

# Влияние дополнительных иерархических уровней на рабочие характеристики распределенных моделей

А. А. Веселов<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Тверской государственный технический университет, Тверь, Россия

\* Veselov\_A\_A@mail.ru

**Аннотация.** При проектировании современных средств вычислительной техники и цифровой электроники огромная роль отводится использованию имитационных моделей, которые позволяют выявлять ошибки на самых разных стадиях разработки изделия. Вначале для этого широко использовались монолитные модели. Но они хорошо работали только тогда, когда их размеры были относительно небольшими. Поэтому разработчики постепенно стали отказываться от использования монолитных моделей и переходить к использованию распределенных моделей, позволяющих повысить их быстродействие и расширить границы допустимых размеров. При этом особое внимание начали уделять иерархическим распределенным моделям, которые обеспечивают возможность исследовать поведение создаваемых устройств на разных уровнях детализации. Подобные модели позволили заметно раздвинуть допустимые границы их размеров и увеличить скорость работы. Однако такие распределенные модели обладают тем недостатком, что их эффективность заметно зависит не только от количества компонент, входящих в их состав, но и от размеров этих компонент. В работе приведены результаты исследования влияния введения дополнительного верхнего иерархического уровня на рабочие характеристики распределенных моделей на основе сетей Петри. Показано, что применение такого способа модификации распределенных моделей приводит к повышению их быстродействия в широком диапазоне изменения размеров. При этом наиболее значимый эффект достигается в распределенных моделях, содержащих большое количество компонент небольшого размера. Максимальное быстродействие модифицированных таким образом моделей может быть на порядок выше, чем у немодифицированных. В результате кроме общего увеличения эффективности модифицированных иерархических распределенных моделей это привело еще и к существенному выравниванию рабочих характеристик модифицированных распределенных моделей с подчиненными компонентами разного размера.

**Ключевые слова:** распределенные модели, сети Петри, модельное время, быстродействие, компонента, функциональный модуль, внешний представитель, иерархические уровни

**Для цитирования:** Веселов А. А. Влияние дополнительных иерархических уровней на рабочие характеристики распределенных моделей // Прикладная информатика. 2020. Т. 15. № 6. С. 78–90. DOI: 10.37791/2687-0649-2020-15-6-78-90

# Influence of additional hierarchical levels on the working characteristics of distributed models

A. Veselov<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Tver state technical university, Tver, Russia

\* Veselov\_A\_A@mail.ru

**Abstract.** In designing modern computer equipment and digital electronics, the use of simulation models is of great importance. At first, monolithic models were widely used for this. However, they worked well only when their size was relatively small. Because of it developers began to refuse gradually use of monolithic models and to pass to use of the distributed models allowing to increase their speed and to expand borders of their admissible sizes. At the same time, they begin to pay special attention to hierarchical distributed models, which provide the opportunity to investigate the behavior of the created devices at different levels of detail. Similar models made it possible to noticeably expand the permissible boundaries of their sizes and increase the speed of work. However, such distributed models have the disadvantage that their effectiveness is noticeably dependent not only on the number of components included in their composition, but also on the size of these components. The paper presents the results of a study of the effect of introducing an additional upper hierarchical level on the performance of distributed models based on Petri networks. The use of such a method of modifying distributed models leads to an increase in their speed in a wide range of changes in their sizes. At the same time, the most significant effect achieved in distributed models containing a large number of small components. The maximum speed of the thus modified models can be an order of magnitude higher than that of the non-modified ones. As a result, in addition to the overall increase in the efficiency of the modified hierarchical distributed models, this also led to a significant equalization of the performance of the modified distributed models with subordinate components of different sizes.

**Keywords:** distributed models, petri networks, model time, performance, components, function module, external representative, hierarchical levels

**For citation:** Veselov A. Influence of additional hierarchical levels on the working characteristics of distributed models. *Prikladnaya informatika*=Journal of Applied Informatics, 2020, vol.15, no.6, pp.78-90 (in Russian). DOI: 10.37791/2687-0649-2020-15-6-78-90

## Введение

В настоящее время моделирование находит все большее применение в самых различных областях и приобретает особо важное значение. Для того чтобы наилучшим образом учитывать особенности поведения моделируемых объектов, были разработаны теоретические основы, позволяющие осуществлять их описание и анализ их свойств. Например, теория автоматов, теория систем массового обслуживания, цепи Маркова, сети

Петри и другие. Вне зависимости от используемого теоретического аппарата наибольшую популярность получили так называемые монолитные модели. Однако по мере их развития постепенно стал намечаться переход от монолитных моделей к распределенным [1–3].

Среди теоретических аппаратов, используемых для моделирования устройств цифровой электроники и вычислительной техники, особое место занимают сети Петри (СП) [4, 5]. В рамках этого направления автором

было разработано специальное расширение СП, получившее условное наименование DPN [6]. Оно было максимально приспособлено для моделирования свойств и особенностей поведения объектов цифровой и вычислительной техники. Затем на основе этого расширения была разработана и его распределенная версия под названием DDPN [7], реализованная в виде программного инструментального средства для распределенного моделирования [8]. Разработанная система позволяла достаточно просто и легко формировать распределенные иерархические модели и наблюдать их поведение с разной степенью детализации.

Исследование созданной системы показало ее хорошую работоспособность и значительно более высокую эффективность применения распределенных моделей по сравнению с их монолитными аналогами [9]. Так, например, было установлено, что скорость выполнения распределенных моделей большого размера могла превышать скорость выполнения их монолитных аналогов более чем в 100 раз, а время их загрузки уменьшалось до 10 раз. Одно только это обстоятельство позволяет надеяться на существенное расширение области практического применения имитационных моделей при проектировании устройств цифровой и вычислительной техники.

В данной работе представлены результаты более расширенных исследований, направленных на поиск дополнительных способов повышения скорости выполнения распределенных моделей. При этом особое внимание было уделено тому факту, что скорость моделирования зависит как от количества, так и от размеров подчиненных компонент.

## 1. Условия проведения экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились с помощью системы распределенного моделирования [8], которая позволяет создавать, редактировать, запускать на функционирование и наблюдать поведение как монолитных, так

и распределенных DDPN-моделей. В качестве объектов исследования использовались модели, имитирующие поведение функциональных элементов, наиболее часто применяемых в качестве базовых для построения современных средств цифровой автоматики и вычислительной техники (мультиплексоры, дешифраторы, триггера, счетчики, делители частоты и т. д.).

На рисунке 1 показана структура 3-уровневой распределенной модели. Такая структура характерна для моделей функциональных элементов вычислительной техники, таких как ТМ2, ТВ1 и др.

На первом иерархическом уровне отображается только самое общее представление о распределенной модели, не раскрывающее внутренних деталей реализации ее составных частей (компонент). В соответствии с [7] каждая такая компонента состоит из двух взаимодействующих между собой частей: функциональной (функциональный модуль – ФМ) и представительской (внешний представитель функционального модуля – ВПФМ) частей. На представленном рисунке ФМ изображены в виде закрашенных прямоугольников, а ВПФМ – в виде окружностей. Сами ФМ не могут взаимодействовать между собой непосредственно, а только через своих внешних представителей на более верхних иерархических уровнях. ФМ, реализующие функциональность ВПФМ, располагаются на следующем (более нижнем) иерархическом уровне. Таким образом, функциональные модули на каждом иерархическом уровне содержат полномочные внешние представители подчиненных им компонент и соответствующие связи между ними. Если у ФМ нет ни одной подчиненной компоненты, то такой модуль представлен в виде обычной (не распределенной) DPN-модели. ФМ самого нижнего иерархического уровня относятся именно к такой их разновидности. Подобный подход к формированию структуры распределенной модели позволяет пользователю просматривать и изучать как ее общее поведение, так и поведение составных частей с разной степенью детализации.

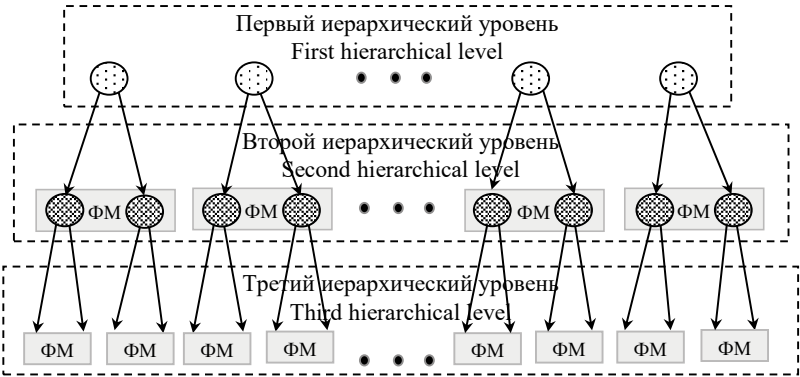


Рис. 1. Структура исходной распределенной 3-уровневой модели  
Fig. 1. Structure of the initial distributed 3-level model

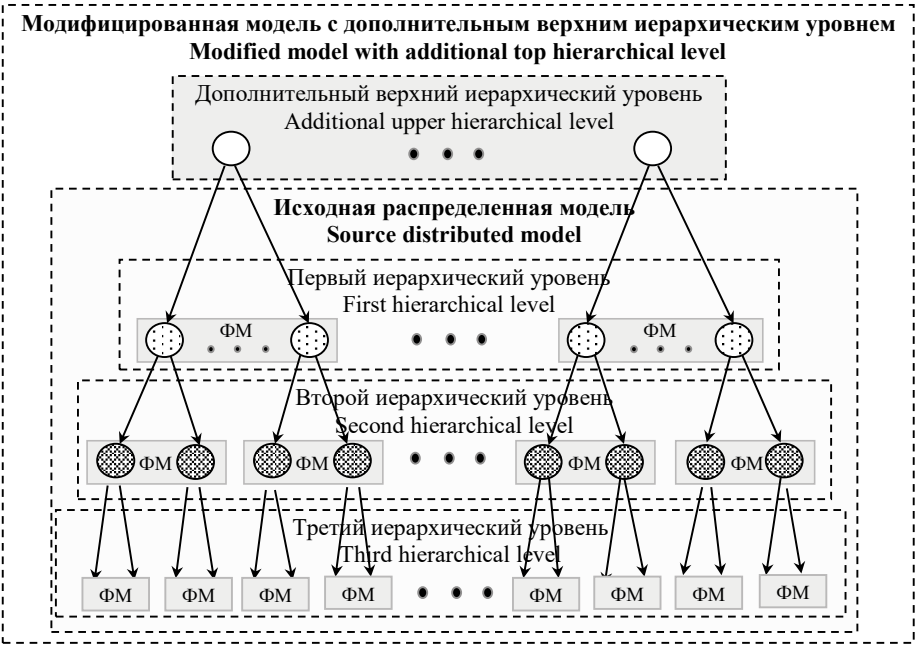


Рис. 2. Структура распределенной модели с добавленным иерархическим уровнем  
Fig. 2. Structure of distributed model with added hierarchical level

Для ускорения функционирования распределенных моделей с большим количеством подчиненных компонент предлагается использовать возможность введения дополнительного верхнего иерархического уровня. Суть его заключается в том, чтобы сгруппировать подчиненные компоненты в более крупные компоненты и представить их в виде отдельных ФМ, из внешних представителей которых формируется дополнительный, более верх-

ний иерархический уровень. На рисунке 2 показан результат подобной модификации исходной структуры распределенной модели, представленной на рисунке 1.

Из этого рисунка видно, что множество ВПФМ подчиненных компонент первого иерархического уровня было разделено на отдельные группы. Каждая такая группа оформляется в виде самостоятельного функционального модуля, внешний представитель кото-

рого размещается на новом, более верхнем иерархическом уровне. В результате получаем новый (дополнительный) иерархический уровень исходной распределенной модели, отображающий ее представление на еще более высоком уровне. Такое преобразование структуры исходной распределенной модели в модифицированный вариант позволяет получить более компактное ее представление на новом иерархическом уровне, что улучшает ее обзорность и возможность более легкого понимания работы модели и особенностей взаимодействия ее составных частей.

Для сравнительной оценки исходной и модифицированной распределенных моделей были использованы следующие показатели.

Процесс функционирования модели осуществляется в результате срабатывания ее переходов. В свою очередь, это приводит к соответствующему изменению времени внутри модели (модельное время  $T_m$ ). Если модель непрерывно функционирует в течение некоторого фиксированного интервала (астрономическое время  $T_a$ ), то по максимально достижимому значению модельного времени можно судить о скорости ее выполнения (работы). Для того, чтобы сравнивать скорости работы исходной распределенной модели и ее модифицированного аналога вводится сравнительный коэффициент их эффективности по быстродействию, определяемый как отношение

$$K_{\text{э.б.}} = T_{m. \text{исх.}} / T_{m. \text{мод.}},$$

где  $T_{m. \text{исх.}}$  – максимально достижимое модельное время внутри исходной распределенной модели;

$T_{m. \text{мод.}}$  – максимально достижимое модельное время внутри модифицированной распределенной модели.

При проведении экспериментальных исследований для получения необходимой точности измерения модельного времени величина астрономического времени ( $T_a$ ) принималась равной 1000 секунд.

Для сравнительной оценки эффективности загрузки обычных и модифицированных распределенных моделей использовался ко-

эффициент загрузки в виде следующего отношения:

$$K_{\text{э. загр.}} = T_{\text{з. и. м.}} / T_{\text{з. м. м.}},$$

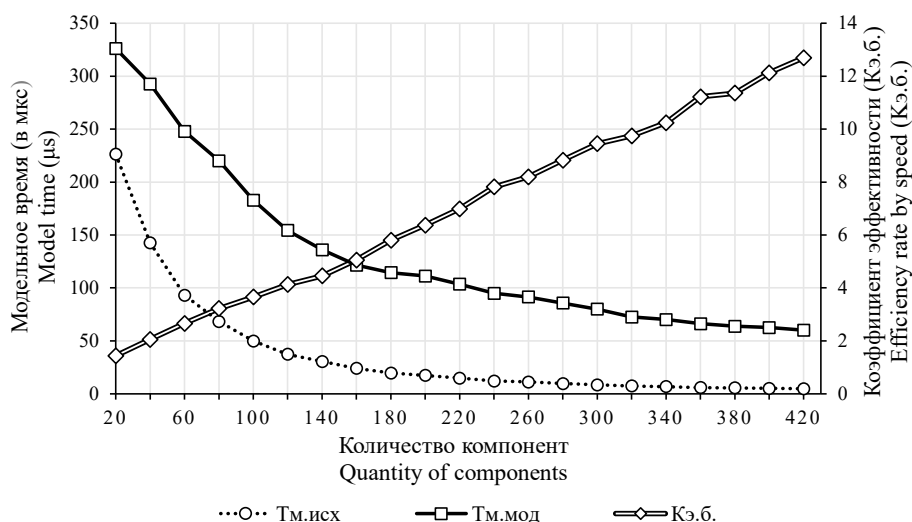
где  $T_{\text{з. и. м.}}$  – время загрузки исходной распределенной модели;

$T_{\text{з. м. м.}}$  – время загрузки модифицированной распределенной модели.

## 2. Исследование распределенных систем с дополнительным иерархическим уровнем

### 2.1. Влияние размера распределенных моделей

В работе [9] были приведены результаты исследований, показавшие явное превосходство распределенных моделей перед их распределенными аналогами. В частности, было установлено, что быстродействие распределенных моделей может значительно превышать аналогичный показатель у монолитных моделей. Было показано, что это преимущество в быстродействии у распределенных моделей зависит как от количества компонент на верхнем иерархическом уровне, так и от их размера и может достигать значений на два порядка больших, чем у их монолитных аналогов. В данной работе решается несколько иная задача, заключающаяся в определении и сравнении рабочих характеристик обычных распределенных моделей и таких же моделей, но с дополнительно введенным иерархическим уровнем. Для этого вначале было исследовано влияние количества компонент на верхнем иерархическом уровне на величину достижимого модельного времени у исходной распределенной модели и у ее модифицированного аналога с дополнительным иерархическим уровнем. Обе модели состоят из набора одинаковых компонент, каждая из которых имитирует поведение функционального элемента цифровой техники триггера типа ТМ2. В соответствии с представленной выше методикой дополнительный иерархический уровень у модифицированных аналогов состоит из 10 ком-



**Рис. 3.** Влияние количества компонент (TM2) на модельное время и эффективность по быстродействию распределенных моделей

**Fig. 3.** Influence of quantity of components (TM2) on model time and efficiency by speed of distributed models

понент, полученных путем объединения внешних представителей функциональных модулей компонент, расположенных на первом иерархическом уровне. Полученные результаты представлены на рисунке 3.

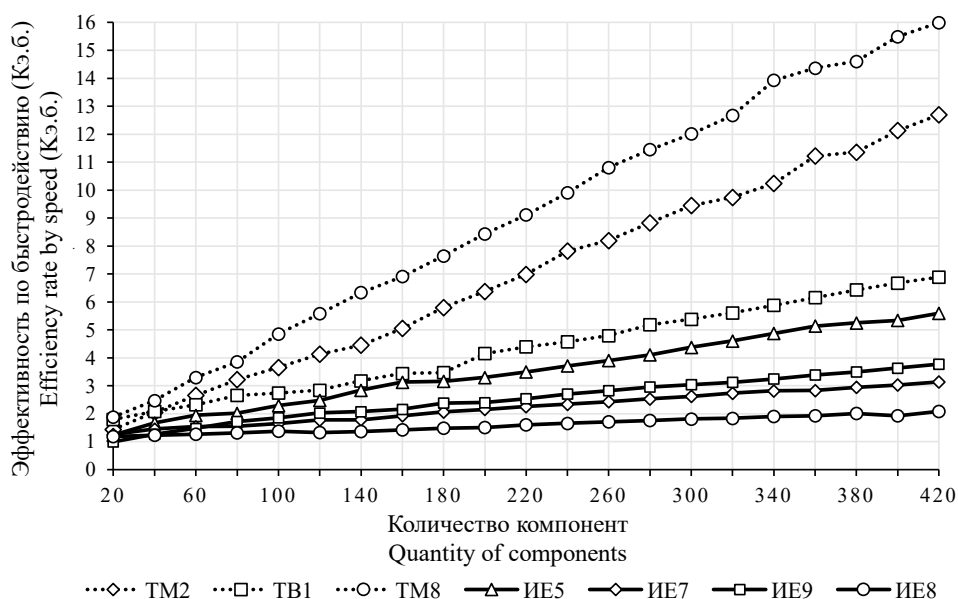
Как видно из представленного рисунка, по мере увеличения размеров моделей достижимое модельное время за фиксированный интервал времени в исходной распределенной модели (пунктирная линия) и модифицированной модели (сплошная линия) постепенно уменьшается. Другими словами, по мере увеличения размера оба вида распределенных моделей становятся все более медленными. Кроме того, темп изменения достижимого модельного времени у модифицированной модели оказывается заметно ниже, чем у исходной. А это означает, что модифицированный вариант распределенной модели показывает более высокую скорость функционирования, чем исходный аналог во всем диапазоне изменения ее размеров. Насколько быстродействие исходной и модифицированной распределенной модели отличается друг от друга видно из графика изменения Кэ.б., представленного на рисунке 3 в виде непре-

рывной двойной линии. Этот график показывает, что быстродействие модифицированной модели может достигать значений более, чем в 12 раз выше, чем быстродействие исходной распределенной модели.

На рисунке 4 представлены графики изменения эффективности по быстродействию модифицированных распределенных систем, построенных на основе компонент, имитирующих поведение уже не только функциональных элементов типа TM2, но и других типов. Таких, как триггера (TM2, TB1 и TM8), счетчики (ИЕ5, ИЕ7, ИЕ9) и делители частоты (ИЕ8).

Анализ графиков на рисунке 4 показывает, что по мере увеличения количества используемых компонент эффективность модифицированных распределенных моделей по сравнению с их исходными моделями непрерывно возрастает. Причем эти зависимости носят явно выраженный линейный характер.

Однако следует отметить и тот факт, что эффективность модифицированных моделей зависит не только от количества, но и от размера составляющих их компонент. В данной работе размер компоненты оценива-



**Рис. 4.** Показатель эффективности модифицированных распределенных моделей в зависимости от количества моделируемых функциональных устройств разного типа

**Fig. 4.** Efficiency indicator of modified distributed models depending on the number of simulated functional devices of different types

ется в количестве базовых элементов сетей Петри, используемых для их построения. Соответствующие данные о размерах компонент, используемых при проведении данного исследования, приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Размеры моделей функциональных элементов

**Table 1.** Dimensions of models of functional elements

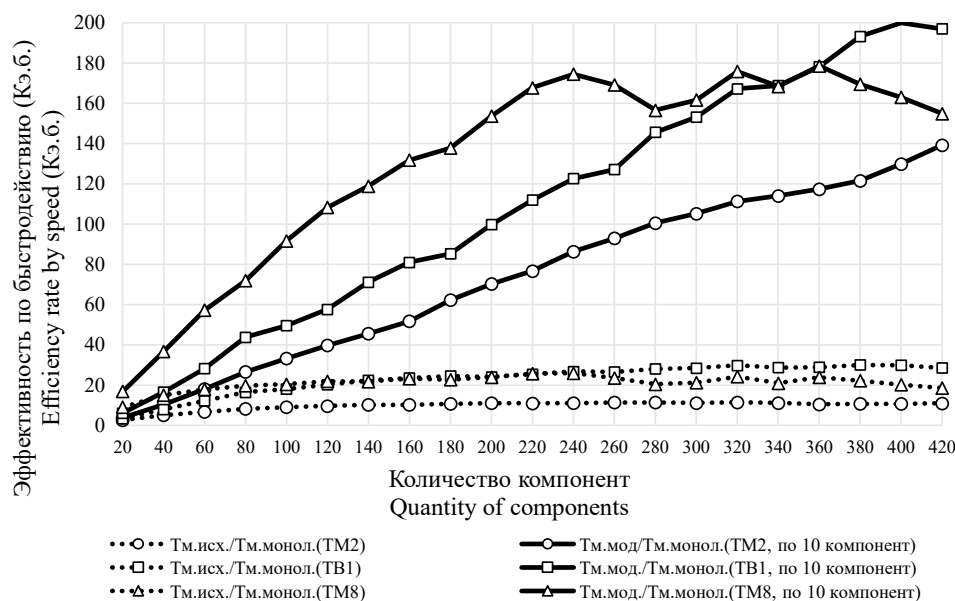
Функциональный элемент / Functional element	TM2	TB1	TM8	IE5	IE9	IE7	IE8
Размер (суммарное количество позиций, переходов и соединений между ними) / Size (total number of positions, transitions and connections between them)	216	366	960	1610	2172	2380	3288

Все перечисленные в таблице 1 компоненты можно условно разделить на компоненты небольшого размера («легкие» компоненты) и компоненты большого размера («тяжелые» компоненты). «Легкими» компонентами будем называть те, размеры которых не

превышают 1000 базовых элементов сетей Петри. Все остальные будем называть «тяжелыми» компонентами.

Теперь, учитывая введенные признаки разделения компонент на две группы, можно утверждать, что наибольшей эффективностью по быстродействию обладают модифицированные распределенные модели, состоящие из «легких» компонент. Из рисунка 4 видно, что распределенные системы с «легкими» компонентами могут быть от 7 до 16 раз быстрее, чем их немодифицированные аналоги. А вот у модифицированных распределенных моделей с «тяжелыми» компонентами этот показатель заметно ниже – всего от 2 до 5 раз.

Следует отметить, что этот факт оказался довольно неожиданным. Дело в том, что результаты, полученные в работе [9], показали, что распределенные модели с «легкими» компонентами, при сравнении со их монолитными аналогами, оказались менее эффективными, чем распределенные модели с «тяжелыми» компонентами. А в данной работе при добавлении нового верхнего иерархического уровня



**Рис. 5.** Изменение эффективности по быстродействию распределенных моделей в зависимости от количества «легких» компонент по сравнению с монолитной моделью

**Fig. 5.** Change in efficiency by speed of distributed models depending on the number of "light" components compared to a monolithic model

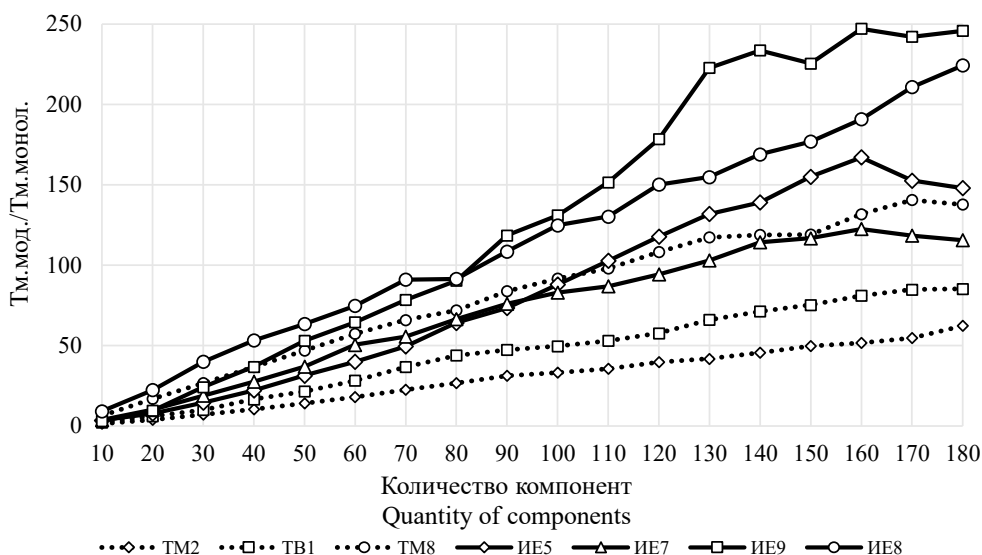
распределенные модели ведут себя уже полностью противоположным образом. В связи с этим было бы полезно сравнить быстродействие модифицированных распределенных моделей, но уже не с исходными распределенными моделями (как это было сделано выше), а с их монолитными аналогами. С учетом этого на рисунке 5 приведены графики изменения эффективности по быстродействию модифицированных распределенных моделей, состоящих из «легких» компонент, в сравнении с их монолитными аналогами (показаны в виде непрерывных линий). Для большей наглядности на том же рисунке представлены графики изменения эффективности по быстродействию исходных (немодифицированных) распределенных моделей в зависимости от количества содержащихся в них компонент по отношению к их монолитным аналогам (показаны в виде пунктирных линий).

Как видно из приведенного рисунка, модифицированные распределенные модели с «легкими» компонентами показывают более высокое быстродействие по сравнению с их

монолитными аналогами. Причем это преимущество может достигать более высоких значений (до 200 раз), чем у исходных распределенных моделей (всего лишь до 30 раз), т. е. почти на порядок. Такая особенность позволяет модифицированным распределенным моделям заметно ослабить различие в эффективности по быстродействию у распределенных моделей с «легкими» и «тяжелыми» компонентами. Иллюстрация этого эффекта приведена на рисунке 6, на котором показаны графики изменения коэффициентов эффективности модифицированных и исходных распределенных моделей по отношению к их монолитным аналогам.

На приведенном рисунке проиллюстрированы зависимости быстродействия модифицированных распределенных систем с «тяжелыми» (показаны в виде непрерывных линий) и «легкими» компонентами (показаны пунктирными линиями). Как видно из этого рисунка, темпы изменения коэффициента эффективности по быстродействию моделей с «легкими» компонентами все же остаются





**Рис. 6.** Графики изменения коэффициентов эффективности модифицированных распределенных моделей по отношению к их монолитным аналогам

**Fig. 6.** Graphics of change efficiency coefficients of modified distributed models in relation to their monolithic analogues

ниже аналогичных показателей у моделей с «тяжелыми» компонентами [9]. Но они становятся все же выше, чем у исходных распределенных моделей, что в конечном итоге выражается в заметном сближении их графиков.

## 2.2. Влияние количества компонент в группах на дополнительном иерархическом уровне

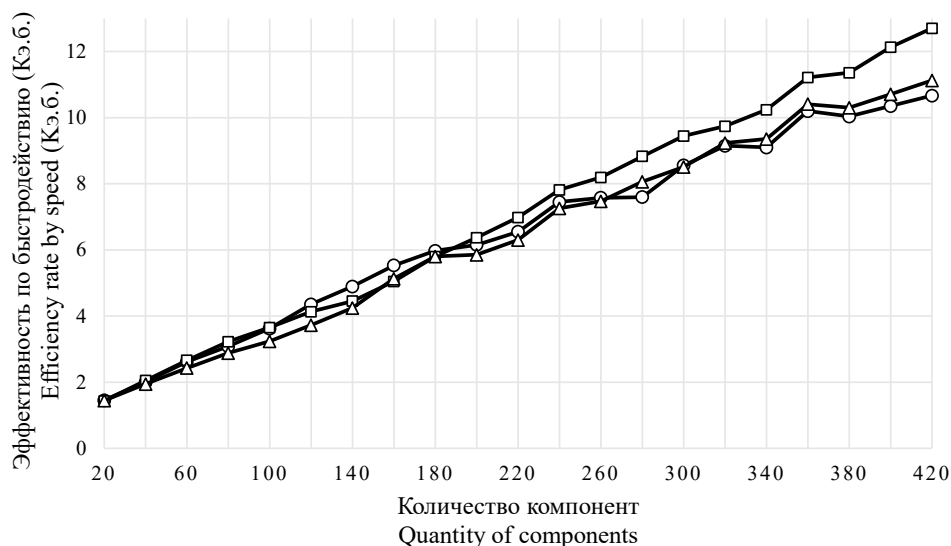
Еще одним параметром, способным оказать влияние на эффективность распределенных моделей с дополнительным верхним иерархическим уровнем, является количество компонент, объединяемых в группы, внешние представители которых выводятся на более верхний иерархический уровень. На рисунках 7 и 8 показаны графики изменения коэффициента эффективности по быстродействию для 5, 10 и 20 компонент в таких группах при добавлении дополнительного иерархического уровня в исходные распределенные модели.

Как видно из приведенных рисунков, графики зависимости эффективности в зависимости от количества компонент в модели и их количества в группах расположены до-

статочно близко друг от друга. Это означает, что количество компонент в группах оказывает настолько слабое влияние на поведение модифицированных моделей, что этот фактор практически не представляет собой какой-либо ценности для его практического использования. Аналогичные результаты были получены и для моделей, в которых группируются компоненты, имитирующие поведение других типов компонент: TB1, TM8, IE5, IE7 и IE9.

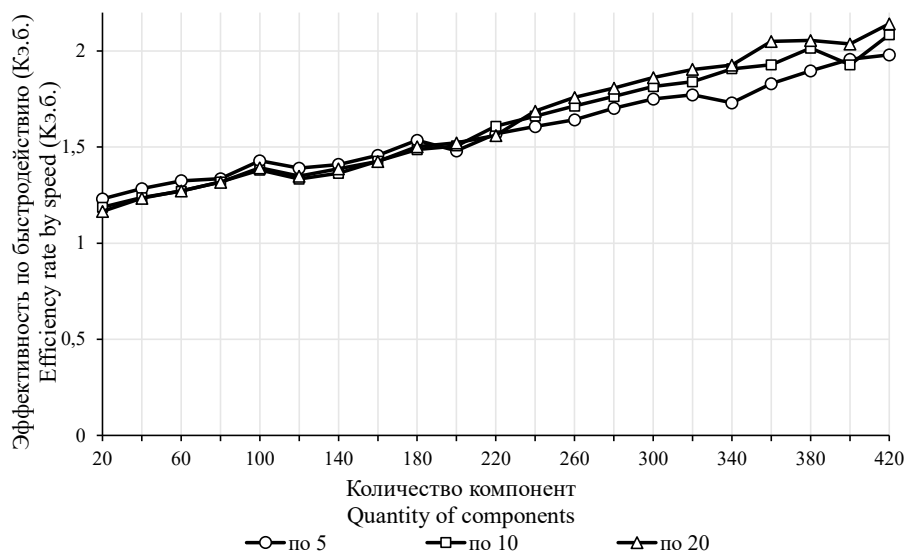
## 2.3. Эффективность по времени загрузки моделей

Другим важным показателем эффективности распределенных моделей является время их загрузки в оперативную память компьютера. На рисунке 9 показаны графики изменения времени загрузки в зависимости от размеров исходных (показаны в виде пунктирной линии) и модифицированных (показаны в виде сплошной линии) распределенных моделей, которые состоят из компонентов, моделирующих поведение функциональных элементов микросхем типа TM2.



**Рис. 7.** Изменение эффективности распределенных моделей с дополнительным иерархическим уровнем и разным количеством компонент (типа TM2) в группах

**Fig. 7.** Change the efficiency of distributed models with an additional hierarchical level and different number of components (type TM2) in groups

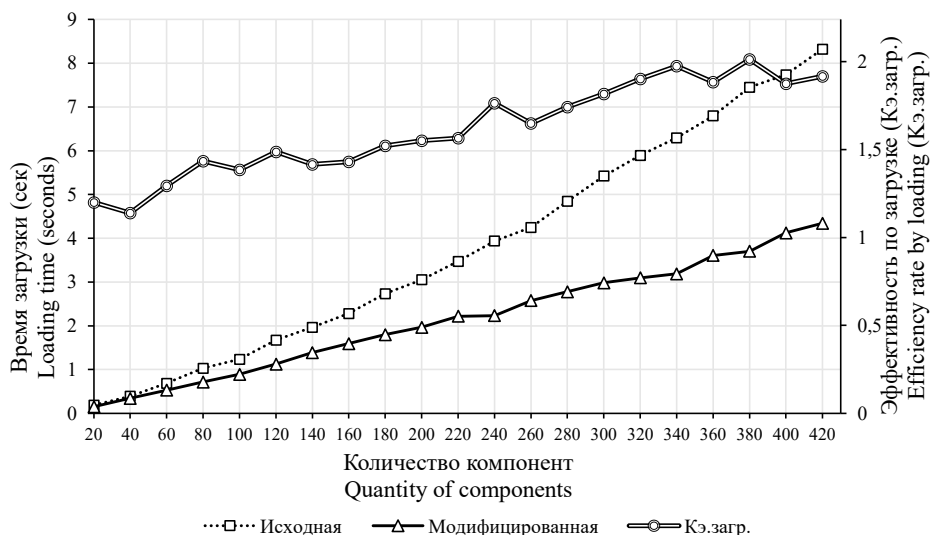


**Рис. 8.** Изменение эффективности распределенных моделей с дополнительным иерархическим уровнем в зависимости от количества компонент (типа IE8) в группах

**Fig. 8.** Change the efficiency of distributed models with an additional hierarchical level depending on the number of components (type IE8) in the groups

Для упрощения и повышения наглядности в данном случае размер моделей определяется как количество подчиненных компонент (N), имитирующих поведение функциональ-

ных элементов типа TM2. Как видно из рисунка 9, время загрузки у исходной и модифицированных моделей в начале диапазона изменения их размеров (N=20) визуально



**Рис. 9.** Влияние размеров распределенных моделей, состоящих из компонент, имитирующих поведение функционального элемента типа TM2 на время их загрузки

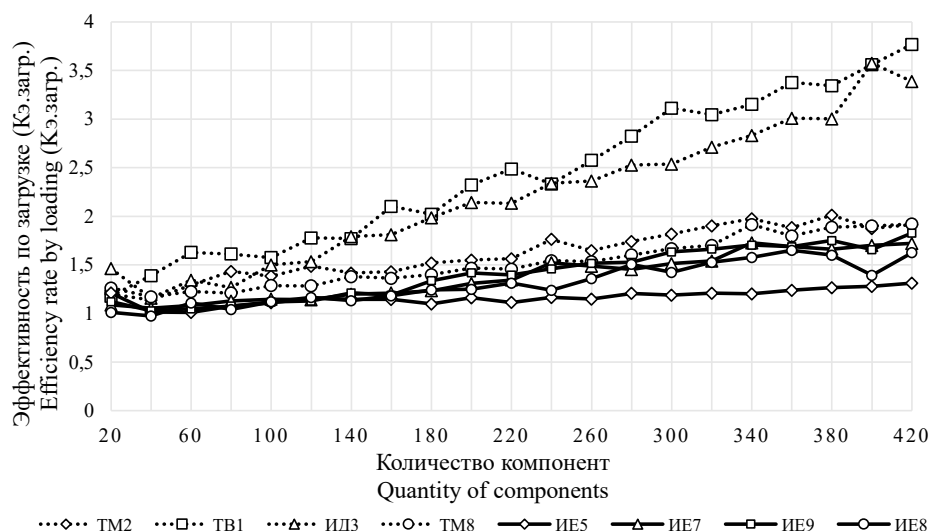
**Fig. 9.** Influence of the sizes of distributed models consisting of components that simulate the behavior of TM2-type functional element on the time they are loaded

практически совпадает. Однако по мере увеличения количества подчиненных компонент время загрузки в модифицированных моделях начинает все более отличаться от времени загрузки исходных моделей в сторону уменьшения. В результате при достижении максимального количества подчиненных компонент ( $N=420$ ) время загрузки модифицированной модели снижается до значения в 4,344 секунды вместо 8,322 секунды у исходной модели. Как изменяется соотношение между временем загрузки исходных и модифицированных моделей в процессе изменения их размеров отражается в виде графика Кэ.загр., показанного двойной сплошной линией. Данный график показывает, что это соотношение почти линейно зависит от количества подчиненных компонент, содержащихся в моделях, и, как следствие, от их размеров.

На рисунке 10 приведены результаты исследования эффективности модифицированных моделей с подчиненными компонентами, представляющими функциональные элементы разного типа: TM2, ТВ1, ИДЗ, TM8, ИЕ5, ИЕ7, ИЕ9 и ИЕ8.

Все представленные графики также показывают зависимость коэффициента эффективности модифицированных моделей по времени загрузки от их размеров, близкую к линейной. При этом легко заметить, что зависимости эффективности модифицированных распределенных моделей с разными типами подчиненных компонент заметно отличаются. У моделей с «легкими» компонентами эффективность оказывается заметно выше (показаны пунктирными линиями), чем у моделей с «тяжелыми» компонентами (показаны непрерывными линиями). Данная особенность указывает на тот факт, что темп изменения эффективности загрузки распределенных моделей с «легкими» компонентами выше, чем у моделей с «тяжелыми» компонентами. Например, для моделей с «легкими» компонентами максимально достижимые коэффициенты эффективности по загрузке могут достигать значений от 1,922 до 3,769, а для моделей с «тяжелыми» компонентами — только от 1,311 до 1,826.

Следует отметить, что такое поведение модифицированных распределенных моделей



**Рис. 10.** Влияние размеров распределенных моделей с компонентами, имитирующими поведение функциональных элементов разного типа, на эффективность их загрузки

**Fig. 10.** Influence of the sizes of distributed models with components that simulate the behavior of different types of functional elements on their loading efficiency

отличается от поведения обычных распределенных моделей, которые показывают большую эффективность, когда они содержат «тяжелые» компоненты [9]. Если же сравнивать эффективность загрузки распределенных моделей с их монолитными аналогами, то модифицированные распределенные модели обеспечивают большую независимость эффективности загрузки от наличия в их составе «легких» или «тяжелых» подчиненных компонент.

### Заключение

Результаты проведенных автором экспериментальных исследований показывают, что введение в распределенные модели дополнительного иерархического уровня позволяет улучшить их рабочие характеристики, что проявляется в повышении скорости выполнения моделей и в снижении вре-

мени их загрузки. В тексте настоящей статьи показано, что быстродействие модифицированных распределенных моделей зависит от их размера и может в несколько раз превышать быстродействие обычных (немодифицированных) распределенных моделей. При этом наибольший эффект достигается у моделей с «легкими» компонентами, что обеспечивает заметное выравнивание эффективности рабочих характеристик модифицированных распределенных моделей с разными типами подчиненных компонент по сравнению с их монолитными аналогами. Кроме того, введение дополнительного иерархического уровня позволяет в несколько раз снизить время загрузки таких распределенных моделей. При этом размеры модифицированных распределенных моделей практически не увеличиваются.

### Список литературы

1. Таненбаум Э., Стеен М. ван. Распределенные системы. Принципы и парадигмы. Серия: Классика computer science. СПб.: Питер, 2003. – 877 с. ISBN 5-272-00053-6.
2. Черемисинов Д. И. Морфизмы моделей поведения распределенных систем // Информатика. 2005. № 1. С. 76–88.
3. Бродский Ю. И. Распределенное имитационное моделирование сложных систем. М.: Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН, 2010. – 156 с., ил.

4. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / пер. с англ. М.: Мир, 1984. – 264 с., ил.
5. Котов В. Е. Сети Петри. М.: Наука (Главная редакция физико-математической литературы), 1984. – 160 с.
6. Веселов А. А. Модели и методы анализа проектных решений цифровой электронной техники на основе сетей Петри: дис. ... д-ра техн. наук. Тверь, 2006.
7. Веселов А. А. Распределенная модель устройств цифровой и вычислительной техники на основе сетей Петри [Электронный ресурс] // Наукovedenie. 2015. Т. 7. № 3. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/124TVN315.pdf>
8. Веселов А. А. Система распределенного моделирования устройств цифровой электроники на основе сетей Петри // Приборы и системы. Контроль, измерение, диагностика. 2016. № 2. С. 11–22.
9. Веселов А. А. Экспериментальные исследования распределенной модели на основе сетей Петри // Прикладная информатика. 2018. Т. 13. № 5 (77). С. 123–143.

## Сведения об авторе

Веселов Алексей Аркадьевич, ORCID 0000-0003-2161-8849, докт. техн. наук, доцент, профессор, кафедра электронных вычислительных машин, Тверской государственный технический университет, Тверь, Россия, [Veselov\\_A\\_A@mail.ru](mailto:Veselov_A_A@mail.ru)

Статья поступила 30.07.2020, рассмотрена 14.08.2020, принята 28.09.2020

## References

1. Tanenbaum A., Steen M. van. *Raspredeleennie sistemi. Principi I paradigmi* [Distributed systems. Principles and paradigms]. Seria: Classica computer science [Series: Classics computer science]. SPb., Piter Publ., 2003, 877 p. ISBN 5-272-00053-6.
2. Cheremisinov D. I. *Morfismi modelei povedenia raspredeleennykh system* [Morphisms of models of behavior of distributed systems]. *Informatika=Informatics*, 2005, no.1, p.76-88.
3. Drodskii U. I. *Raspredelelnoe imitacionnoe modelirovanie slozhnykh system* [Distributed simulation of complex systems]. Moscow, *Vichislitelnyy centr im. A. A. Dorodnicina RAN=Dorodnitsyn Computing Center of the Russian Academy of Science*, 2010, 156 p.
4. Piterson Dg. *Teoria setey Petri I modelirovanie system. Per. s angl.* [Petri network theory and system modeling. Transl. from Engl.]. Moscow, *Mir Publ.*, 1984, 264 p.
5. Kotov V. E. *Seti Petri*. Moscow, *Nauka (Glavnaia redakcia fisiko-matematicheskoy literatury)* Publ., 1984, 160 p.
6. Veselov A. A. *Modeli i metody analiza proektnykh resheniy cifrovoy elektronnoy tekhniki na osnove setey Petri* [Models and methods of analysis of digital electronics design solutions based on Petri nets]. *Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk*. Tver, 2006.
7. Veselov A. A. *Raspredelelennaya model ustroystv cifrovoy I vichislitelnoy tekhniki na osnove setey Petri* [Distributed model of digital and computing technical units on Petri nets]. *Naukovedenie*, 2015, vol.7, no.3. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/124TVN315.pdf>
8. Veselov A. A. *Sistema raspredelelennogo modelirovaniya ustroystv cifrovoy elektroniki na osnove setey Petri* [Petri net digital electronics distributed simulation system]. *Pribori I sistemy. Kontrol, izmerenie, diagnistika*, 2016, no.2, pp.11-22.
9. Veselov A. A. *Experimentalnye issledovaniya raspredelelnoy modeli na osnove setey Petri* [Experimental studies of a distributed model based on Petri nets]. *Prikladnaya informatika=Journal of Applied Informatics*, 2018, vol.13, no.5(77), pp.123-143.

## About the author

Alexey A. Veselov, ORCID 0000-0003-2161-8849, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Associate professor, Department of Electronic Computing Machines, Tver State Technical University, Tver, Russia, [Veselov\\_A\\_A@mail.ru](mailto:Veselov_A_A@mail.ru)

Received 30.07.2020, reviewed 14.08.2020, accepted 28.09.2020