

УДК 004.414

В.Г. Литвин, А.А. Мусатов, Ю.В. Литвин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ КО ВРЕМЕНИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАПРОСОВ КОМПОНЕНТАМИ СИСТЕМЫ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ МЕТОДАМИ БУТСТРЕПА

Литвин Василий Григорьевич, доктор технических наук, профессор, окончил Таганрогский радиотехнический институт и аспирантуру Института проблем управления РАН. Главный научный сотрудник АО «НИИ автоматической аппаратуры им. акад. В.С. Семенихина». Автор 117 научных публикаций в области оценки производительности вычислительных систем. [e-mail: litvg@mail.ru].

Мусатов Александр Анатольевич, окончил Московский авиационный институт. Начальник научно-технического центра информационных систем АО «НИИ автоматической аппаратуры им. акад. В.С. Семенихина». Имеет статьи в области проектирования информационно-вычислительных систем. [e-mail: a_musatov@mail.ru].

Литвин Юрий Васильевич, кандидат экономических наук, окончил Московский инженерно-физический институт. Заведующий отделом ООО «НИИгазэкономика», ОАО «Газпром». Автор 31 научной статьи в области оценки рисков организационных и технических систем. [e-mail: litvinj@simplecs.ru].

Аннотация

Предложен новый подход к обоснованию требований ко времени выполнения запросов отдельными компонентами системы реального времени (РВ) на начальных стадиях проектирования. Рассматриваемая система РВ относится к классу систем РВ с «мягкими» требованиями ко времени ответов. Исходными предпосылками для оценки времен выполнения запросов являются требования заказчика ко времени ответа системы и данные экспертного анализа. Требования ко времени выполнения запросов отдельными компонентами системы РВ определяются методом бутстрепа в виде средних значений. Применение разработанного подхода иллюстрируется простым численным примером.

Ключевые слова: управление требованиями, системы реального времени, экспертные методы, имитационное моделирование, метод бутстрепа.

DEFINING REQUIREMENTS FOR THE TIME OF QUERY EXECUTION BY REAL-TIME SYSTEM COMPONENTS WITH THE USE OF BOOTSTRAP METHODS

Vasilii Grigorevich Litvin, Doctor of Engineering, Professor, Chief Staff Scientist at JSC "Research Institute for Automatic Apparatus named after Academician V.S. Semenikhin"; graduated from Taganrog Radiotechnical Institute; finished his post-graduate studies at the Institute of Control Sciences of Russian Academy of Science; an author of 117 scientific papers in the field of computing systems performance evaluation. e-mail: litvg@mail.ru.

Aleksandr Anatolevich Musatov, Head of the Scientific-and-Technical Centre of JSC "Research Institute for Automatic Apparatus named after Academician V.S. Semenikhin"; graduated from Moscow Aviation Institute; an author of articles in the field of designing information computation systems. e-mail: a_musatov@mail.ru.

Iurii Vasilevich Litvin, Candidate of Economics; Head of the Department of LCC NIIGAZECONOMICA at JSC "Gazprom"; graduated from Moscow Engineering and Physics Institute; an author of 31 scientific papers in the field of risk assessment of organizational and technical systems. e-mail: litvinj@simplecs.ru.

Abstract

A new approach to definition of requirements for the time of query execution by real-time system at initial design stages is offered. The current system refers to the class of real-time systems with soft requirements for the response time. The initial prerequisite for the assessment of query execution time are the customer's requirements for the system response time and the expert analysis data. The requirements for the time of query execution by the separate components are determined as mean values with the use of the bootstrap method. The developed approach application is illustrated by the simple numerical example.

Keywords: requirements management, real-time systems, expert methods, simulation, bootstrap method.

ВВЕДЕНИЕ

Управление требованиями в вычислительных системах РВ является важной стороной обеспечения их эффективной разработки. Наряду с общесистемными и функциональными требованиями, при выработке проектных решений ключевую роль играют требования ко времени ответа на поступающие запросы, к пропускным способностям, нагрузкам на отдельные компоненты, надежности, живучести и т.п. [1-5].

На практике обычно различают вычислительные системы РВ с «жестким» и «мягким» временем выполнения поступающих запросов или обрабатываемых сообщений (далее будет использоваться понятие запроса) [6]. Системы с «жестким» временем требуют обеспечения реакции (ответа) на поступивший запрос в строго отведенный момент и не допускают каких-либо превышений этого времени. В системах с «мягкими» требованиями используются усредненные значения либо вероятностные характеристики времени ответа, при которых в процессе эксплуатации допускается приемлемое число превышений установленных значений времени ответа. На практике часто при проектировании систем РВ время ответа и производительность оцениваются только после завершения разработки системы. Нарушение требований на ранних этапах проектирования приводит к дополнительным затратам и задержкам внедрения системы, связанным с последующим устранением возможных проблем, которые могли бы быть существенно сокращены в результате своевременного выполнения необходимых оценок. В статье [7] рассмотрен подход к определению требований ко времени выполнения запросов в отдельных компонентах системы РВ при наличии необходимой информации, позволившей использовать модели массового обслуживания. В настоящей статье рассматриваются вопросы определения требований ко времени выполнения запросов отдельными компонентами системы РВ на начальных стадиях проектирования, когда отсутствует реальная система, а предлагаемые методы базируются на знаниях и опыте компетентных экспертов [8, 9].

Статья организована следующим образом. В разделе 1 рассматриваются разукрупнение структуры системы РВ и распределение требований по ее компонентам на начальных стадиях жизненного цикла. Далее, в разделе 2 приведен алгоритм оценки времени выполнения запросов отдельными компонентами системы РВ методами бутстрепа и рассмотрен детальный пример расчета.

1 РАЗУКРУПНЕНИЕ СИСТЕМ РВ

Структура систем РВ чаще всего представляется в виде иерархии с постепенным ростом детализации по мере снижения на более низкие уровни. Для радиоэлектронных систем разработаны соответствующие методики и стандарт декомпозиции [10] по уровням, которые позволяют единообразно реализовывать разукрупнение систем РВ. В указанном стандарте выделяются следующие уровни разукрупнения: 1) системы, подсистемы и взаимодействующее с ними внешнее окружение; 2) вычислительные

комплексы; 3) устройства и 4) функциональные узлы. Дальнейшая детализация в данной статье не приводится. Распределение требований по уровням разукрупнения на различных этапах проектирования системы обычно ведется «сверху вниз». Требования, заданные на более высоких уровнях разукрупнения, делятся по структурным компонентам следующего уровня и т.д. При оценке требований важно учитывать не только уровень разукрупнения, но и стадию жизненного цикла, на которой находится система РВ. Общая схема распределения требований ко времени выполнения запросов между компонентами представлена на рисунке 1.

На начальных стадиях создания системы, когда существует дефицит информации, в основном применяются экспертные методы и методики, позволяющие максимально использовать знания, опыт и компетенции специалистов. В последующем, по мере проработки вопросов создаваемой системы и появления результатов измерений, в качестве инструментов анализа все в большей степени могут использоваться математические модели систем и сетей массового обслуживания (СМО и СеМО) и другие модели.

В настоящей статье решается следующая задача. По заданной функциональной структуре, требованиям ко времени ответа системы РВ и экспертным оценкам специалистов на основе имитационного моделирования [12], методов бутстрепа [11] и анализа иерархий [9] необходимо разработать алгоритмы обоснования требований ко времени выполнения запросов в отдельных компонентах системы РВ, реализация которых обеспечивает установленное заказчиком время ответа системы. Полученные оценки требований позволяют проектировщикам отдельных компонентов системы РВ использовать их при принятии соответствующих проектных решений.

2 АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ТРЕБОВАНИЙ КО ВРЕМЕНИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАПРОСОВ В ОТДЕЛЬНЫХ КОМПОНЕНТАХ СИСТЕМЫ РВ

В связи с тем, что на начальных стадиях проектирования системы необходимых для выполнения оценок данных, как правило, нет, то прибегают к экспертным заключениям о составе влияющих факторов и степени их влияния. Для конкретизации будем рассматривать показатели и факторы в виде трехуровневой иерархии (рис. 4). Первый уровень отражает цель, состоящую в обеспечении заданного заказчиком времени ответа системы РВ. Второй уровень объединяет факторы, влияющие на это время. И наконец, на третьем уровне представлены компоненты системы, в которых учитывается весомость приведенных на втором уровне факторов с точки зрения времени выполнения ими запросов. Считаем, что на концептуальной стадии можно исходить из положения, что время выполнения того или иного компонента системы пропорционально его сложности. В качестве инструмента оценки сложности может использоваться метод функциональных точек, разработанный специалистами IBM [13]. Метод функциональных точек нашел также широкое использование при оценке трудоемкости разработки соответствующих программ и предполагаемых затрат.

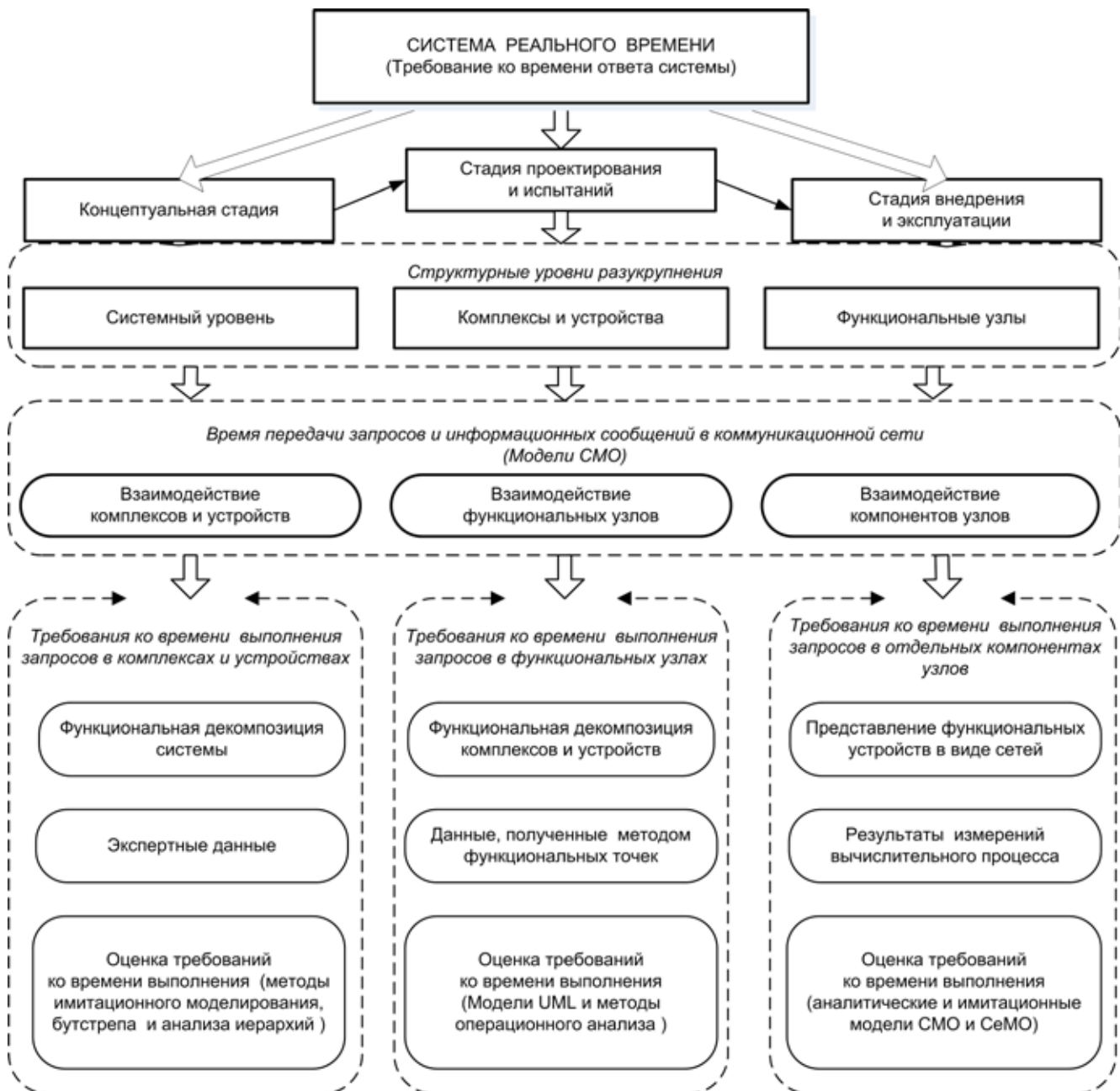


Рис. 1. Общая схема распределения требований ко времени ответа по узлам подсистемы

Задача состоит в ранжировании комплексов автоматизации системы РВ по их сложности в зависимости от качественной оценки влияния указанных факторов с последующим проецированием полученных относительных величин на временную ось. Полагаем, что сложность соответствующих компонентов будет пропорциональна времени их выполнения.

Алгоритм оценки требований к среднему времени выполнения запросов в компонентах системы РВ.

Шаг 1. Для заданного уровня разукрупнения строится иерархия показателей и факторов, нижний уровень которой занимают блоки, соответствующие отдельным компонентам системы РВ.

Шаг 2. Для каждого блока h соответствующего уровня иерархии вводится вектор весомости. Обозначим его

через $X = (x_1, x_2, \dots, x_l)$, где x_i – степень влияния на показатель или фактор более высокого уровня иерархии, на который замыкается рассматриваемый блок. Индекс i соответствует номеру эксперта, а l – общему числу привлеченных экспертов. Оценка степени влияния производится по шкале от 1 – нет никакого влияния, до 9 – очень высокое влияние.

Шаг 3. С использованием метода бутстрепа [11] по полученным на шаге 2 экспертным данным осуществляется уточненная оценка влияния факторов на показатели. В данном случае вектор X условно может рассматриваться в качестве ограниченной выборки оцениваемой случайной величины (сл. в.). Метод бутстрепа используется в связи с тем, что закон распределения соответствующей сл. в. неизвестен, а экспертная выборка (оценка вектора

X для конкретного блока иерархии) имеет малый объем, т.е. осуществляется непараметрическая оценка моментов. Применение метода бутстрепа уменьшает смещения полученных оценок. Последовательность выполнения процедур бутстрепа приведена на рисунке 2.

Процесс оценки заключается в следующем. По полученным экспертными оценкам вектора X путем имитационного моделирования производится формирование псевдовыборок. Каждое значение псевдовыборки получается путем извлечения из X случайным образом элемента с возвратом его (ресамплинг) для последующего нового извлечения и фиксации результата в качестве одного из элементов псевдовыборки (извлечение производится по равномерному закону распределения). Полученная псевдовыборка также будет иметь размерность вектора X , то есть для каждой псевдовыборки производится k извлечений из X . Однако значения элементов псевдовыборки, как правило, не будут совпадать с исходным вектором X . Другими словами, несмотря на то, что формирование псевдовыборок не приносит дополнительной информации об исходной сл. в., некоторое «качание» вокруг исходной выборки открывает новые возможности непараметрической оценки искомых моментов. Так как генерация псевдовыборок ведется на компьютере, то их количество на практике принимается большим – обычно в пределах 5000 – 10000. По каждой псевдовыборке рассчитываются соответствующие моменты распределений. В нашем случае мы ограничимся оценками средних значений. В результате получим $n \approx 10000$ средних значений по псевдовыборкам, которые, в свою очередь, могут рассматриваться как сл. в. По этим оценкам может быть построена эмпирическая функция распределения (ФР) для среднего значения и рассчитана искомая оценка уровня влияния данного фактора на показатель более высокого уровня, на который он замкнут. Обозначим его через μ_h .

$$\mu_h = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_{hi}, \quad (1)$$

где m_{hi} – среднее значение фактора h , полученное по псевдовыборке i ;

n – количество псевдовыборок, полученных с помощью метода бутстрепа.

По эмпирической ФР среднего значения могут быть оценены квантили распределения и доверительный интервал для μ_h .

Шаг 4. Выполняется построение матриц парных сравнений для каждого блока рассматриваемой иерархии (рис. 4). Приведем последовательность построения матрицы на примере какого-то одного блока b . Пусть количество факторов, влияющих на данный блок, равно k . Для каждого входящего фактора методом бутстрепа получено значение μ_{bh} . По этим оценкам определяются элементы искомой матрицы парных сравнений. Элементы первой строки матрицы определяются следующим образом:

$$a_{1j} = \frac{\mu_1}{\mu_j}, \quad j = \overline{1, k}.$$

Индекс b опущен. Остальные элементы матрицы, лежащие на главной диагонали и выше, рассчитываются по первой строке: $a_{ij} = a_{ij}/a_{i1}$, $i = \overline{2, k}$, $j = \overline{i, k}$. Так как матрица обратна симметричная, то элементы, лежащие ниже главной диагонали, рассчитываются по формуле $a_{ji} = 1/a_{ij}$, где $i = \overline{2, k}$, $j = \overline{1, i-1}$. Аналогичным образом формируются остальные матрицы для рассматриваемых блоков иерархии.

Шаг 5. Проведем оценку относительных величин времени выполнения запросов в отдельных комплексах автоматизации, используя матрицы парных сравнений. Так как применение алгоритма рассматривается для концептуальной стадии проектирования системы РВ, когда исходные данные являются весьма приближенными, то вместо поиска собственных значений соответствующих матриц парных сравнений в данном алгоритме используется более простой метод геометрических средних [9]. Расчет геометрических средних производится для каждой строки матрицы соответствующего блока, и, после нормирования полученных значений к единице, определяется искомый локальный вес каждого фактора. Далее, по полученным локальным весам факторов, начиная с верхних уровней иерархии, ведется расчет итоговых интегральных значений факторов и показателей. Для этого локальное значение каждого фактора соответствующего уровня иерархии умножается на вес фактора более высокого уровня, на который он замыкается, и результаты суммируются [9]. Для нижнего уровня иерархии полученные интегральные оценки (y_i) являются относительными значениями времени выполнения запросов каждым комплексом автоматизации.

Аналогичным образом по данным бутстрепа и матрицам парных сравнений определяются верхние и нижние границы доверительного интервала для средних, полученных по псевдовыборкам, что расширяет возможности оценок.



Рис. 2. Оценка среднего значения веса методом бутстрепа

Шаг 6. Определяются коэффициенты посещения узлов функциональной структуры (сети или графа) системы РВ [1]:

$$V_i = P_{0i} + \sum_{j=1}^K V_j P_{ji}, i = \overline{1, K}, \quad (2)$$

где $P = \begin{pmatrix} P_{00} & \dots & P_{0K} \\ \dots & \dots & \dots \\ P_{K0} & \dots & P_{KK} \end{pmatrix};$

P_{ji} – вероятность перехода запроса от узла j к узлу i ;

0 – обозначает номер внешней среды системы РВ;

V_i – количество посещений узла i на один вход запроса в сеть;

K – количество узлов сети.

Коэффициенты V_i необходимы для того, чтобы учесть общие задержки в выполнении запросов в отдельных узлах с учетом возможного многократного посещения каждого из них.

Шаг 7. Определяются средние времена пребывания запросов в отдельных узлах сети:

$$R_i = \frac{(R - \Theta) V_i y_i}{\sum_{i=1}^K V_i y_i}, \quad (3)$$

где R – среднее время ответа системы РВ на поступающие запросы;

Θ – среднее время, израсходованное на передачу данных между компонентами системы РВ. Время определяется стандартными методами, представленными в [1];

V_i – коэффициент посещения узла i (рассчитывается по формуле (2));

R_i – среднее время пребывания запроса в узле i (суммарное время всех посещений запросом данного узла);

y_i – относительное интегральное значение длительности выполнения запросов комплексом автоматизации i (KA_i).

Формула (3) получена следующим образом. Для системы, состоящей из K узлов, справедливо следующее выражение для среднего времени ответа без учета затрат времени на коммуникации [5]:

$$R - \Theta = \sum_{i=1}^K V_i S_i = \sum_{i=1}^K R_i, \quad (4)$$

где S_i – среднее время выполнения запроса комплексом i на одно посещение.

Пусть $S_i = Ay_i$, где y_i – относительное время выполнения запроса на одно посещение комплексом i ; A – масштабный коэффициент перевода относительных времен в абсолютные. Тогда с учетом (4) получим

$$\begin{aligned} R_i &= (R - \Theta) \frac{V_i S_i}{\sum_{i=1}^K V_i S_i} = \\ &= (R - \Theta) \frac{V_i Ay_i}{\sum_{i=1}^K V_i Ay_i} = (R - \Theta) \frac{V_i y_i}{\sum_{i=1}^K V_i y_i}. \end{aligned}$$

Формула (3) справедлива для открытых сетей.

Шаг 8. Требование ко времени выполнения запроса при одном посещении узла i определяется по формуле

$$S_i = \frac{R_i}{V_i}. \quad (5)$$

Полученные оценки реализуются проектировщиками в виде требований к разрабатываемым ими компонентам, которые необходимо удовлетворить при создании системы РВ, чтобы выполнялось внешнее требование ко времени ответа системы (R).

Пример.

Рассмотрим систему РВ, выполняющую поступающие в нее запросы. Граф структуры модели системы ($G(A, B)$), представленной на первом уровне разукрупнения, будет иметь вид (рис. 3).

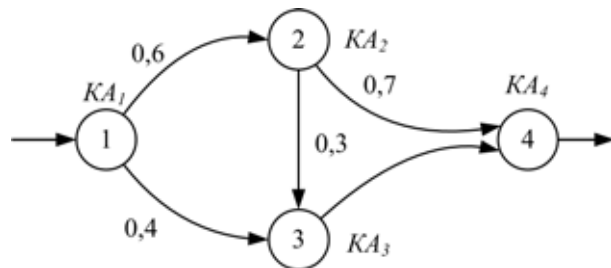


Рис. 3. Граф процесса выполнения запросов в системе РВ

Узлы графа (A) отражают функциональные компоненты системы – комплексы автоматизации (KA), а дуги (B) – маршруты движения запросов. Требуется на концептуальной стадии проектирования системы РВ, представленной графом $G(A, B)$, на основе экспертных оценок определить требования к среднему времени пребывания запросов в отдельных узлах, при которых выполнялось бы общее требование к среднему времени ответа системы в целом, равное 4,5 с. Маршрутная матрица, определяющая пути запросов исходя из логики их обработки, задана следующим образом

$$P = (p_{ji}) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,6 & 0,4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,3 & 0,7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где p_{ji} – вероятность перехода запроса после завершения выполнения в узле j в узел i ;

i и j – узлы графа; i и $j = 0$, соответствуют внешнему источнику запросов.

Шаг 1. На рисунке 4 приведены факторы (второй уровень), которые, по мнению экспертов, предопределяют времена выполнения запросов (первый уровень) в отдельных компонентах системы РВ (в узлах графа).

Шаг 2. По каждому блоку первого и второго уровней представленной иерархии группой экспертов сформированы векторы влияния на эти блоки замкнутых на них факторов (блоков) более низких уровней иерархии. На первый блок будут влиять четыре фактора второго уровня, а на каждый из блоков второго уровня – факторы комплексов



Рис. 4. Иерархия показателей и факторов

Таблица 1

Экспертные оценки и оценки бутстрепа

1. Время ответа	Эксперты и их оценки								Бутстреп (ср. зн.)
	1	2	3	4	5	6	7	8	
2.1. Сложность	8	6	9	6	7	8	9	5	7,24
2.2. Некомпетентность	5	7	6	6	6	7	5	7	6,13
2.3. Последовательность	3	6	5	4	4	3	5	6	4,51
2.4. Внешнее окружение	1	3	2	3	4	1	3	2	2,37
2.1. Сложность	Эксперты и их оценки								Бутстреп (ср. зн.)
	1	2	3	4	5	6	7	8	
3.1. КА 1	2	2	3	4	3	2	4	2	2,50
3.2. КА 2	5	5	7	6	5	6	7	5	5,75
3.3. КА 3	4	3	4	5	4	4	3	4	3,88
3.4. КА 4	9	7	8	8	8	7	8	9	8,00
2.2. Некомпетентность	Эксперты и их оценки								Бутстреп (ср. зн.)
	1	2	3	4	5	6	7	8	
3.1. КА 1	6	5	7	5	6	5	6	7	6,00
3.2. КА 2	6	6	7	6	6	6	6	7	6,25
3.3. КА 3	7	6	7	6	7	6	7	7	6,63
3.4. КА 4	8	10	8	9	9	8	10	9	8,88
2.3. Последовательность	Эксперты и их оценки								Бутстреп (ср. зн.)
	1	2	3	4	5	6	7	8	
3.1. КА 1	4	5	4	6	4	5	4	5	4,63
3.2. КА 2	6	6	4	6	4	6	7	6	5,62
3.3. КА 3	7	6	5	6	7	8	7	7	6,62
3.4. КА 4	8	10	9	10	10	9	7	8	8,88
2.4. Внешняя среда	Эксперты и их оценки								Бутстреп (ср. зн.)
	1	2	3	4	5	6	7	8	
3.1. КА 1	1	2	3	4	3	3	2	2	2,75
3.2. КА 2	2	3	2	4	4	3	2	2	2,75
3.3. КА 3	4	3	5	5	3	4	2	2	3,51
3.4. КА 4	5	7	5	5	6	6	5	7	5,75

автоматизации третьего уровня. Таким образом, для схемы (рис. 4) будет задано пять векторов X (выборка сл. в.). Каждый элемент любого из векторов определяет степень его влияния на вышестоящий блок, установленный экспертом.

Шаг 3. Приведены значения весов факторов, установленных экспертами, и соответствующие средние значения, полученные методом бутстрепа (табл. 1). Всего участвовало восемь экспертов.

Шаг 4. Определены матрицы парных сравнений. Например, матрица для факторов второго уровня будет иметь следующий вид (табл. 2).

Номера строк и столбцов таблицы соответствуют номерам факторов второго уровня.

Шаг 5. Определена весомость факторов. В таблице 2 показаны значения весов, полученные для факторов второго уровня иерархии. В таблице 3 приведены нормированные к единице оценки значений относительных времен выполнения для комплексов автоматизации (третий уровень).

Шаг 6. По формуле (2) определены коэффициенты посещения узлов функциональной структуры системы РВ (рис. 3). Значения коэффициентов приведены в таблице 3.

Шаг 7. Определено среднее время пребывания запросов в узлах сети по формуле (3). Рассчитанные для примера значения приведены в таблице 3. Суммарное среднее время пребывания запроса в сети, рассчитанное по полученным оценкам, равно $R = \sum_{i=1}^4 R_i = 4,5c$, что совпадает со временем, заданным для системы РВ.

Шаг 8. И наконец, время, требуемое на одно посещение узла, определено по формуле (5). Таким образом, средние времена выполнения запросов S_i определяют искомые требования ко времени их выполнения в каждом узле.

Таблица 2

Матрица парных сравнений и веса факторов

	2.1	2.2	2.3	2.4	Геометрическое среднее	Вес
2.1	1	1,184	1,609	3,055	1,5531	0,358
2.2	0,845	1	1,359	2,581	1,3121	0,302
2.3	0,621	0,736	1	1,899	0,9652	0,222
2.4	0,327	0,387	0,527	1	0,5084	0,117

Таблица 3

Относительные времена выполнения

Комплексы автоматизации	Второй уровень иерархии				Относительные времена	Коэффициенты посещения (V_i)	Время пребывания запросов в узлах (R_i, c)	Время выполнения на одно посещение (S_i, c)
	2.1	2.2	2.3	2.4				
3.1 КА 1	0,044	0,065	0,038	0,022	0,174	1	0,989	0,989
3.2 КА 2	0,107	0,066	0,048	0,021	0,241	0,6	0,828	1,380
3.3 КА 3	0,072	0,070	0,056	0,027	0,225	0,58	0,615	1,060
3.4 КА 4	0,149	0,094	0,075	0,044	0,361	1	2,068	2,068

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенный алгоритм и методика оценки требований ко времени выполнения запросов отдельными компонентами систем РВ могут применяться также и для других уровней разукрупнения, когда отсутствуют необходимые количественные данные. Кроме того, без существенных коррекций по аналогичной схеме могут оцениваться требования к трудоемкости и затратам на разработку отдельных компонентов подобных систем РВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. – М.: Мир, 1979. – 600 с.
2. Wang J., Guan L. QoS enhancements and performance analysis for delay sensitive Applications// *Journal of Computer and System Sciences*, 2011. – № 77, pp. 665–676.
3. Феррари Д. Оценка производительности вычислительных систем. – М.: Мир, 1981. – 576 с.
4. Авен О.И., Коган Я.А., Гурин Н.Н. Оценка качества и оптимизация вычислительных систем. – М.: Наука, 1982. – 464 с.
5. Литвин В.Г. Аладышев В.П., Винниченко А.И. Анализ производительности мультипрограммных ЭВМ. – М.: Финансы и статистика, 1984. – 159 с.
6. Laplanter P.A. Real-time systems design and analysis: tools for the practitioner. John Wiley & Sons, Inc. – 2012. – 570 p.

7. Елизаров О.И., Литвин В.Г., Чернышова Е.В. Обоснование требований ко времени выполнения программ в компьютерных системах // Автоматизация процессов управления. – 2014. – № 1. – С. 73–78.

8. Вигерс К.И. Разработка требований к программному обеспечению. – М.: Издательский торговый дом «Русская редакция», 2004. – 576 с.

9. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.

10. ГОСТ Р 52003-2003. Уровни разукрупнения радиоэлектронных средств. – М.: АО «ЦНИИ радиоэлектронных средств», 2004. – 11 с.

11. Moore D. S., McCabe G. P., Craig B. A., Introduction to the Practice of Statistics. New York, W.H.Freeman and Company, 2009. – 1010 p.

12. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. – СПб.: Издательская группа BHV, 2004. – 847 с.

13. Function Point Counting Practices Manual. Release 4.1.1. New York, Counting Practices Committee, 1999. – 370 p.

REFERENCES

1. Kleinrock L. *Vychislitelnye sistemy s ocherediami* [Computer Systems with Queues]. Moscow, Mir Publ., 1979. 600 p.
2. Wang J., Guan L. QoS Enhancements and Performance Analysis for Delay Sensitive Applications. *Journal of Computer and System Sciences*, 2011, no. 77, pp. 665–676.

3. Ferrari D. *Otsenka proizvoditel'nosti vychislitel'nykh system* [Computer System Performance Evaluation]. Moscow, Mir Publ., 1981. 576 p.
4. Aven O.I., Kogan Ya. A., Gurin N.N. *Otsenka kachestva i optimizatsiia vychislitel'nykh system* [Quality Assessment and Optimization of Computer Systems]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 464 p.
5. Litvin V.G., Aladyshev V.P., Vinnichenko A.I. *Analiz proizvoditel'nosti multiprogrammnykh EVM* [Performance Analysis of Multiprogrammed Computers]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1984. 159 p.
6. Laplanter P. A. *Real-Time Systems Design and Analysis: Tools for the Practitioner*. John Wiley & Sons, Inc. 2012. 570 p.
7. Elizarov O.I., Litvin V.G., Chernyshova E.V. *Obosnovanie trebovaniy ko vremeni vypolneniia programm v kompiuternykh sistemakh* [Foundation For Program Run Time Requirements in Computer Systems]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2014, no. 1, pp. 73–78.
8. Wiegers K.I. *Razrabotka trebovaniy k programmnomu obespecheniiu* [Software Requirements]. Moscow, Izdatelskii torgovyi dom Russkaia redaktsiia Publ., 2004. 576 p.
9. Saaty T. *Priniatie reshenii. Metod analiza ierarkhii* [Decision Making. Hierarchy Analysis Method]. Moscow, Radio i sviaz Publ., 1993. 278 p.
10. *GOST R 52003-2003. Urovni razukrupneniia radioelektronnykh sredstv* [Subdivision Levels of Radio-electronic Equipment. Terms and Definitions]. Moscow, 2004. 11 p.
11. Moore D. S., McCabe G. P., Craig B. A. *Introduction to the Practice of Statistics*. W.H. Freeman and Company, New York, 2009. 1010 p.
12. Kelton W., Law A. *Imitatsionnoe modelirovanie* [Simulation Modeling and Analysis]. St. Petersburg, Izdatelskaia gruppa BHV Publ., 2004. 847 p.
13. *Function Point Counting Practices Manual. Release 4.1.1*. Counting Practices Committee, New York, 1999. 370 p.