

Интернет-журнал «Наукovedение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 7, №1 (2015) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol7-1>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/76TVN115.pdf>

DOI: 10.15862/76TVN115 (<http://dx.doi.org/10.15862/76TVN115>)

**УДК 004.94**

**Удалов Алексей Владимирович**

ФГБОУ ВПО «Тверской государственный технический университет»  
Россия, Тверь<sup>1</sup>

Аспирант кафедры «Электронные вычислительные машины»

E-mail: [yduck@yandex.ru](mailto:yduck@yandex.ru)

## **Экспериментальное исследование характеристик распределённых моделей цифровой электронной техники, построенных с использованием D-сетей Петри**

---

<sup>1</sup> г. Тверь, ул. Тамары Ильиной, д. 32А, кв. 80

**Аннотация:** На современном этапе распределённые имитационные модели получают всё большую популярность при моделировании сложных распределённых систем. Одним из наиболее ярких примеров таких систем являются устройства цифровой автоматики и вычислительной техники.

Проведенные исследования показали, что на современном этапе наиболее перспективным математическим аппаратом для моделирования устройств цифровой электронной техники являются D-сети Петри, которые по моделирующей мощности приближаются к машине Тьюринга, при этом имеют богатые аналитические возможности.

Компонента распределённой модели в рамках рассматриваемой концепции представляет собой совокупность функционального модуля и его внешнего представителя. Для изучения влияния используемой при построении модели архитектуры на её характеристики автором предложена методика оценки характеристик моделей. Описываемые подходы, используемые при построении распределённых моделей и оценки их характеристик, были использованы при разработке системы распределённого имитационного моделирования на языке C#. С её помощью были проведены экспериментальные исследования, которые позволили сделать следующие выводы.

Во-первых, при моделировании цифровых электронных устройств небольшой сложности монолитные модели обладают большим быстродействием, требуют меньше памяти и занимают меньший объём при хранении описания в формате XML.

Во-вторых, с ростом сложности электронного устройства распределённые модели становятся более быстродействующими, чем монолитные. Вдобавок повышается эффективность хранения модели в формате XML. Несмотря на это, объём требуемой для распределённой модели оперативной памяти превышает аналогичный показатель для монолитных моделей.

Описанный способ реализации компоненты распределённой модели позволяет эффективно организовать размещение и функционирование модели в разных приложениях и даже на разных компьютерах.

Проведённые экспериментальные исследования показали, что быстродействие распределённой модели, компоненты которой размещены в разных адресных пространствах ниже, чем в едином. Предположительно, организация параллельной работы компонент распределённой модели должна позволить значительно повысить быстродействие при размещении компонент в разных адресных пространствах.

**Ключевые слова:** монолитные модели; распределённые модели; цифровая электронная техника; сети Петри; быстродействие моделей; эффективность моделей; компонента распределённой модели; иерархические модели; распределённое моделирование; параллельное функционирование.

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Удалов А.В. Экспериментальное исследование характеристик распределённых моделей цифровой электронной техники, построенных с использованием D-сетей Петри // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №1 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/76TVN115.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/76TVN115

На современном этапе распределённые имитационные модели получают всё большую популярность при моделировании сложных распределённых систем. Одним из наиболее ярких примеров таких систем являются устройства цифровой автоматики и вычислительной техники. Как правило, распределённые модели отличаются от традиционных (монолитных) тем, что состоят из взаимодействующих автономных частей (компонент) не только на этапе построения, но и в ходе имитационного эксперимента и отладки модели. Основными преимуществами использования таких моделей являются сохранение модульной структуры реального объекта (монолитные модели полностью теряют модульную структуру при выполнении синтеза), повышение быстродействия, а также возможность размещения, редактирования и выполнения моделирования с использованием нескольких компьютеров в сети [1].

Проведенные исследования показали, что на современном этапе наиболее перспективным математическим аппаратом для моделирования устройств цифровой электронной техники являются D-сети Петри, которые по моделирующей мощности приближаются к машине Тьюринга, при этом имеют богатые аналитические возможности [2]. Однако для применения описанного подхода при построении моделей необходимо использование соответствующих алгоритмов функционирования, способа реализации распределённых компонент модели, их взаимодействия и синхронизации.

Компонента распределённой модели в рамках рассматриваемой концепции представляет собой совокупность функционального модуля и его внешнего представителя. Под модулем понимается функционально завершённая часть модели, в которой выделены наборы доступных извне состояний и команд, необходимых для взаимодействия с другими компонентами. Функциональные модули не могут взаимодействовать напрямую и используют для этой цели своих внешних представителей. Таким представителем является блок, представляющий собой упрощённую версию функционального модуля, основной задачей которого является реализация интерфейса для команд и состояний. Внешний представитель и функциональный модуль находятся в постоянном взаимодействии между собой. Для этого они выполняют взаимную подписку на происходящие в них события, что позволяет им обмениваться сообщениями [3, 4].

Такой подход позволяет эффективно организовать иерархические уровни и связи в распределённой модели. Самый нижний иерархический уровень представлен монолитными моделями. Такую часть модели называют подчинённой компонентой. Внешние представители подчинённой компоненты встраиваются в функциональный модуль более высокого иерархического уровня, который называют главной компонентой. Таким образом организуются связи между функциональными модулями главной и подчинённой компонент. Количество таких уровней в общем случае не ограничено.

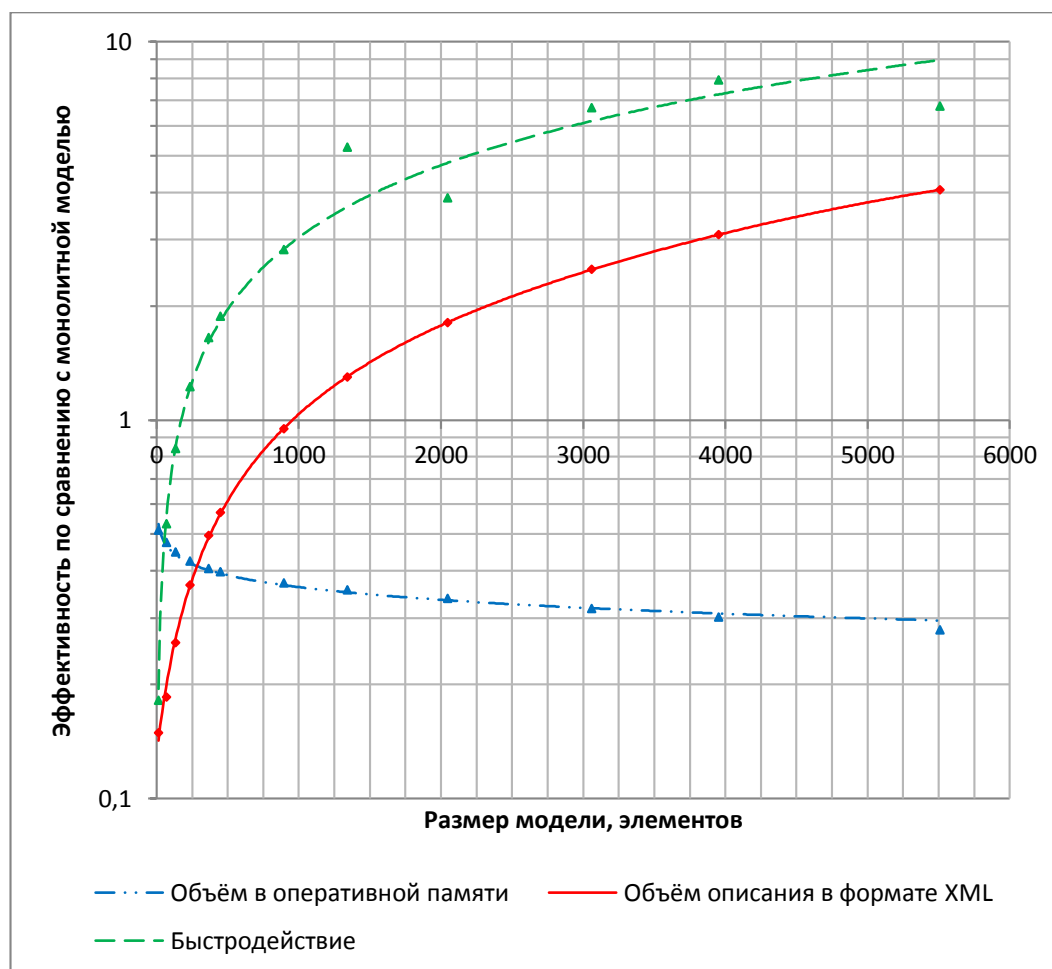
Главная компонента содержит внешние представители своих подчинённых компонент и позволяет с их помощью взаимодействовать их функциональными модулями. Иными словами, функциональные модули одного иерархического уровня в соответствии с описываемой концепцией взаимодействуют не напрямую, а посредством их внешних представителей, размещённых в главной компоненте [5].

Для изучения влияния используемой при построении модели архитектуры на её характеристики была проведена экспериментальная оценка быстродействия, объёма хранения в оперативной памяти и в базе данных в формате XML. Эксперименты проводились для моделей различной сложности, состоящих из 13÷5509 базисных элементов (позиций, переходов и дуг D-сети Петри) и 1÷96 компонент. Оценка эффективности хранения в оперативной памяти выполнялась после сериализации в бинарный файл загруженной из XML-базы данных модели. Затем производилось измерение размеров полученных файлов и их сопоставление.

При оценке быстродействия моделей использовалась следующая методика. На вход модели производится подача выходного сигнала генератора возмущающих воздействий с частотой, определяемой временем её реакции на поступающие возмущения. Это позволяет обеспечить непрерывную работу модели в масштабе модельного времени. Имитационный эксперимент длится определенный интервал реального времени, по окончании которого измеряется достигнутое значение модельного времени. Очевидно, что та модель, которая за одинаковый интервал реального времени продвинет своё модельное время на большую величину, обладает наибольшим быстродействием.

Для большей наглядности отображения полученных результатов экспериментов введем показатель эффективности распределенной модели по сравнению с монолитной. Очевидно, что модель одного и того же реального объекта, обладающая меньшим размером, более эффективна при хранении в оперативной памяти или базе данных. Поэтому под эффективностью при хранении понимается превышение размера модели монолитной архитектуры над распределенной (формулы 1, 2). При определении эффективности по быстродействию модели следует исходить из обратного соотношения (формула 3).

$$E_{ОП} = \frac{S_{ОП.М}}{S_{ОП.Р}} \quad (1); \quad E_{описания} = \frac{S_{описания.М}}{S_{описания.Р}} \quad (2); \quad E_{быстр} = \frac{\Delta t_P}{\Delta t_M} \quad (3).$$



*Рисунок 1. Эффективность использования распределенной модели по сравнению с монолитной (составлено автором)*

**Таблица 1**

**Результаты экспериментального исследования характеристик распределённой и монолитной моделей (составлено автором)**

Реальный объект (цифровое устройство)	Размер модели, элементов	$E_{оп}$	$E_{описания}$	$E_{быстр}$
K155ЛА3	13	0,51	0,15	0,18
K155TP2	66	0,48	0,19	0,53
2xK155TP2	132	0,45	0,26	0,84
K155TM2	234	0,42	0,37	1,23
K155TM2, K155TP2	366	0,41	0,50	1,65
K155TB1	447	0,40	0,57	1,88
2xK155TB1	894	0,37	0,95	2,82
3xK155TB1	1341	0,36	1,30	5,27
K155ИП3	2045	0,34	1,81	3,86
K155ИЕ7	3058	0,32	2,50	6,69
K155ИЕ7, 2xK155TB1	3952	0,30	3,09	7,92
K155ИР13	5509	0,28	4,06	6,76

Описанные подходы были использованы при разработке системы распределённого моделирования цифровых электронных устройств на языке C# и исследовании характеристик распределённой и монолитной моделей. Эксперименты выполнены на ПК с 2-ядерным процессором Intel Core i5-3230M с включенной технологией Hyper-Threading.

Экспериментальные исследования позволили получить результаты, представленные на рисунке 1 и в таблице 1. Проведённый анализ результатов позволяет сформулировать следующие выводы о характеристиках монолитных и распределённых имитационных моделей цифровой электронной техники.

Во-первых, при моделировании цифровых электронных устройств небольшой сложности (менее 250 базисных элементов) монолитные модели обладают большим быстродействием. Кроме того, такие модели требуют меньше памяти и для выполнения имитационного эксперимента, и для их хранения.

Во-вторых, с ростом сложности электронного устройства (более 250 базисных элементов) распределённые модели становятся более быстродействующими, чем монолитные. Основной причиной этому является значительное снижение числа базисных элементов в каждой компоненте, и, как следствие, уменьшение времени, необходимого на воспроизведение модели. Кроме того, повышается эффективность хранения модели в формате XML (более 1000 элементов). Это связано с использованием ссылочного хранения повторяющихся модулей. Несмотря на это, объем требуемой для распределённой модели оперативной памяти превышает аналогичный показатель для монолитных моделей. Более того, распределённые модели более сложных реальных объектов требуют более значительного объема оперативной памяти по сравнению с монолитной. Причиной этому является увеличение объема информации, которая содержит в себе структуру распределённой модели. Поэтому снижение информационной нагрузки на компьютер при использовании распределённых моделей является актуальной задачей.

Описанный способ реализации компоненты распределённой модели позволяет эффективно организовать размещение и функционирование модели в разных приложениях и

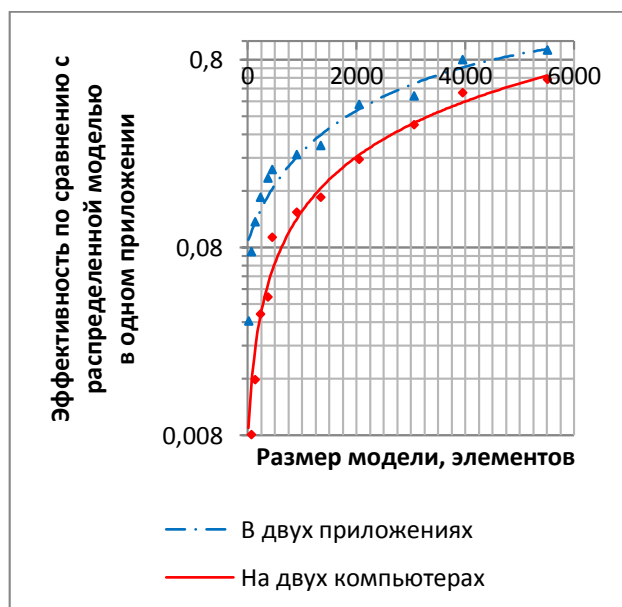
даже на разных компьютерах с помощью подсистемы конфигурирования и сетевого взаимодействия компонент, разработанной с использованием современных технологий сетевого взаимодействия [6]. Во-первых, это снижает информационную нагрузку на каждый отдельный компьютер и позволяет разрабатывать такие сложные модели, которые не могли быть размещены в оперативной памяти одного компьютера при использовании традиционной архитектуры моделей [7, 8]. Во-вторых, происходит снижение вычислительной нагрузки на каждый отдельный компьютер. В-третьих, использование множества компьютеров позволяет вести командную разработку и отладку проектов реальных объектов в распределённой системе моделирования. Однако при взаимодействии компонент распределённой модели в разных адресных пространствах неизбежно снижается быстродействие модели.

Для изучения степени влияния этого фактора была произведена экспериментальная оценка быстродействия распределенной модели при различных условиях размещения её компонент (рисунок 2 и таблица 2), которая позволила сформулировать следующие выводы.

Во-первых, быстродействие распределенной модели, компоненты которой размещены в разных приложениях одного компьютера, значительно ниже быстродействия той же модели в одном приложении. С ростом сложности модели быстродействие повышается, но не превышает его значения распределенной модели в едином адресном пространстве.

Во-вторых, быстродействие распределенной модели, компоненты которой размещены на разных компьютерах, еще ниже, чем в случае использования двух приложений одного компьютера. Характер изменения быстродействия при росте сложности модели аналогичен предыдущему случаю.

Такие результаты объясняются следующими причинами. Во-первых, влиянием накладных расходов на формирование и разбор пакетов для передачи сообщений от компоненты к компоненте. Во-вторых, что более важно, добавляются затраты времени на передачу сформированных пакетов по каналам связи. Поэтому актуальной задачей является разработка способа повышения быстродействия распределённых моделей при размещении их компонент в разных адресных пространствах.



**Рисунок 2.** Снижение быстродействия распределенной модели при размещении её компонент в различных адресных пространствах (составлено автором)

**Таблица 2**

**Показатели быстродействия распределённой модели при размещении её компонент в двух приложениях и на двух компьютерах (составлено автором)**

Состав модели	Сложность модели, элементов	$E_{\text{быстр.ДП}}$	$E_{\text{быстр.ДК}}$
K155ЛА3	13	0,0324	0,0003
K155TP2	66	0,0761	0,0080
2xK155TP2	132	0,1094	0,0158
K155TM2	234	0,1479	0,0353
K155TM2, K155TP2	366	0,1870	0,0436
K155TB1	447	0,2078	0,0903
2xK155TB1	894	0,2500	0,1228
3xK155TB1	1341	0,2781	0,1474
K155ИП3	2045	0,4611	0,2351
K155ИЕ7	3058	0,5110	0,3590
K155ИЕ7, 2xK155TB1	3952	0,7962	0,5308
K155ИР13	5509	0,8954	0,6246

Традиционным способом снижения влияния задержек при передаче сообщений по сети является организация параллельной работы отдельных подпрограмм алгоритма работы модели [9, 10]. Под параллельной работой обычно понимают одновременное (или квази-одновременное, в случае мультипрограммирования) выполнение нескольких подпрограмм. Таким образом, устранение ожидания одной подпрограммой завершения другой, не блокирующей её выполнения, подпрограммой, обычно позволяют повысить быстродействие и скрыть задержки при передаче по каналам связи. Однако необходимо дополнительно проанализировать, может ли он быть использован и каким образом, а главное – его эффективность должна быть подтверждена дополнительными экспериментальными исследованиями.

Рассмотренные в статье подходы к построению моделей использованы при разработке системы распределённого моделирования цифровой электронной техники. Автором предложены методики проведения экспериментальных исследований для оценки характеристик быстродействия и эффективности хранения моделей. Кроме того, автором получены результаты экспериментов, обобщение которых позволило сформулировать выводы об эффективности использования распределённой или монолитной архитектуры модели в зависимости от её сложности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Применение распределенных моделей для повышения эффективности САПР цифровых электронных устройств. / А.В. Удалов, А.А. Веселов // Тверь: ТвГТУ. Сборник научных трудов магистрантов и аспирантов. 2012. №1. С. 30-33.
2. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем: пер. с англ. М.: Мир, 1984. 290 с.
3. Pathak, N. Pro WCF 4 Practical Microsoft SOA. / N. Pathak. New York: Apress, 2011. 472 p.
4. К. Нагел. C# 4 и платформа .NET 4 для профессионалов: пер. с англ. Киев: Изд. дом «Диалектика-Вильямс», 2011. 1440 с.
5. Особенности реализации моделей цифровой электронной техники. / А.В. Удалов, А.А. Веселов // Тверь: ТвГТУ. Сборник научных трудов магистрантов и аспирантов. 2013. №3. С. 23-25.
6. Удалов А.В. Использование технологий .NET FRAMEWORK для реализации сетевого взаимодействия компонент распределенной модели цифровой электронной техники / М.: Научтехлитиздат. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2014. №8. С. 10-14.
7. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. 4-е изд. СПб.: Питер, 2010. 944 с.
8. Кровчик Э. Сетевое программирование в .NET для профессионалов: пер. с англ. М.: Изд. дом «Лори», 2005. 417 с.
9. Tanenbaum, A. Distributed Systems: Principles and Paradigms. Second Edition. / A. Tanenbaum, M. Steen. Prentice Hall, 2006. 704 p.
10. Танненбаум Э. Современные операционные системы. 3-е изд.: пер. с англ. СПб.: Питер, 2010. 1120 с.

**Рецензент:** Статья рецензирована членами редколлегии.



**Udalov Aleksey Vladimirovich**

Federal national budgetary educational institution of higher professional education Tver State  
Technical University  
Russia, Tver  
E-mail: [yduck@yandex.ru](mailto:yduck@yandex.ru)

## **Experimental examination of characteristics of digital electronic equipment distributed models, constructed using the D-Petri Nets**

**Abstract.** Popularity of distributed simulation models at modeling complex distributed systems is growing at the present stage. One of the most striking examples of such systems is digital automation and computing devices.

Researches have shown that the most promising formalism for digital electronic equipment modeling at the present stage are D-Petri nets, which modeling power is close to the Turing machine one. Besides it has rich analytical capabilities.

Component of distributed model in the framework of this concept is a set of function module and its external representative. The technique of model performance evaluation is proposed by author to study the influence of model architecture on its characteristics. Described approaches to a distributed model construction and a characteristics evaluation were used in the development of distributed simulation system in C#. Carried out experimental researches have led to the following conclusions.

Firstly, small complexity monolithic models of digital electronic devices are faster, require less memory and its XML-description occupy less space.

Secondly, the increasing complexity distributed models of electronic devices become more high-performance than monolithic. In addition, distributed model XML-description efficiency is improved. Despite of this, distributed model requires a more RAM than monolithic.

The described method of a distributed model component implementation allows to efficiently organize a placement and simulation of models in different applications and even on different computers.

The conducted experiments have shown that a performance of the distributed model, the components of which are located in different address spaces, is lower than in the one space. Presumably, the organization of parallel operation of distributed model components should allow to significantly improve performance when components are placed in different address spaces.

**Keywords:** monolithic models; distributed models; digital electronic equipment; Petri nets; models performance; models efficiency; distributed model component; hierarchical models; distributed modeling; parallel operation.

## REFERENCES

1. Primenenie raspredelennykh modeley dlya povysheniya effektivnosti SAPR tsifrovyykh elektronnykh ustroystv. / A.V. Udalov, A.A. Veselov // Tver': TvGTU. Sbornik nauchnykh trudov magistrantov i aspirantov. 2012. №1. S. 30-33.
2. Piterson Dzh. Teoriya setey Petri i modelirovanie sistem: per. s angl. M.: Mir, 1984. 290 s.
3. Pathak, N. Pro WCF 4 Practical Microsoft SOA. / N. Pathak. New York: Apress, 2011. 472 p.
4. K. Nagel. C# 4 i platforma .NET 4 dlya professionalov: per. s angl. Kiev: Izd. dom «Dialektika-Vil'yams», 2011. 1440 s.
5. Osobennosti realizatsii modeley tsifrovoy elektronnoy tekhniki. / A.V. Udalov, A.A. Veselov // Tver': TvGTU. Sbornik nauchnykh trudov magistrantov i aspirantov. 2013. №3. S. 23-25.
6. Udalov A.V. Ispol'zovanie tekhnologiy .NET FRAMEWORK dlya realizatsii setevogo vzaimodeystviya komponent raspredelennoy modeli tsifrovoy elektronnoy tekhniki / M.: Nauchtekhlitizdat. Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. 2014. №8. S. 10-14.
7. Olifer V.G., Olifer N.A. Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly. 4-e izd. SPb.: Piter, 2010. 944 s.
8. Krovchik E. Setevoe programmirovaniye v .NET dlya professionalov: per. s angl. M.: Izd. dom «Lori», 2005. 417 s.
9. Tanenbaum, A. Distributed Systems: Principles and Paradigms. Second Edition. / A. Tanenbaum, M. Steen. Prentice Hall, 2006. 704 p.
10. Tannenbaum E. Sovremennyye operatsionnyye sistemy. 3-e izd.: per. s angl. SPb.: Piter, 2010. 1120 s.