

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА NETWORK CALCULUS ДЛЯ РАСЧЕТА ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ЦИКЛИЧЕСКИМ АЛГОРИТМОМ РАБОТЫ¹

Промыслов В.Г., Семенов К.В.

Аннотация. Рассмотрена проблема практического подтверждения временных характеристик цифровых систем управления. Показано, что задержка обработки и передачи информации нередко имеет функцию распределения, отличную от нормальной, следовательно, доверительные интервалы, рассчитанные в предположении о нормальном распределении, будут для таких систем не верны. Для оценки временных характеристик системы управления предлагается применять нестатистические методы оценки временных параметров. В качестве одного из таких методов рассматривается метод детерминированных сетевых исчислений – Network Calculus. Обсуждаются особенности практического применения метода Network Calculus для оценки параметров систем. Одной из основных особенностей метода является использование специальных ограничений на поток данных и производительность системы, задаваемых в виде конвертов потока и максимальных/минимальных кривых обслуживания. Указанные характеристики в общем случае заранее не известны. Предлагаются математические методы, позволяющие оценить эти характеристики при условии, что известны входные и выходные потоки данных для системы. Показано, что расчет характеристик существенно упрощается для систем, в которых используются циклические алгоритмы обработки данных, а скорость передачи данных по сети намного больше скорости обработки данных на вычислительных компонентах системы. Проведено имитационное моделирование и обсуждается соотношение результатов для временных параметров системы, полученных с помощью метода Network Calculus, с результатами, полученными с помощью классических статистических методов оценивания. Приведен пример расчета временных параметров компонента реальной системы АСУ ТП АЭС с применением указанного метода.

Ключевые слова: производительность системы, временные характеристики, цифровые системы управления, Network Calculus, нестатистические методы оценивания.

ВВЕДЕНИЕ

Современные системы управления (СУ) для промышленных объектов реализуются в большинстве случаев в виде распределенной по функциям и средствам вычислительной среды с компонентами, представляющими собой совокупность аппаратных и программных средств, которые обеспечивают сбор, накопление, асинхронную обработку, представление и передачу информации. Компоненты СУ могут быть распределены как пространственно, так и функционально.

Для подтверждения работоспособности СУ разработаны методы динамической валидации параметров систем, которые могут меняться в зависимости от отрасли: например, для СУ в АЭС применяется методика МАГАТЭ [1]. Для оценки динамических характеристик СУ используют симуляторы сетей на основе дискретной математики, такие как OMNeT++ [1–3] и OPNET [4, 5]. Однако для подтверждения временных характеристик на реальной системе обязательно применяются и статистические методы. В последнем случае анализируют выборки измерений параметров системы, причем обычно считают, что закон распределения величин измеряемых характеристик близок к нормальному [1]. Данное предположение в большинстве случаев верно для сигналов, имеющих физическую природу, но, как мы покажем, оно может

¹Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-06044, гл. 2 и 3.



быть ложным для величин, описывающих саму цифровую СУ, например, для времени прохождения и обработки сигнала.

В качестве одной из альтернатив при расчете характеристик потоков данных между компонентами компьютерных сетей применяется нестатистический метод анализа детерминированных систем Network Calculus [6]. Метод базируется на мини-плюс алгебре и привлекателен тем, что во многих случаях позволяет рассматривать в качестве линейных системы, являющиеся нелинейными в «обычной» алгебре. Метод не использует предположения о виде распределения для измеряемого процесса.

Особенность метода Network Calculus состоит в использовании специфических функций – огибающей (конверта) потока входных и выходных данных и кривых обслуживания – для расчета характеристик системы, к которым прежде всего относятся задержка прохождения данных и параметры буферизации.

Метод Network Calculus был разработан для анализа потоковых систем без потери информации при обработке (например, для расчета пропускной способности сегмента сети или определения параметров трансляции потокового видео через сети Ethernet). Системы управления, вообще говоря, к таковым не относятся, так как они характеризуются следующими особенностями:

- параллельной обработкой нескольких задач на одном вычислительном ресурсе;
- существенным изменением объема информации на входе и выходе компонента (выходной поток может быть как больше, так и меньше входного, например, при сжатии информации);
- неоднородностью информации в СУ, в отличие от систем передачи информации (здесь неоднородность информации означает, что каждый элемент (бит) имеет различную ценность и может обрабатываться по своему алгоритму).

Нельзя сказать, что данные особенности не рассматривались в контексте Network Calculus. В работе [7] метод расширен на системы с циклическими зависимостями между входными и выходными потоками компонентов. В работах [8, 9] приведены подходы, позволяющие применять Network Calculus в системах с существенным изменением соотношения объема входного и выходного потока. В работах [10, 11] рассмотрены различные методы описания дисциплин совместной обработки нескольких задач на одном вычислительном ресурсе.

Указанные подходы имеют общие недостатки. Прежде всего, их применение требует точного зна-

ния внутренних особенностей функционирования системы, и, будучи привязаны к ним, они чувствительны к любому изменению режимов работы системы. Кроме того, при их использовании для сколько-нибудь сложных систем теряется «прозрачность» полученных результатов, возможность их простого соотнесения с другими характеристиками (скоростью поступления входных данных, их неравномерностью, вычислительной мощностью компонента).

Проанализировав эти недостатки, в настоящей работе мы при построении модели системы постарались, с одной стороны, сохранить общность и прозрачность результатов, а с другой — отразить неравномерность потока входных и выходных данных и зависимость алгоритма обработки данных от содержащейся в них информации.

Проведена работа по практической верификации метода Network Calculus путем сравнения результатов по временным задержкам, полученным посредством применения методов статистического оценивания и рассматриваемого метода. Это особенно интересно в контексте соотнесения результатов, полученных с помощью Network Calculus, с результатами, полученными с помощью статистических методов, что является малоизученной проблемой.

Задача решалась как на модельных примерах СУ, так и на конкретном примере АСУТП АЭС [11]. Так как исследовалась СУ достаточно общего вида и проблемы, с которыми сталкивались мы, также являются общими для разработчиков моделей СУ промышленных систем, то с точки зрения авторов, данный опыт может быть интересен другим исследователям и специалистам по промышленным СУ.

1. СТРУКТУРА ТИПОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

1.1. Типовая структура взаимодействия компонентов в системе управления

В работе будет рассматриваться типовая СУ для промышленного объекта (далее по тексту СУ). Подобная структура СУ используется в различных приложениях для реальных объектов [11, 13].

Исследуемая типовая структура СУ представлена на рис. 1. Здесь выделено три уровня:

- низовые контролеры и шлюзы – уровень G (уровень 1),
- серверы первичной обработки и хранения данных – уровень S (уровень 2),

– компоненты, обеспечивающие человеко-машинный интерфейс, – уровень Z (уровень 3).

Архитектура рассматриваемой СУ обладает такими свойствами:

- к серверу могут быть подключены один и более компонентов уровней 1 и 3,
- каждый канал связи (C1–C4) между компонентами разных уровней может быть резервирован (резервирование не показано на схеме),
- алгоритмы обработки информации компонентов G, S, Z циклически.

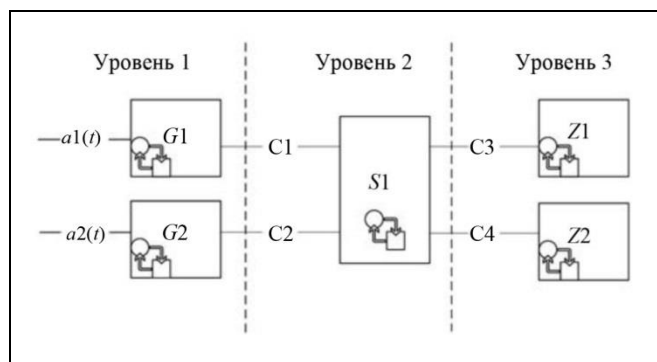


Рис. 1. Структурная схема исследуемой системы управления

1.2. Особенности обработки данных

В соответствии с практическими условиями эксплуатации СУ (см. рис. 1) на объекте в элементах разных уровней системы применяются циклические алгоритмы обработки данных, передаваемых от шлюза (G) на уровне присоединения к серверу (S) и от сервера к рабочей станции (Z). Данные представляют собой значения сигналов о состоянии объекта управления и самой СУ.

Определение 1. Элемент системы реализует циклический алгоритм обработки данных если алгоритм обладает такими свойствами:

- начальным состоянием элемента является состояние ожидания прихода данных;
- последовательно поступающие пакеты данных обрабатываются детерминированным единым образом, после чего система приходит в начальное состояние.

Для циклического алгоритма полное время обработки пакета данных D_C можно представить как сумму двух величин

$$D_C = T_E + T_S,$$

где T_E – сетевая задержка, T_S – время обработки на элементе СУ.

2. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА NETWORK CALCULUS ДЛЯ РАСЧЕТА ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

2.1. Основы Network Calculus

Метод Network Calculus [6] базируется на достаточно новых методах прикладной математики, введенных Р.Л. Крузом [14, 15] и использующих мини-плюс алгебру (см. монографию [16]). Основная область применения Network Calculus — это исследования систем с очередями.

Ниже мы дадим краткое описание метода, следуя изложенному в работе [6].

Определение 2. Функция потока (кумулятивный поток) – это неубывающая функция времени, для которой

$$\begin{cases} A(t) \leq A(s), \forall t < s, \\ A(t) \in \mathbb{R}_+ \cup \{+\infty\}, \\ t \in \mathbb{R}. \end{cases}$$

Функция потока называется причинной, если $A(t) = 0, \forall t \leq 0$. Множество причинных функций обычно обозначается как F . Введем для таких функций операции свертки и деконволюции.

Определение 3. Пусть A и β – причинные функции потока. Их мини-плюс свертка, обозначаемая символом $\otimes$, – это функция $A^* = A \otimes \beta$:

$$A^*(t) = \inf_{0 \leq s \leq t} \{\beta(t-s) + A(s)\}. \quad (1)$$

Далее мы будем опускать в формулах аргумент t там, где это не затрудняет понимание. Очевидно, что $A^*(t) = 0, \forall t < 0$, и A^* неотрицательна, потому что и A , и β – неотрицательные причинные функции.

Определение 4. Пусть имеются функции A и β , где β – причинная функция. Введем операцию мини-плюс деконволюции, обозначаемую символом $\oslash$, результатом которой является функция $H = A \oslash \beta$:

$$H = \sup_{u \geq 0} \{A(t+u) - \beta(u)\}. \quad (2)$$

Отметим, что деконволюция функций потока A и β , где β – причинная функция, сама является функцией потока.

Определение 5. Пусть A и β – причинные функции. Введем операцию макси-плюс свертки, обозначаемую символом $\bar{\otimes}$, результатом которой является функция $A^* = A \bar{\otimes} \beta$:

$$A^*(t) = \sup_{0 \leq s \leq t} \{\beta(t-s) + A(s)\}. \quad (3)$$



Определение 6. Пусть A и β – функции потока, причем β – причинная функция; назовем результатом операции макси-плюс деконволюции, обозначаемой как $\bar{\otimes}$, функцию $H = A \bar{\otimes} \beta$:

$$H = \inf_{u \geq 0} \{A(t+u) - \beta(u)\}. \quad (4)$$

Определение 7. Функция β представляет собой (минимальную) кривую обслуживания элемента сети или системы при входном потоке A , если β – причинная функция потока и выходной поток A^* элемента или системы удовлетворяет соотношению

$$A^* \geq A \otimes \beta. \quad (5)$$

Определение 8. Функция γ представляет собой (максимальную) кривую обслуживания элемента сети (или системы) со входным потоком A , если γ – причинная функция потока и если выходной поток A^* элемента (системы) удовлетворяет соотношению

$$A^* \leq A \otimes \gamma. \quad (6)$$

Определение 9. Функция a называется конвертом потока A , если $A \leq A \otimes a$ или, что то же самое,

$$a \geq A \oslash A. \quad (7)$$

Входящий и выходящий потоки определяются суммарным количеством данных, которые наблюдаются на входе и на выходе за определенный интервал времени. Поэтому время прохождения данных через систему будет, соответственно, определяться как горизонтальное отклонение между этими функциями $d(t)$.

Определение 10 (максимальная задержка в системе). Для линейных систем со входным потоком A , выходным потоком A^* , $A(t) \geq A^*(t)$, максимальная задержка $D_{\max}$ представляет собой максимальное горизонтальное расстояние между функциями входного и выходного потоков:

$$D_{\max} = h(A, A^*) = \sup_{t \geq 0} \left\{ \inf \{d \geq 0 : A(t) \leq A^*(t+d)\} \right\}.$$

Одним из фундаментальных результатов применения метода Network Calculus является возможность расчета задержек на основании конвертов потока и кривых обслуживания, а не кумулятивных функций потока (доказательство приведено в работе [6]):

$$D_{\max} = h(a, \beta). \quad (8)$$

3. ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ КРИВЫХ МЕТОДА NETWORK CALCULUS

Рассмотрим задачу определения конверта потока, минимальной и максимальной кривых обслуживания системы и их линейных аппроксимаций на основании измеренных в ходе эксперимента функций потока.

3.1. Расчет конверта потока на основании экспериментальных данных

Уравнение (7) определяет прямой способ расчета конверта кумулятивного потока A . Для облегчения вычислений удобно работать с кусочно-линейной аппроксимацией конверта, которая в отдельных случаях сводится к аффинной функции $y = kx + b$. Представление в виде кусочно-линейной функции дает возможность использовать эффективные вычислительные алгоритмы обработки данных, а работая с аффинной функцией, можно быстро, «на лету» анализировать систему и проводить количественные оценки ее поведения.

Кусочно-линейная аппроксимация традиционно используется при анализе сложных систем. Простота данной модели делает ее незаменимой при расчетах, проводимых с помощью методов Network Calculus, где применяются как специально разработанные алгоритмы [10], так и математические методы теории оптимального управления и идентификации систем (см, например, работы [17] или [18]).

Возможности аппроксимации огибающей потока в виде аффинной кривой в методе Network Calculus рассматривались в работе [19], где способы расчета однокомпонентной линейной огибающей потока основывались на алгоритмах метода опорных векторов [20].

3.2. Расчет максимальной и минимальной кривых обслуживания на основании экспериментальных данных

Формула (7) позволяет напрямую вычислить конверт потока, и задача сводится к поиску эффективных аналитических и компьютерных методов линейной аппроксимации. Определить же параметры кривой обслуживания намного сложнее.

Теоретически можно получить кривую обслуживания по формулам (1), (2) в виде точной границы, работая со специально подобранным тестовым потоком и учитывая тот факт, что у функций свертки нулевой элемент δ_0 поглощает оператор $\otimes$

([6], с. 111). Однако на практике это неосуществимо, потому что для такого эксперимента нужно было бы сгенерировать бесконечно большой поток, что превышает возможности любой реальной системы.

Второй подход заключается в использовании свойства мини-плюс алгебры, описанного в работе [6]:

$$C \geq B \otimes A \Leftrightarrow B \leq A \otimes C. \quad (9)$$

Воспользовавшись этим соотношением и формулой (2), получаем нижнюю оценку максимальной кривой обслуживания:

$$\gamma' \leq A^* \oslash A, \quad (10)$$

где A и A^* – входной и выходной кумулятивный потоки соответственно.

Но для анализа системы знания одной лишь максимальной кривой обслуживания зачастую недостаточно. Например, для расчета максимальной задержки в системе и максимального размера буфера требуется минимальная кривая обслуживания (5). Алгоритмы расчета минимальной кривой обслуживания для систем общего вида нам не известны.

Предлагаемый нами подход к расчету минимальной кривой обслуживания опирается на более «слабое» свойство мини-плюс операций свертки и деконволюции, которое будет доказано далее.

Свойство. Если $C \leq B \oslash A$, то

$$B \geq A \otimes C. \quad (11)$$

Доказательство.

Пусть $C(s) \leq (B \oslash A)(s)$ для $s \in \mathbb{R}$. Это означает, что для любого $v \geq 0$

$$B(s+v) - A(v) \geq \inf_{u \geq 0} (B(s+u) - A(u)) \geq C(s),$$

т. е.

$$B(s+v) \geq C(s) + A(v). \quad (12)$$

Введем обозначение

$$t = s + v.$$

Перепишем неравенство (12) в виде

$$B(t) \geq A(t-s) + C(s). \quad (13)$$

Неравенство (13) выполняется при любом s для $t \geq s \geq 0$, значит, оно выполняется и в предельном случае, для нижней границы правой части неравенства, т. е.

$$B \geq A \otimes C, \quad \forall t \geq 0.$$

Свойство доказано. ♦

Теперь оценим минимальную кривую обслуживания. Пусть A – входной кумулятивный поток, A^* – выходной кумулятивный поток. Тогда, в силу доказанного свойства, для функции

$$\beta' = A^* \oslash A \quad (14)$$

будет выполняться неравенство $A^* \geq A \otimes \beta'$, т. е. полученная оценка β' – минимальная кривая обслуживания.

Так как свойство (11) является лишь необходимым условием, то оценка минимальной кривой обслуживания, полученная по формуле (14), может лежать как выше, так и ниже реальной минимальной кривой обслуживания системы. Сравнивая выражения (9) и (11), заметим также, что $\beta \leq \gamma'$ т. е. минимальная кривая обслуживания ограничена сверху максимальной кривой обслуживания.

В специальном случае, когда максимальная кривая обслуживания отсутствует в системе (т. е. когда существует режим «мгновенной» обработки входного потока), можно получить точное значение для минимальной кривой обслуживания, применив вместо входного и выходного кумулятивного потока их конверты. Для этого положим, что α, α^* – это конверты входного и выходного потока соответственно. Известно, что $\alpha^* = (\alpha \otimes \gamma) \oslash \beta$ (см. монографию [6], с. 34). Тогда для $\gamma(t) = \delta_0$ это уравнение можно переписать как

$$\alpha^* = \alpha \oslash \beta,$$

и по свойству оператора $\oslash$ (см. монографию [6], с. 123) и минимальной функции обслуживания β

$$\alpha = \beta \otimes \alpha^*.$$

Используя коммутативность оператора $\otimes$ и применив то же свойство в обратную сторону, получим оценку минимальной кривой обслуживания:

$$\beta' = \alpha^* \oslash \alpha.$$

Если кривые обслуживания можно описать в виде аффинных функций, то для них существуют быстрые алгоритмы конволюции и деконволюции, необходимые для расчета параметров системы [11]. Как показано в работе [21], кривые обслуживания можно по аналогии с конвертом потока аппроксимировать аффинными функциями, применяя сходные алгоритмы, базирующиеся на методе опорных векторов.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрим задачу описания СУ в модели Network Calculus на примере типовой СУ, представленной на рис. 1. Дополнительно сделаем предположение о наличии избыточной вычислительной мощности в СУ, что позволяет декомпозировать систему и рассматривать каждый логический канал системы в отдельности. Если это условие не выполняется, необходимо учитывать взаимовлияние различных каналов обработки, используя, например, одну из возможных моделей планировщиков задач [11].

В СУ, представленной на рис. 1, рассмотрим отдельно взятый канал управления, изображенный на рис. 2. В модели канала каждый компонент СУ характеризуется собственной максимальной и минимальной кривой обслуживания. Как следует из определений минимальной (5) и максимальной (6) функций обслуживания, выводы и уравнения для максимальной функции обслуживания СУ будут аналогичны выводам для минимальной кривой обслуживания и могут быть записаны простым переименованием переменных и заменой знаков неравенств в отношениях. Поэтому все основные выводы и рассуждения далее в данном разделе будут приведены применительно к минимальной кривой обслуживания β . Чтобы обозначить конкретный компонент, будем добавлять к β нижний буквенно-цифровой индекс в соответствии с обозначениями на рис. 2. На уровень 1 системы подается входной поток, обозначаемый прописной буквой с индексом. Входной и выходной поток на выходе каждого из компонентов будем обозначать как A, A^* .

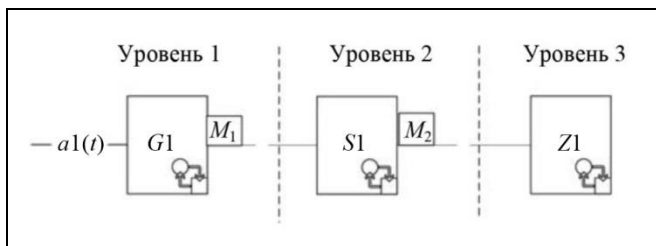


Рис. 2. Выделенный в СУ логический канал передачи $i1$

Тогда в соответствии с определением минимальной функции обслуживания (5) для каждого элемента линейной системы можно записать выражение вида

$$A^* \geq A \otimes \beta.$$

Однако на практике характеристики всех элементов СУ, кроме каналов связи, не являются линейными: меняется масштаб потока между входом и выходом. Например, один сигнал срабатывания сигнализации на входе компонента может вызвать целую лавину сопутствующих сигналов в алгоритмах защиты и отображения информации в СУ, что приведет к росту информации на выходе компонента. Для моделирования изменения масштаба потока в модель, изображенную на рис. 2, введены масштабирующая функция M и обратная ей функция M^{-1} , обеспечивающие преобразование $M: A^* \rightarrow A$ и $M^{-1}: A \rightarrow A^*$ [8]. В этом случае кривая обслуживания системы β_{Si} для i -го канала с

учетом масштабирующих функций представляется в виде

$$\beta_{Si} = \beta_{Gk} \otimes M_1^{-1}(\beta_{Cn1} \otimes \beta_{Sl} \otimes M_2^{-1}(\beta_{Cn2} \otimes \beta_{Zm})), \quad (15)$$

где $i, k, l, m \in N$ – номера последовательно соединенных компонентов в логическом канале обработке данных на каждом из уровней СУ; $n1, n2 \in N$ – номера каналов связи, используемых при передаче данных между компонентами в канале $i1$, M_1, M_2 – масштабирующие функции соответствующих компонентов. Кривые обслуживания β_{Cn1}, β_{Cn2} отражают сетевую задержку передачи данных T_E , остальные – величину задержки обработки данных T_S в компоненте.

Уравнение (15) при условии, что имеется возможность вычислить функции обслуживания и масштабирующие функции для каждого из компонентов, позволяет получить границы для задержки обработки данных для всей системы в зависимости от характеристик входных потоков $ai(t)$, $i \in N$. Однако на практике расчет масштабирующих функций M реальной системы – трудная и не всегда разрешимая задача.

Чтобы избежать трудностей с определением функций масштабирования, для систем с циклическим алгоритмом обработки данных применим технический прием – переопределим входной и выходной потоки и перейдем от реальных потоков к виртуальным.

Положим, что все данные, принятые системой в начале каждого цикла, к концу цикла будут обработаны и переданы на выход, и рассмотрим функцию

$$\begin{cases} q(j) = \tau_j, j \in N, \\ q(0) = 0, \end{cases}$$

где j – номер цикла, а τ_j – длительность цикла j .

Далее введем на интервале $[0, +\infty)$ функцию $Q(x)$:

$$Q(x) = \sum_{l=0}^j q(l), j \leq x < j+1.$$

Очевидно, что ступенчатая функция $Q(x)$ является, в соответствии с определением 2, функцией потока.

Выходной поток Q^* для такого компонента может быть получен из входного потока сдвигом его на один цикл:

$$Q^*(x) = \begin{cases} Q(x-1), x \in [1, +\infty), \\ 0, x \in [0, 1). \end{cases}$$

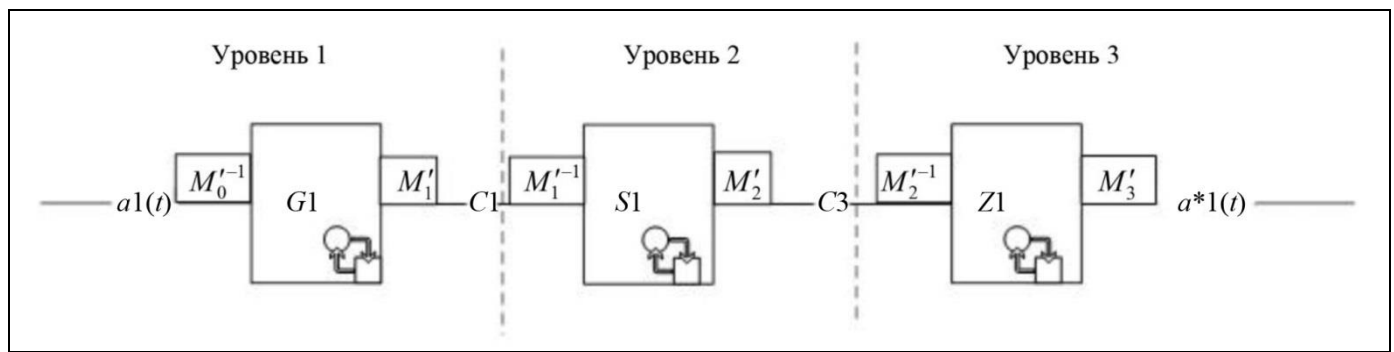


Рис. 3. Структурная схема СУ для циклических виртуальных потоков

Структурная схема (см. рис. 2), переопределенная для виртуальных потоков в компонентах типа G, S, Z , представлена на рис. 3.

Для канала с такими «виртуальными» потоками для компонентов G, S, Z переопределим минимальные и максимальные кривые обслуживания β и γ ,

$$\begin{aligned} Q^* &\geq Q \otimes \beta, \\ Q^* &\leq Q \otimes \gamma, \end{aligned}$$

и введем операторы отображения M_0', M_1', M_2' , обеспечивающие преобразование $M': Q^* \rightarrow A$, и операторы обратного отображения, обеспечивающие преобразование $M^{-1}: A^* \rightarrow Q$. Тогда кривая обслуживания для системы, изображенной на рис. 3, будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \beta_{Si} &= \beta_{Gk} \otimes M_1' \otimes \beta_{Cn1} \otimes M_1^{-1} \otimes \\ &\otimes \beta_{Sl} \otimes M_2' \otimes \beta_{Cn2} \otimes M_2^{-1} \otimes \beta_{Zm}. \end{aligned} \quad (16)$$

В свою очередь, уравнение (16) может быть приведено (см. статью [8], подраздел 5.1) к более удобному виду переносом масштабирующих функций M' с входа на выход компонента и сокращения пары M', M^{-1} на выходе компонента:

$$\begin{aligned} \beta_{Si} &= \beta_{Gk} \otimes M_1^{-1} (\beta_{Cn1}) \otimes \beta_{Sl} \otimes \\ &\otimes M_2^{-1} (\beta_{Cn2}) \otimes \beta_{Zm}. \end{aligned} \quad (17)$$

Частичный переход от потоков данных A к циклам Q в уравнении (16) и (17) в целом не упрощает работу с масштабирующими функциями, однако при условии

$$\beta_{Ci} \gg \beta_{\{G,S,Z\}i} \quad (18)$$

можно заменить β_{Ci} на нейтральную относительно оператора мини-конволюции функцию $\delta(t)$:

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & t = 0, \\ +\infty, & t > 0, \end{cases}$$

обладающую свойством: $f = \delta \otimes f$ (см., например, монографию [6]).

Для монотонной масштабирующей функции сетевого компонента

$$M^{-1}(\delta(t)) \rightarrow \delta(n), \quad n \in N,$$

появляется возможность опустить функцию β_{Ci} из уравнения (17) и, соответственно, избавиться от масштабирующих функций. Физически допущение (18) означает, что время цикла обработки в сетевом стеке, соответствующее времени передачи информации по сети системы, пренебрежимо мало по сравнению со временем, которое занимает обработка информации на вычислительном ресурсе. Такое допущение в основном выполняется в современных цифровых СУ, где передаваемая информация имеет относительно небольшой объем по сравнению с пропускной способностью каналов связи.

В этом случае общая кривая обслуживания системы в уравнении (17) для i -й цепочки для «вторичного» потока упрощается:

$$\beta_{Si} = \beta_{Gk} \otimes \beta_{Sl} \otimes \beta_{Zm}.$$

Здесь $k, l, m \in N$ – номера последовательно соединенных компонентов, участвующих в обработке данных на каждом из уровней СУ.

Хотя метод Network Calculus достаточно «прозрачен» с точки зрения интерпретации полученных с его помощью результатов, его особенностью является то, что в вычислениях применяются нестандартные характеристики исследуемых величин: конверт потока и кривой обслуживания. Данные величины не измеряются напрямую, а сами являются результатом вычислений. Очевидно, что используемые для их расчета методики будут влиять и на достоверность конечного результата. Поэтому остановимся на практических аспектах вычисления конверта потока и кривой обслуживания.



5. ВЕРИФИКАЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА NETWORK CALCULUS ДЛЯ РАСЧЕТА ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

5.1. Эталонные данные и процедура верификации

Прежде чем приступить к расчету характеристик типовой СУ (см. рис. 1), необходимо было проверить достоверность метода Network Calculus на данных с известными статистическими параметрами. Для решения этой задачи была создана тестовая программа, моделирующая компонент СУ с циклическим алгоритмом работы; сетевая задержка T_E и длительность цикла T_S представляли собой случайные величины, распределенные по определенному закону. При обработке полученных данных использовалась библиотека Network Calculus в среде Matlab [10].

Предметом исследований было отношение максимальной задержки, рассчитанной с помощью методов Network Calculus, и максимальной измеренной задержки в выборке, зависимость величины максимальной расчетной задержки от размера выборки и распределения.

Дополнительно была отработана методика проведения измерений и получения выборок с размерами сетевых пакетов и времен циклов на тестовой программе, имитирующей циклический алгоритм работы реальной системы. Псевдокод этой тестовой программы приведен на рис. 4. Файл, в котором содержатся параметры функции распределения задержки, построчно читается в цикле; после каждой операции чтения вставлена случайная задержка, распределенная по заданному закону. Длительность каждого цикла записывается в выходной файл.

5.2. Методика и результаты тестирования

Для каждой из выборок рассчитывались три задержки:

- максимальная на всем наборе данных экспериментальная задержка D_x ,
- задержка, вычисленная с помощью методов Network Calculus по формуле (8), где используется оценка минимальной кривой обслуживания β по формуле (14),
- задержка, вычисленная с помощью методов Network Calculus по формуле (8), где используется нижняя оценка максимальной кривой обслуживания γ (10).

```
printTimeAndVal(InData, OutData)
// subroutine print timestamp and input/output data counter

main
begin
    insum=0; // input data flow counter
    outsum=0; // output data flow counter

    while((nch = read(par1, par2, ..., parN, Distr)) > 0) //read file by lines
    {

        insum += nch; // increase current input flow counter
        printTimeAndVal(insum, outsum); //write data to file

        randn(par1, par2, ..., parN, Distr); // Distr – statistical distribution
        // delay execution on random value with selected distribution
        // par1, par2, ..., parN - parameters of the distribution
        write(outdata);
        outsum += nch; // increase current output data flow counter
        printTimeAndVal(fpi, insum, outsum);
    }
end;
```

Рис. 4. Псевдокод тестовой программы для генерации выходного потока с известным распределением задержки

Расчеты проводились для выборок различной длины L . Данные в выборках имели различные распределения, включая как распределения, близкие к нормальному, так и распределения с тяжелыми хвостами. Все приведенные данные округлены с точностью примерно до 1%.

Исходные тестовые данные приведены в таблице, доступной для скачивания [22]; данные, полученные на тестовой программе, помечены в таблице звездочкой (*).

На рис. 5 представлена зависимость отношения D/D_x от размера выборки для разных функций распределения, где D – максимальная задержка, полученная в результате работы метода Network Calculus при использовании кривой обслуживания, рассчитанной по формуле (14).

На рис. 6 представлена зависимость отношения D/D_x , где D – рассчитанная максимальная задержка для метода Network Calculus при использовании кривой обслуживания, рассчитанной по формуле (10), для разных функций распределения и размеров выборки.

Проведенное тестирование метода позволяет сделать следующие наблюдения и выводы.

Полученная оценка максимальной задержки D с помощью кривой обслуживания (10) близка к экспериментальной максимальной задержке D_x , но, как правило, задержка D несколько меньше, чем задержка D_x . Полученная оценка лучше соотносится с реальной максимальной задержкой при росте объема выборки и для распределений, близких к нормальному [22].

В то же время, оценка максимальной задержки с помощью минимальной кривой обслуживания (14) является более точной для коротких выборок и для распределений с тяжелыми хвостами. Отношение D/D_x растет с увеличением выборки, хотя темп изменения задержки падает с увеличением выборки. Отношение D/D_x может достигать 10^2 .

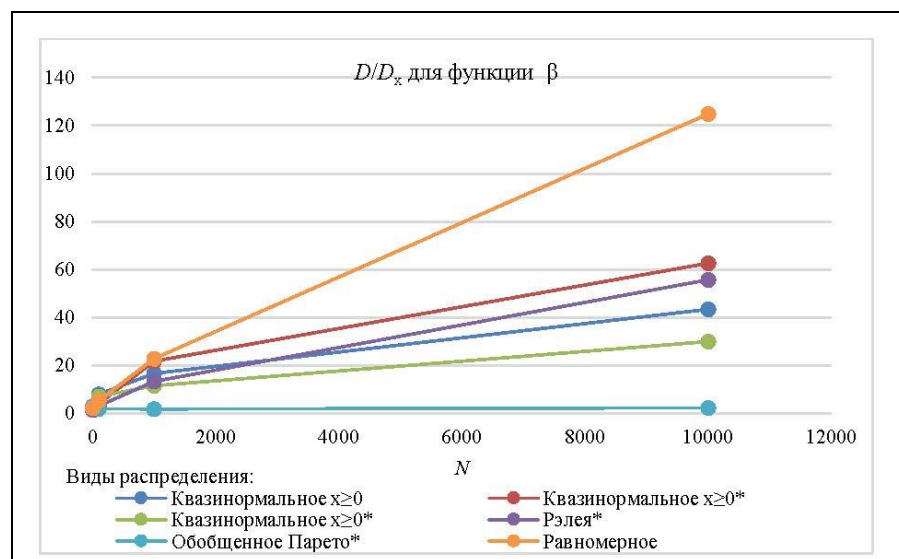


Рис. 5. Зависимость оценки максимальной задержки от размера выборки для β

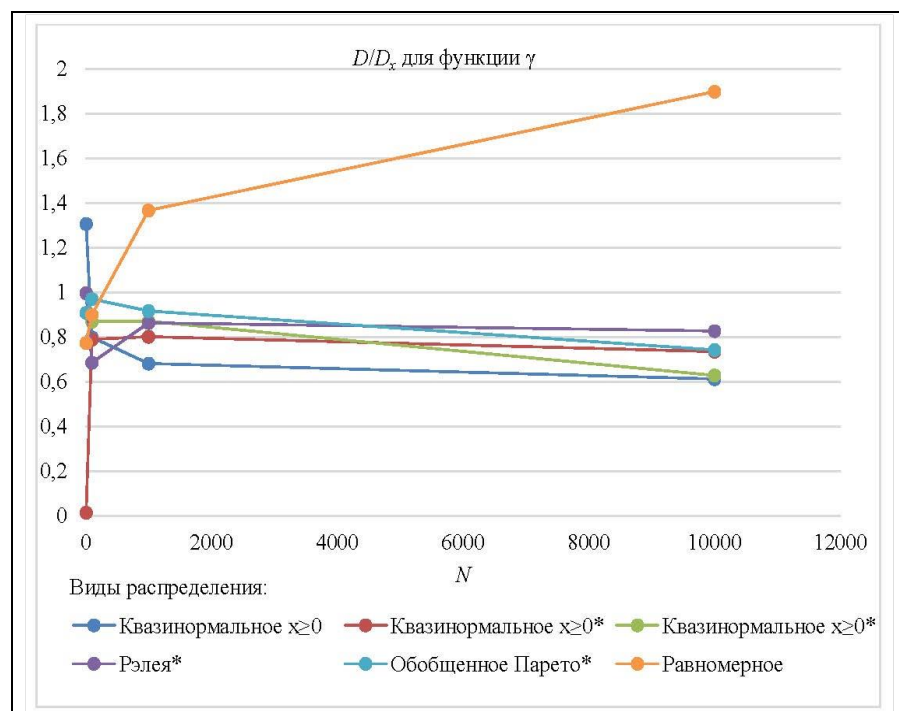


Рис. 6. Зависимость оценки максимальной задержки от размера выборки для функции γ

Зависимость отношения D/D_x от размера выборки и амплитуды выброса при использовании минимальной кривой обслуживания приведена на рис. 7.

Проведенное моделирование показывает, что максимальная задержка, вычисленная с помощью кривой обслуживания (10), характеризует задержку в нормальном рабочем режиме (см. рис. 6). Оценка задержки близка по своему абсолютному значению к максимальной задержке в выборке и мало зависит от размера выборки для достаточно больших выборок.

На рис. 8 приведен типичный вид кривых Network Calculus, полученных из экспериментальных данных. Данные в выборке имеют в основе распределение Рэлея с $\sigma = 1$, однако в выборку были добавлены единичные выбросы величиной 300σ . Для наглядности приведены данные короткой выборки. Верхняя горизонтальная линия соответствует максимальной задержке, рассчитанной для кривой обслуживания (10). Эта задержка близка к максимальной задержке в выборке. Нижняя горизонтальная линия соответствует оценке максимальной задержки для кривой обслуживания (14). На рисунке хорошо видно, что конверт входного потока ограничивает все кривые на графике сверху, а оценка минимальной функции обслуживания (14) – снизу.

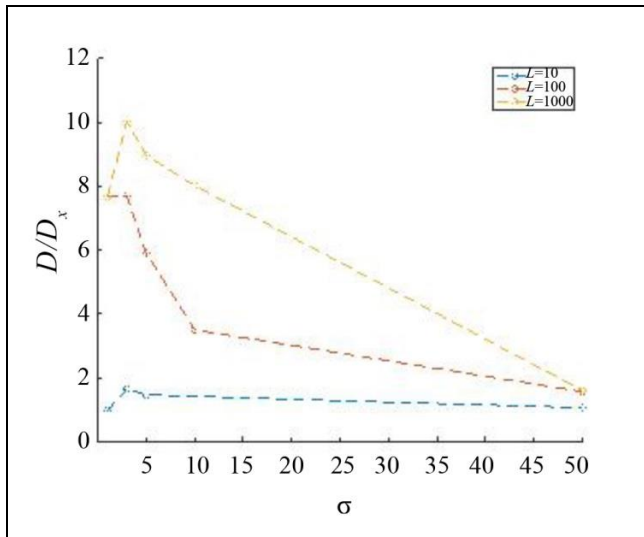


Рис. 7. Отношение измеренной и рассчитанной задержки для распределения Рэлея с параметрами $\mu = 0$, $\sigma = 300$ Байт в зависимости от величины единичного выброса в σ для выборки различной длины L

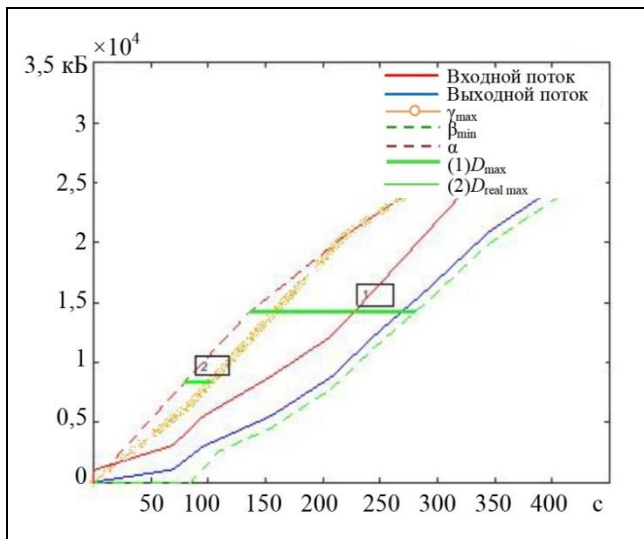


Рис. 8. Экспериментальные кривые Network Calculus для выборки, распределенной по Рэлею, с единичным выбросом 300σ и размером выборки $L = 10$

Для выборок, полученных на тестовом примере (не генерируемых), результаты оказались несколько менее стабильными, но отличия по порядку величины от тех же распределений полученных путем прямой генерации данных, не превышают 20%. Используемая техническая реализация сбора данных может быть рекомендована для измерений реальных систем.

5.3. Сопоставление результатов применения метода Network Calculus с результатами применения статистических методов расчета

Наше моделирование показало, что значения отношений D/D_x и максимальной задержки зависят от функции распределения времени обработки и от длины выборки, количества и амплитуды отдельных выбросов в данных.

Зависимость имеет сложный характер из-за нелинейного характера формул, описывающих основные операции (1)–(4) Network Calculus, используемые для нахождения максимальной задержки. В соответствии с ними, в конверте потока и в кривой обслуживания будут присутствовать участки, составленные из близких по значению величин, отсортированных по убыванию для конверта потока и максимальной кривой обслуживания и по возрастанию для минимальной кривой обслуживания (см. монографию [6], с. 113).

Таким образом, с ростом выборки в функции потока будет присутствовать большее количество участков со значительной крутизной, следовательно, будут меняться как конверт потока (7), так и кривые обслуживания, рассчитанные по формулам (10) и (14).

Оценка максимальной кривой обслуживания (10) по выборке будет иметь поведение, сходное с конвертом потока, минимальная кривая обслуживания имеет обратную тенденцию (см. рис. 8). Поэтому оценка, полученная по формуле (10), меньше зависит от изменения входных данных и длинны выборки.

Для распределений с тяжелыми хвостами характерно наличие некоторого количества выбросов, сильно отличающихся от остальных значений. Для распределений, близких к нормальному, появление подобных выбросов в выборке менее вероятно, но для них характерно присутствие достаточного количества данных внутри доверительного интервала. Соответственно, общая тенденция кривизны для конверта и кривых обслуживания будет различна в зависимости от распределения измеряемой величины. Для выборок с единичными большими выбросами будут характерны кривые с большим значением кривизны в начале и последующим ее резким уменьшением; для выборок, не содержащих больших выбросов, – кривые с плавным уменьшением кривизны (рис. 9).

Некоторые примеры кривых обслуживания для различных длин выборок приведены в дополнительных данных [23, рис. 1].

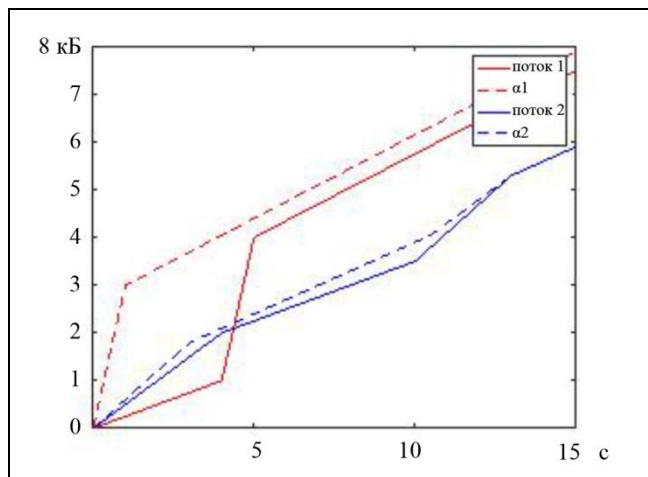


Рис. 9. Пример двух кумулятивных потоков и конвертов (α_1 , α_2) для них. Поток 1 имеет выбросы в данных (точка 4 по оси абсцисс), поток 2 не имеет значительных выбросов

Данное рассуждение позволяет понять связь между оценкой задержки, полученной из расчетов с помощью Network Calculus, и оценкой, полученной с помощью классических методов статистического оценивания (см., например, работу [23]).

Известно [25], что результаты, полученные посредством Network Calculus, предполагают наихудшее сочетание условий для обработки информации в системе. Графически это соответствует тому, что в начале кривой для конверта сосредоточены участки с наибольшими изменениями во входном потоке, т. е. при наихудшей ситуации, которая может быть спрогнозирована исходя из наблюдаемых данных. Для задержки, рассчитанной по минимальной кривой обслуживания, наихудшая ситуация – это приход наибольшего пакета данных, когда сервер загружен работой и имеет малую производительность. При расчете задержки с максимальной кривой обслуживания максимальным по размеру данным соответствует максимальная характеристика обслуживания, т. е. рассматривается случай, когда максимальному объему данных сопутствует максимальная производительность системы, что характерно для нормального режима работы системы.

И в том, и в другом случае задержка, рассчитанная с помощью Network Calculus, соответствует для статистических методов расчета задержке, рассчитанной для описанных выше сценариев. Вероятность того, что в реальной выборке задержка достигнет такого значения, соответствует вероятности реализации данного сценария в эксперименте. При моделировании нами рассчитывалась вероятность того, что реальная задержка будет меньше, чем задержка, рассчитанная с помощью Network Calculus. Для задержки, рассчитан-

ной с применением минимальной функции обслуживания, в большинстве случаев эта вероятность близка к единице [22].

6. ПРАКТИЧЕСКИЙ ПРИМЕР РАСЧЕТА ЗАДЕРЖКИ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Приведем результаты оценки временных характеристик реальной системы управления, описанной выше (см. рис. 1). Для того чтобы обосновать возможность применения упрощенной формулы (23) для расчета кривой обслуживания всей системы, измерялись также сетевые задержки передачи данных между компонентами.

Для измеренных величин рассчитаны эмпирические распределения, а для сетевой задержки дополнительно проанализированы спектральные характеристики.

Рассмотрим оценку максимального времени обработки данных в компоненте с циклическим алгоритмом функционирования, полученную с помощью методов Network Calculus.

Измерения проводились для элементов уровня Z (см. рис. 2). Объем обрабатываемых циклических данных сравнительно стабилен в нормальных режимах работы и имеет некоторую среднюю скорость. Однако при некоторых особых (срабатывание защит и блокировок оборудования) или переходных процессах (переход с режима на режим) объем данных и алгоритм (т. е. скорость) обработки может значительно меняться.

Эмпирическое распределение времени цикла T_5 (рис. 10), очевидно, отличается от нормального или пуассоновского и является многомодовым. В соответствии с алгоритмом функционирования, каждая из мод соответствует характерному циклу обработки для определенного вида данных.

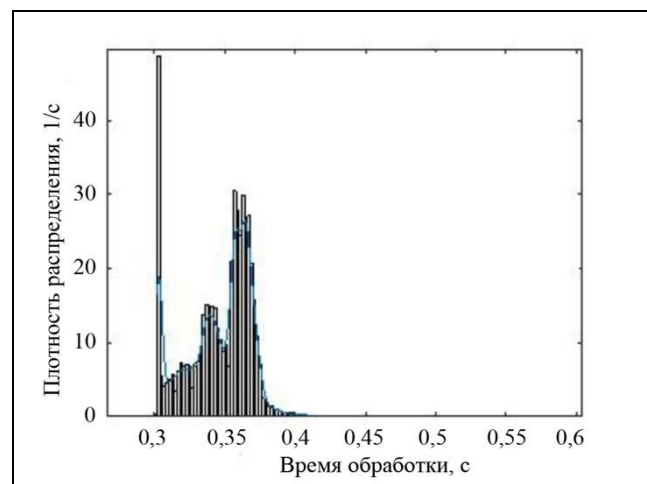


Рис. 10. Эмпирическое распределение плотности вероятности времени цикла компонента Z. Сплошной линией показана сглаженная огибающая распределения



Для данной выборки была сделана оценка максимальной задержки с использованием кривых обслуживания (10), (14); результаты приведены в таблице.

Результаты моделирования для компонента Z

$L \sim 10^3$							
D_x	$p(D_x)$	D	$p(D)$	D/D_x	D'	$p(D')$	D'/D_x
0,37	~ 1	5,1	~ 1	4,9	0,32	0,87	0,3

Рассмотрим параметры сетевой задержки T_E передачи данных между компонентами системы, изображенными на рис. 2. Для примера приведены данные прохождения сетевых пакетов между компонентами уровня S и уровнем Z. Компоненты в рассматриваемом примере обмениваются данными по протоколу TCP/IP. Характеристики процесса передачи данных между другими компонентами системы имеют сходный характер.

В эксперименте с помощью утилиты tcpdump из состава ОС измерялось время двойного прохода TCP-пакета (англ. *round-trip time*, RTT) – время, прошедшее с момента отправки пакета компонентом S до момента получения подтверждения [26] от компонента уровня Z. Измеренные значения RTT приведены на рис. 11.

Типичное время двойного прохождения пакета составляет десятки микросекунд. В то же время, распределение RTT существенно отличается от нормального распределения, характерного для физических процессов, или пуассоновского распределения, широко используемого в теории обслуживания (рис. 12).

В распределении, изображенном на рис. 12, четко выделяются три характерных периода времени. В то же время отметим, что долговременных периодов нами в ходе эксперимента не выявлено. Это подтверждается анализом спектра RTT, приведенного на рис. 13, который имеет шумовой характер.

Максимальное время прохождения сетевых пакетов в $\sim 10^3$ раз меньше, чем время обработки информации в циклах, что позволяет для исследуемой СУ использовать упрощенную формулу (18) для расчета функции обслуживания.

В ходе измерений на реальной СУ нами проведена проверка того, что полученные в результате измерений эмпирические распределения (см. рис. 10, 12) имеют тяжелый хвост. Проверка проводилась с помощью алгоритма распознавания распределений с тяжелыми хвостами [27], который у авторов показал лучшие результаты, чем тесты, основанные на критерии Колмогорова – Смирнова.

Проверка показала, что в реальной системе распределения времени задержек как в сетевых компонентах, так и в компонентах, обрабатывающих информацию, относятся к типу распределений с тяжелыми хвостами.

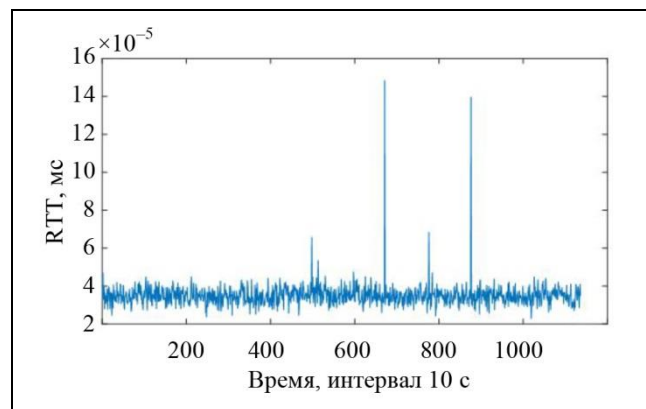


Рис. 11. Время двойного прохождения пакета между компонентами S и Z в реальной СУ. Данные усреднены с 10-секундным интервалом

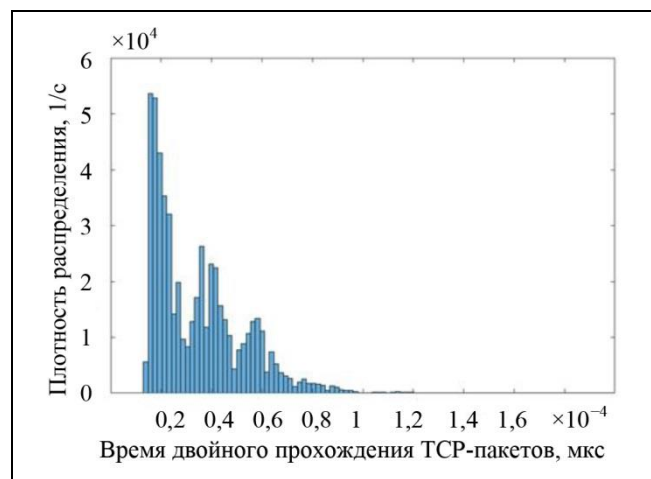


Рис. 12. Эмпирическое распределение плотности вероятности для времени двойного прохождения TCP-пакета

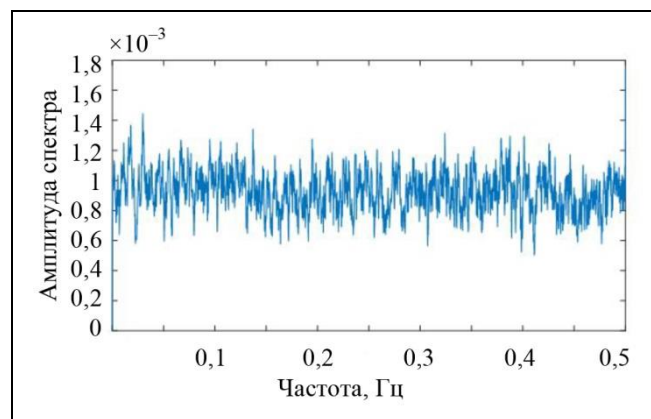


Рис. 13. Амплитуда спектра RTT. Нулевая гармоника, соответствующая среднему значению, вырезана. Данные были приведены к равномерной шкале с интервалом 2 с между точками

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе рассмотрена проблема подтверждения временных характеристик цифровых систем управления (СУ) в процессе их испытаний. В требования по СУ часто включаются ограничения на время обработки в отдельных компонентах СУ и ограничения на время передачи информации между компонентами СУ.

Ограничения могут накладываться как на средние, так и на максимальные (предельные) значения величин и выражаться либо в виде статистических ограничений, когда вместе с величиной задается ее доверительный интервал, либо в виде ограничений на абсолютные значения [27].

Оценивание случайной величины по выборке – классическая задача математической статистики, она давно хорошо разработана и изложена в литературе (см., например, работу [23]). Однако интерпретация полученных оценок, распространяющая опыт работы с «обычными» измерениями физических величин с распределениями, близкими к нормальному, на оценку временных характеристик цифровых систем управления, может привести к неверным выводам. Сформулируем основные проблемы.

Процедура подтверждения требований в ходе испытаний в основном базируется на расчете выборочного среднего и выборочной дисперсии (например, методика МАГАТЭ [1]). Если случайная величина имеет конечное математическое ожидание и дисперсию, выборочное среднее является несмещенной состоятельной оценкой теоретического среднего и не зависит от вида распределения. Известным недостатком такого метода является низкая робастность в случае наличия посторонних выбросов в выборке [29]. Однако выборочная дисперсия, как смещенная, так и несмещенная, является состоятельной оценкой теоретической дисперсии величины.

На практике, интерпретируя полученные оценки среднего и дисперсии, неявно полагают, что временные задержки распределены по нормальному закону, и интуитивно переносят оценки доверительных интервалов для нормально распределенной величины на случай временных задержек в системах управления. В самом деле, если случайная величина имеет нормальное распределение, то имея выборочное среднее и дисперсию, несложно оценить доверительный интервал для подтвержда-

емого параметра. Однако функция распределения задержки в СУ в общем случае не является нормальной.

Физическая природа измеряемой величины (времени) накладывает ограничения на вид ее функции распределения: как минимум, она является ограниченной слева. Если в технических требованиях задается максимальное абсолютное значение, например, «время прохождения сигнала между компонентами СУ не должно превышать некоторой величины», то такая форма условия подразумевает, что случайная величина имеет функцию распределения, ограниченную также и справа, т. е. ограничения приводят к тому, что функция распределения изначально не является в строгом смысле функцией распределения нормальной случайной величины.

Наше исследование реальной СУ показало, что распределение задержек как в сетевых компонентах, так и в компонентах, обрабатывающих информацию, существенно отличается от нормального и часто имеет многомодовый характер и относится к типу распределений с тяжелыми хвостами.

В общем случае для определения вероятности превышения случайной величиной некоторого значения можно воспользоваться неравенством Чебышева, но оно дает очень грубую оценку. Поэтому при оценке временных параметров необходимо либо получить функцию распределения и затем применить статистические методы оценки для данного класса распределений, либо, как одна из альтернатив, воспользоваться нестатистическими методами расчета временных характеристик.

В работе рассматривается нестатистический подход к расчету временной задержки в системах управления, базирующийся на методе Network Calculus. Данный метод не является совершенно новым, однако до сих пор недостаточно изучен специалистами. При его применении для анализа вычислительных систем нужно учитывать некоторые особенности метода. Одной из них является недостаточная прозрачность соотнесения результатов, полученных посредством этого метода, результатами, полученными посредством классических (статистических) методов оценивания временных параметров в СУ. Кроме того, входные данные о системе, которые необходимы для расчетов с применением метода Network Calculus, в общем случае не заданы как «паспортные пара-



метры» системы и обрабатываемой в ней информации. Такими данными для метода, например, являются конверты потоков, кривые обслуживания, масштабирующие функции в случае неравномерного потока данных и др. Технические трудности метода известны и разработаны отдельные подходы, частично их разрешающие, например, [8, 10, 11, 19, 30]. Однако эти решения требуют также исходных данных о системе, которые на практике отсутствуют у пользователя или плохо формализуются, а методика расчета такого параметра Network Calculus, как минимальная кривая обслуживания для общего случая не разработана.

Поэтому в настоящей работе предложены методы расчета минимальной кривой обслуживания с использованием входного и выходного кумулятивного потока данных. Для специального случая системы управления с циклическим алгоритмом обработки информации приведена упрощенная формула для расчета системной кривой обслуживания, не требующая задания масштабирующих функций.

Нами исследовался вопрос соотношения результатов применения Network Calculus для расчета максимальной задержки с данными, полученными из статистического анализа выборок значения временной задержки. В частности, показано, что наиболее близкие результаты между максимальной задержкой в выборке данных и расчетом максимальной задержки с помощью Network Calculus получаются при условии, что распределение данных в выборке имеет единичные большие выбросы, что характерно для распределений с тяжелыми хвостами. Высказано предположение, что максимальная задержка связана с вероятностью возникновения редкого события – последовательного прихода значительного объема данных при низкой производительности сервера для минимальной кривой обслуживания.

Проделанная работа позволяет создать нестатистические методики оценки временных характеристик цифровых СУ с учетом особенностей их функционирования. Также она существенно расширяет область применения метода Network Calculus для расчета параметров систем управления.

За рамками работы оставлена проблема описания цепей обратной связи, что является характерной чертой системы управления. В Network Calculus разработан соответствующий математический

аппарат для этого [6, 31], однако его верификация для реальных систем недостаточна.

ЛИТЕРАТУРА

1. *On-line Monitoring of Instrumentation in Research Reactors / IAEA TECDOC Series.* – IAEA: Vienna. – No. 1830. – 2017. – 80 p.
2. *Golshani, G., Taylor, G., Pisica, I.* Simulation of Power System Substation Communications Architecture Based on IEC 61850 Standard // 2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). – 2014. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/UPEC.2014.6934745.
3. *Ahmad, Z., Durad, M.H.* Development of SCADA Simulator using Omnet++ // 2019 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST). – 2019. – P. 676–680. – DOI: 10.1109/IBCAST.2019.8667158.
4. *Chen, L., Zhang, K., Xia, Y., Hu, G.* Scheme Design and Real-Time Performance Analysis of Information Communication Network Used in Substation Area Backup Protection // 2012 Power Engineering and Automation Conference. – 2012. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/PEAM.2012.6612461.
5. *Zhang, Z., Huang, X., Keune, B., et al.* Modeling and Simulation of Data Flow for VLAN-Based Communication in Substations // IEEE Systems Journal. – 2017. – No. 4. – P. 2467–2478. – DOI: 10.1109/JSYST.2015.2428058.
6. *Le Boudec, J-Y., Thiran, P.* Network Calculus: A Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet. – Springer Verlag, Online Version of the Book, LNCS 2019. – 245 p.
7. *Schioler, H., Dalsgaard, J., Larsen, K., Jessen, J.* CyNC – a Method for Real Time Analysis of Systems with Cyclic Data Flows. // J. Embed. Comput. – 2006. – Vol. 2. – No. 3-4. – P. 347–360.
8. *Fidler, M., Schmitt, J.* On the Way to a Distributed Systems Calculus: An End-to-End Network Calculus with Data Scaling // SIGMETRICS Perform. Eval. Rev. – 2006. – Vol. 34. – No. 1. – P. 287–298. DOI: 10.1145/1140277.1140310.
9. *Промыслов В.Г.* Моделирование вычислительных систем с переменным потоком данных // Проблемы управления. – 2012. – № 1. – С. 62–70. [*Promyslov, V.G.* Simulation of Computer System with a Flow Alternation Between Components // Control Sciences. – 2012. – No. 1. – P. 62–70. (In Russian)]
10. *Bouillard, A., Thierry, É.* An Algorithmic Toolbox for Network Calculus // Discrete Event Dyn. Syst. – 2008. – Vol. 18. – P. 3–49. – DOI: 10.1007/s10626-007-0028-x.
11. *Bouillard, A., Jouhet, L., Thierry, E.* Comparison of Different Classes of Service Curves in Network Calculus // Proceedings of 10th International Workshop on Discrete Event Systems (WODES). – 2010. – P. 316–321.
12. *Бывайков М.Е., Жарко Е.Ф., Менгазетдинов Н.Э. и др.* Опыт проектирования и внедрения системы верхнего блочного уровня АСУ ТП АЭС // Автоматика и телемеханика. – 2006. – Т. 5. – С. 65–79. [*Byvaikov, M.E., Zharko, E.F., Mengazetdinov, N.E., et al.* Experience from Design and Application of the Top-Level System of the Process

- Control System of Nuclear Power-Plant // Automation and Remote Control. – 2006. – Vol. 67, no. 5. – P. 735–747.]
13. Ibrahim, W.Z., Sallam, H. Instrumentation and Controls Architectures in New NPPs // Int. J. of Nuclear Knowledge Management. – 2014. – Vol. 6. – P. 283–302. – DOI: 10.1504/IJNKM.2014.062830.
14. Cruz, R.L. A Calculus for Network Delay. Part I: Network Elements in Isolation // IEEE Trans. on Information Theory. – 1991. – Vol. 37. – P. 114–131.
15. Cruz, R.L. A Calculus for Network Delay. Part II: Network Analysis Information Theory // IEEE Trans. on Information Theory. – 1991. – Vol. 37. – P. 132–141.
16. Baccelli, F., Cohen, G., Olsder, G.J., Quadrat, J.-P. Synchronization and Linearity An Algebra for Discrete Event Systems (Wiley Series in Probability and Statistics). – N.-Y.: John Wiley & Sons, 1992. – 514 p.
17. Ahmadi, H., Marti, J. R., Moshref, A. Piecewise Linear Approximation of Generators Cost Functions Using Max-Affine Functions // Proceedings of 2013 IEEE Power Energy Society General Meeting. – 2013. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/PESMG.2013.6672353.
18. Camponogara, E., Nazari, L. Models and Algorithms for Optimal Piecewise-Linear Function Approximation // Mathematical Problems in Engineering. – 2015. – Vol. 2015. – P. 1–9. – Article ID: 876862. – DOI: 0.1155/2015/876862.
19. Байбулатов А.А., Промыслов В.Г. Аппроксимация огибающей в приложениях «Network calculus» // Проблемы управления. – 2016. – № 6. – С. 59–64. [Baybulatov, A.A., Promyslov, V.G. The Approximation of Envelope in «Network Calculus» Applications // Control Sciences. – 2016. – No. 6. – P. 59–64. (In Russian)]
20. Vapnik, V.N. Statistical Learning Theory. – N.-Y.: John Wiley. – 1998. – 768 p.
21. Baybulatov, A.A., Promyslov, V.G. Control System Availability Assessment via Maximum Delay Calculation // Proceedings of the 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Sochi: IEEE. – 2019. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8743012.
22. URL: <https://www.dropbox.com/s/zhohii8d9qfqrki/widetable2ru.xlsx?dl=0>.
23. URL: <https://www.dropbox.com/s/yurroijpayx6p38/Table2en.docx?dl=0>.
24. Крамер Г. Математические методы статистики. – М.: Мир. – 1975. [Kramer, G. Matematicheskie metody statistiki. – M.: Mir. – 1975. (In Russian)]
25. Fidler, M., Rizk, A., A Guide to the Stochastic Network Calculus // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2015. – Vol. 17. – No. 1. – DOI: 10.1109/COMST.2014.2337060.
26. RFC 793. Transmission Control Protocol. Protocol Specification, 1981. – <https://tools.ietf.org/html/rfc793>
27. Burnecki, K., Wylomanska, A., Chechkin, A. Discriminating between Light- and Heavy-Tailed Distributions with Limit Theorem // PLoS ONE – 2015. – 10(12): e0145604. – DOI: 10.1371/journal.pone.0145604.
28. ГОСТ 28195-89 Оценка качества программных средств. Общие положения. – М.: Издательство стандартов. – 1989. [GOST 28195-89 Otsenka kachestva programnykh sredstv. Obshchie polozheniya. – M.: Izdatel'stvo standartov. – 1989. (In Russian)]
29. Smith, M. Statistical Analysis Handbook. A Comprehensive Handbook of Statistical Concepts, Techniques and Software Tools – The Winchelsea Press, Edinburgh, UK. – 2018. – 638 p.
30. Promyslov, V. Using the Method of «Network Calculus» to Simulate the Computerized Control System with Non-Uniform Data Flow // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). – 2012. – Vol. 45. – Iss. 6. – P. 645–648. – DOI: 10.3182/20120523-3-RO-2023.00273.
31. Baybulatov, A., Promyslov, V. On a Deterministic Approach to Solving Industrial Control System Problems // 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russia. – 2020. – pp. 115–120. – DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208149.

Статья представлена к публикации членом редколлегии
В.М. Вишневым.

Поступила в редакцию 23.03.2021,
после доработки 15.06.2021.
Принята к публикации 22.06.2021.

Промыслов Виталий Георгиевич – канд. физ.-мат. наук,
✉ v1925@mail.ru,

Семенов Кирилл Валерьевич – канд. физ.-мат. наук,
✉ semenovkv@mail.ru,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва.



ESTIMATING TIME CHARACTERISTICS OF CONTROL SYSTEMS WITH CYCLIC OPERATION: A NETWORK CALCULUS APPROACH

V.G. Promyslov¹ and K.V. Semenov²

Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹✉ v1925@mail.ru, ²✉ semenovk@mail.ru

Abstract. The practical validation of time characteristics of digital control systems is considered. The delay in information processing and transmission often has a probability distribution differing from the Gaussian one. Therefore, the confidence intervals calculated under the Gaussian distribution assumption will be incorrect for such systems. The idea is to estimate the time characteristics of a control system using non-statistical time parameter estimation methods. As one of such methods, Network Calculus is considered. The practical implementation of Network Calculus to estimate the parameters of control systems, particularly its features, is discussed. One of the main features is imposing special restrictions on data flows and system performance, determined by flow envelopes and maximum (minimum) service curves. Generally, these characteristics are unknown in advance. Mathematical methods are proposed to estimate these characteristics under known input and output data flows in the system. As shown below, the calculation of characteristics is significantly simplified for systems with cyclic data processing algorithms, and the data transfer rate over the network is much higher than that on the computing components of the system. Simulations are carried out, and the system's time parameters estimated by Network Calculus are compared with the results of classical statistical estimation methods. As an illustrative example, the time parameters of one component of a real nuclear power plant instrumentation and control system are estimated using Network Calculus.

Keywords: system performance, time characteristics, digital control systems, Network Calculus, non-statistical estimation methods.

Funding. This work was supported in part by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 19-29-06044 (Sections 2 and 3).