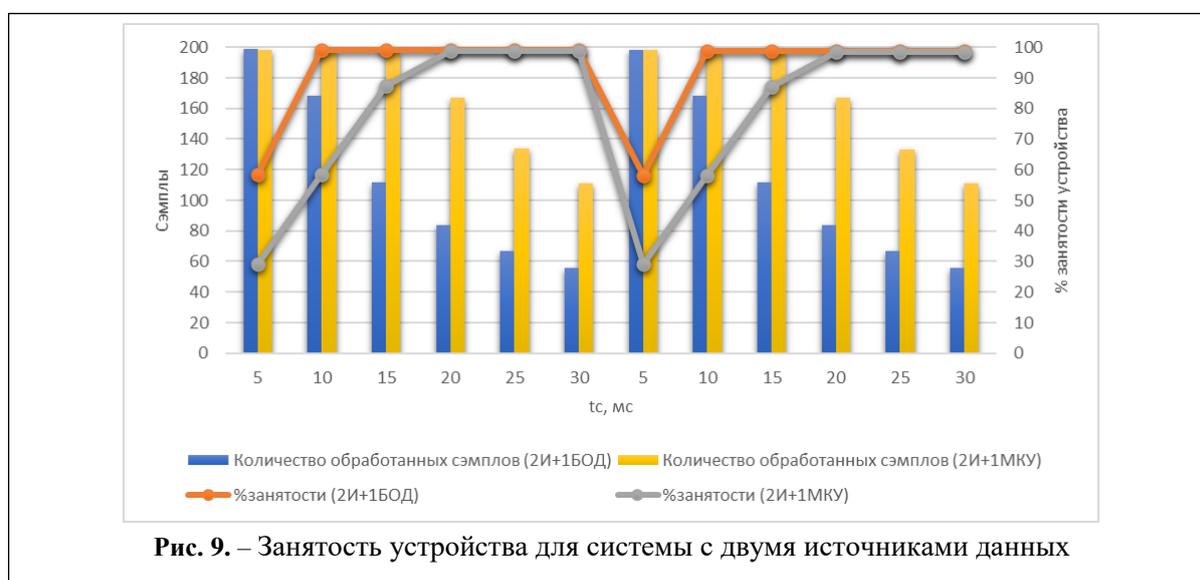
двумя параллельно работающими каналами, можно сказать, что независимо от времени обработки производительность устройства в целом сохраняется на уровне 57 сэмплов/мс (рис. 6).

С увеличением времени обработки данных в БОД снижается количество обработанных сэмплов и увеличивается нагрузка на БОД, что говорит о необходимости добавления еще одного БОД в систему с одним источником данных. Анализируя занятость многоканального устройства в системе с одним источником данных, можно сказать, что она линейно увеличивается при изменении времени обра-

ботки в МКУ, однако оно справляется с обработкой поступивших заявок через одну (рис. 7).

Производительность системы с двумя источниками данных снижается с увеличением времени обработки заявок как в одноканальном устройстве, так и в многоканальном с двумя параллельно работающими каналами. Таким образом, для поддержания работоспособности системы на прежнем уровне, необходимо увеличить количество блоков обработки данных (рис. 8).

Анализ занятости устройств обработки данных (рис. 9), поступающих в систему от



двух источников, показал, что ни один рассмотренный вариант конфигурации системы не справляется с обработкой такого количества заявок. Например, при $t_0 = 30$ мс устройства работают на пределе своих возможностей, однако позволяют обработать всего 28% и 50% поступивших заявок соответственно.

Выводы

Разработанные модели позволяют:

- оценить производительность системы, зная конфигурацию (количество источников данных и блоков обработки данных) аппаратного обеспечения и характеристики его быстрого действия (время обработки данных одним блоком, частота прихода данных в систему и время доставки данных до блока обработки);
- назначить требования к конфигурации и к характеристикам быстрого действия аппаратного обеспечения при задании требуемой производительности.

Литература

- 1 Danilin S. N., Shchanikov S. A., Galushkin A. I. The research of memristor-based neural network components operation accuracy in control and communication systems // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings, 2015. pp. 1-6. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147034
- 2 Danilin S. N., Shchanikov S. A., Panteleev S. V. Determining Operation Tolerances of Memristor-Based Artificial Neural Networks // 2016 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT), Jan. 2017, 2016. pp. 34–38. DOI:10.1109/EnT.2016.016
- 3 Danilin S.N., Shchanikov S.A. Neural Network Control Over Operation Accuracy of Memristor-based Hardware // Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015. 2015. PP. 1-5. DOI:10.1109/MEACS.2015.7414916
- 4 Danilin S. N., Makarov M. V., Shchanikov S. A. Design of Artificial Neural Networks with a Specified Quality of Functioning // Design of artificial neural networks with a specified quality of functioning // International Conference "Engineering & Telecommunication - En&T 2014". 2014. PP. 67-71. DOI: 10.1109/EnT.2014.38.
- 5 Danilin S. N., Shchanikov S. A., Sakulin A. E., Bordanov I. A. Determining the fault tolerance of memristorsbased neural network using simulation and design of experiments // 2018 Engineering and Telecommunication (EnT-MIPT), 2018. pp. 205–209, Nov. 2018. DOI:10.1109/EnT-MIPT.2018.00053.
- 6 Demin V.A., Surazhevsky, I.A., Emelyanov, A.V. et al. Sneak, discharge, and leakage current issues in a high-dimensional 1T1M memristive crossbar // J Comput Electron 19, 2020. pp.565–575 . <https://doi.org/10.1007/s10825-020-01470-0>
- 7 Christopher Bengel, Felix Cüppers, Melika Payvand, et al. Utilizing the Switching Stochasticity of HfO₂/TiO_x-Based ReRAM Devices and the Concept of Multiple Device Synapses for the Classification of Overlapping and Noisy Patterns. Front. Neurosci., 07 June 2021 | <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.661856>. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnins.2021.661856/full>
- 8 Stathopoulos S. et al. A memristive switching uncertainty model //IEEE Transactions on Electron Devices. – 2019. – Т. 66. – №. 7. – С. 2946-2953.
- 9 Danilin S.N., Shchanikov S.A., Bordanov I.A., Zuev A.D. Using Simulation to Define the Tolerances for the Information and Physical Parameters of Memristors-Based Artificial Neural Networks // Journal of Physics: Conference Series. Vol.1333. 2019. 062026. doi:10.1088/1742-6596/1333/6/062026
- 10 Shchanikov S. A. Methodology for Hardware-in-the-Loop Simulation of Memristive Neuromorphic Systems // Nanobiotechnology Reports 2021, vol. 16, no. 6, pp. 782–789, Jan. 2022. DOI:10.1134/S2635167621060215.
- 11 Domijanac, M. Simulation Model for Drivability Assessment and Optimization of Hybrid Drive Trains / M. Domijanac, M. Hirz // Наука и техника. – 2021. – Vol. 20. – No 1. – P. 37-44. – DOI 10.21122/2227-1031-2021-20-1-37-44.
- 12 Панкратов П.А. Имитационная модель системы цикловой синхронизации цифровой системы передачи / П. А. Панкратов, В. В. Малов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2007. – № 6(32). – С. 94-97.
- 13 Имитационная модель однокомпонентной системы с учетом календарной профилактики / В. Я. Копп, П. Н. Флоря, М. В. Замоленов, И. М. Замоленов // Автоматизация и измерения в машиноприборостроении. – 2021. – № 1(13). – С. 84-90.
- 14 Козловский В.Н. Имитационная модель селективной сборки электромеханических преобразователей / В. Н. Козловский // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2008. – № 4. – С. 36-39.
- 15 Курилко А.С. Имитационная модель процесса преобразования сферических пор при циклическом криогенном воздействии на горные породы / А. С. Курилко, В. И. Попов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № 9. – С. 301-305.
- 16 Имитационная модель процесса пенообразования в алюминиевых расплавах / И. А. Иванов, Д. О. Иванов, А. А. Аксенов, А. В. Дуб // Металлы. – 2005. – № 6. – С. 60-66.

17 Menchikov R.V. Airport simulation model for decision-making system in the area of ground support of flights / R. V. Menchikov // Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации. – 2021. – № 20. – P. 355-357.

18 Баротова А.Ж. Имитационная модель перекрестка с возможностью оптимизации светофорного регулирования / А. Ж. Баротова // Творческий потенциал - 2017 : Сборник статей, Самара, 21–23 ноября 2017 года / Под редакцией С.А. Пиявского, З.Ф. Камальдиновой. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2018. – С. 26-35.

19 Глущенко М.В. Имитационная модель многоядерного процессора / М. В. Глущенко, А. А. Ширяев // Общество - наука - инновации : сборник статей по итогам Всероссийской научно-практической конференции, Иркутск, 22 декабря 2019 года. – Иркутск: Общество с ограниченной ответственностью "Агентство международных исследований", 2019. – С. 15-17.

20 Галанина О.В. Моделирование восстановления численности популяций на основе изучения их возрастного состава // Известия Санкт - Петербургского государственного аграрного университета. - Санкт - Петербург. - 2015. №40. С.197 - 202.

21 Галанина О.В. Имитационная модель оценки качеств служебных собак / О. В. Галанина // Научные исследования - основа современной инновационной системы : сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Екатеринбург., 14 ноября 2019 года. – Екатеринбург.: Общество с ограниченной ответственностью "Агентство международных исследований", 2019. – С. 13-17.

22 Усманова З.А. Имитационная модель проектной деятельности коммерческого банка / З. А. Усманова // Математическое и компьютерное моделирование в экономике, страховании и управлении рисками. – 2019. – № 4. – С. 197-201.

23 Метлицкая Д.В. Имитационная модель динамики развития опасных метеоявлений / Д. В. Метлицкая, В. Н. Канадин // Моделирование авиационных систем : материалы Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 21–22 ноября 2013 года. – Москва: Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, 2013. – С. 159-160.

24 Корольков А. В. Имитационная модель изменения формы газового пузыря в жидкости в условиях реального космического полета / А. В. Корольков, В. Б. Сапожников // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. – 2005. – № 4. – С. 51-52.

25 Семочкина Е. В. Прогнозирование публикации заказов одного менеджера по продажам рекламных площадей с помощью среды моделирования "GPSS world" / Е. В. Семочкина // Информационные технологии. Проблемы и решения. – 2020. – № 1(10). – С. 70-76.

26 Агапова Е. Г. Разработка имитационной модели участка транспортной сети в GPSS Studio / Е. Г. Агапова, Т. М. Попова // International Journal of Advanced Studies. – 2020. – Т. 10. – № 4. – С. 145-151. – DOI 10.12731/2227-930X-2020-4-145-151.

27 Девятков В. В. Имитационное исследование бизнес-процессов с очередями с помощью среды моделирования GPSS Studio / В. В. Девятков, А. В. Габалин // Открытое образование. – 2020. – Т. 24. – № 3. – С. 67-77. – DOI 10.21686/1818-4243-2020-3-67-77.

28 Vasileva S. Opportunities of the GPSS Studio for training of students in hotel management / S. Vasileva // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018 : Conference proceedings, Albena, Bulgaria, 02–08 июля 2018 года. – Albena, Bulgaria: Общество с ограниченной ответственностью СТЕФ92 Технолоджи, 2018. – P. 633-640. – DOI 10.5593/sgem2018/2.1/S07.081.

29 Лыкова А. И. Использование системы моделирования GPSS с целью оптимизации функционирования логистических систем / А. И. Лыкова, Д. В. Каменев // Логистические системы в глобальной экономике. – 2014. – № 4. – С. 158-163.

30 Кривчиков В. С. Моделирование процесса выбора оптимального набора ресурсов ЭВМ для построения панорамных изображений средствами языка имитационного моделирования GPSS / В. С. Кривчиков // Вестник современных исследований. – 2019. – № 1.3(28). – С. 99-102.

31 Степанова А. С. Имитационная модель многопроцессорной системы в среде GPSS World / А. С. Степанова, Е. В. Чепин // Бизнес-информатика. – 2010. – № 2(12). – С. 11-14.

32 Бахарева Н. Ф. Моделирование мультисервисной сети Центробанка РФ / Н. Ф. Бахарева, А. Л. Коннов // Инфокоммуникационные технологии. – 2008. – Т. 6. – № 1. – С. 76-79.

33 Володин А. Ю. Особенности моделирования многопроцессорных систем с однородной структурой с помощью сетей массового обслуживания / А. Ю. Володин // Системы управления и информационные технологии. – 2008. – № 1(31). – С. 11-16.

34 Черненький В. М. Метод описания процессов выполнения заданий в мультипрограммных и многопроцессорных системах / В. М. Черненький, П. С. Семкин // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. – 2014. – № 1(94). – С. 121-132.

35 Производительность отечественного процессора Эльбрус-8С в суперкомпьютерном моделировании задач вычислительной газовой динамики / А. В. Горобец, М. И. Нейманзаде, С. К. Окунев [и др.] // Математическое моделирование. – 2019. – Т. 31. – № 4. – С. 17-32. – DOI 10.1134/S0234087919040026.

Работа выполнена при поддержке Субсидии Министерства науки и высшего образования РФ (проект №13.2251.21.0098, соглашение №075-15- 2021-1017).

Поступила 28 октября 2022 г.

When developing artificial intelligence systems based on memristors, it is necessary to determine which values of the main indicators of the quality of their functioning: accuracy, fault tolerance, reliability, performance, speed, energy consumption, etc. - will eventually be achieved. These parameters can be estimated using simulation at different levels of the structural and functional hierarchy of the system. This paper shows that GPSS is a suitable tool for solving this problem at the system level. During of experiments in the GPSS language, models of distributed computing systems based on memristors with one and several data sources and with one and several data processing units were developed.

Key words: memristor, neuromorphic systems, hardware AI-accelerators, GPSS language, data models, performance.

Подгорнова Юлия Анатольевна – кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем Муромского института (филиала) ФГОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: yuliyabulanova@yandex.ru.

Никишов Даниил Андреевич – стажер-исследователь лаборатории разработки систем искусственного интеллекта Муромского института (филиала) ФГОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: daniilnikisov74@gmail.com.

Щаников Сергей Андреевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории разработки систем искусственного интеллекта Муромского института (филиала) ФГОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: seach@inbox.ru.

Адрес: 602264, Муром, ул. Орловская, д. 23.