

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ЗАДЕРЖЕК ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В СЕТЕВЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

Лепехин И.Ю., Голубев П.А.

РФЯЦ-ВНИИЭФ "НИИИС им. Ю.Е. Седакова", Россия, г. Нижний Новгород, Бокс № 486

ilepehin@niis.nnov.ru, pgolubev@niis.nnov.ru,

Промыслов В.Г., Семенов К.В.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова,

Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д.65

v1925@mail.ru, semenkovk@mail.ru

Аннотация В работе рассмотрена проблема измерения временных характеристик цифровой системы управления. В настоящее время система управления (СУ) промышленным процессом в индустриальных системах в большинстве случаев реализуется в виде распределенной по функциям и средствам цифровой системы с компонентами, представляющими собой совокупность аппаратных и программных средств, которые обеспечивают сбор, накопление, асинхронную обработку, представление и передачу информации. Частью испытаний системы является подтверждение ее временных характеристик с точки зрения, как быстродействия (времени обработки) данных в компонентах системы, так и времени (задержки) передачи данных между компонентами. Поэтому используются различные методы измерения временных характеристик. Методы измерения зависят как от внешних условий, например наличия опыта и принятой практики, так и свойств измеряемых величин. Нами исследовались основные статистические свойства временных характеристик типовой СУ для АЭС. Измерения проводились с применением встроенных и внешних программных агентов, для чего разработан тестовое программное обеспечение.

Ключевые слова: тестирование системы, временные характеристики, измерения, цифровые системы управления, статистика, циклические алгоритмы.

Введение

Современные автоматизированные 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 [1-4]. Для оценки временных характеристик СУ в частности используют симуляторы сетей на основе дискретной математики и имитационные модели [5,6]. Однако классические подходы встречают трудности применения на практике. Проблемы могут быть связаны с тем, что для имитационного моделирования требуется точное знание о моделируемой системе и необходимость воспроизведения ее сложной структуры; дискретные модели часто требуют задания статистических характеристик потоков между узлами системы. Однако статистические характеристики потоков в СУ не всегда известны или имеют сложный характер [3].

Задача оценки временных характеристик решалась нами как на модельных примерах СУ, так и на конкретном примере АСУ ТП АЭС [7]. Так как исследовалась СУ достаточно общего вида, и проблемы, с которыми сталкивались мы, также являются общими для разработчиков моделей СУ индустриальных систем, то мы считаем, что данный опыт может быть интересен другим исследователям и специалистам по индустриальным СУ.

1 Структура типовой системы управления технологическими процессами

1.1 Типовая структура взаимодействия компонентов в СУ

В работе будет рассматриваться типовая СУ для индустриального объекта (далее по тексту СУ). Исследуемая типовая структура СУ представлена на Рис. 1 и имеет три уровня.

- низовые контролеры и шлюзы — уровень G;
- серверы первичной обработки и хранения данных — уровень S;
- компоненты, обеспечивающие человеко-машинный интерфейс — уровень Z.

Архитектура обладает следующими свойствами:

К серверу могут быть подключены один и более компонентов уровней 1 и 3.

Каждый канал связи между компонентами разных уровней может быть резервирован (резервирование не показано на схеме).

Подобная структура СУ используется в различных приложениях для реальных объектов [1362,1361]. Алгоритмы обработки информации компонентов G, S, Z циклически.

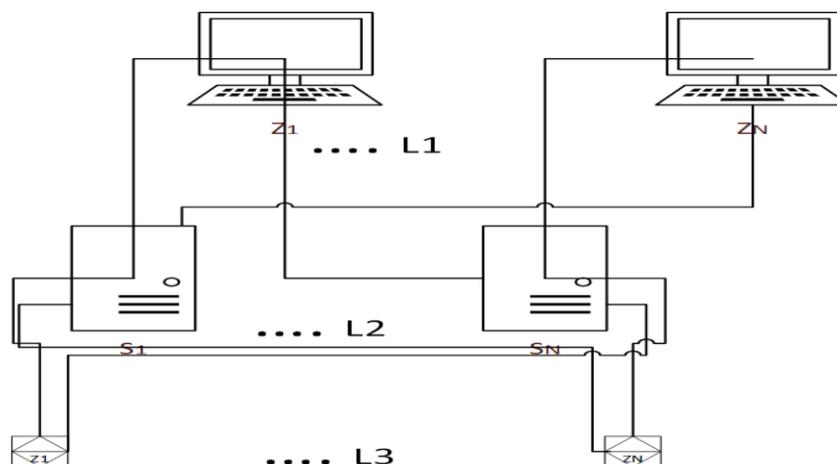


Рис. 1. Структурная схема исследуемой системы управления

1.2 Особенности обработки данных

В соответствии с практическими условиями эксплуатации СУ [7], на объекте, в элементах на уровнях G, S, Z, используются циклические алгоритмы обработки данных. Данные представляют собой значения сигналов о состоянии объекта управления и самой СУ.

Определение: Циклическим алгоритмом обработки данных назовем алгоритм, имеющий следующие свойства. В начале работы элемент системы находится в состоянии ожидания прихода данных. Затем последовательно поступающие пакеты данных обрабатываются по определенному единообразному алгоритму, после чего система приходит в исходное состояние.

Циклически обрабатываемые данные представлены в виде:

$$T_E,$$

где L_C - размер циклических данных, которые могут содержать поля заголовков, адресов, данных, контроля четности и так далее;

- количество циклических данных, поступающих в единицу времени;

D_C - это полное время задержки при передаче пакета, представляющее сумму задержки в сети (здесь и далее мы будем подразумевать сеть Ethernet) T_E и времени обработки на вычислительном ресурсе T_S . Задержки могут иметь внутреннюю структуру. Вклад различных компонентов в задержку обработки данных зависит от алгоритма функционирования программы. Компоненты и модели сетевой задержки хорошо исследованы в литературе [3]. Для наших целей мы рассматриваем обе задержки как атомарные величины.

В работе исследовались статистические свойства задержек T_S, T_E , напрямую влияющие на временные характеристики системы, и проблемы с их валидацией.

2 Методы измерения временных характеристик

Методы измерения сетевых задержек и задержек, связанных с обработкой информации, в общем случае различны, но в них можно выделить два типа [1]:

- Измерения с участием внешних наблюдателей;
- Измерения внешними по отношению к системе программными агентами;
- Измерения с применением встроенных в программу агентов.

Нами использовались все три типа средств измерений. В основном использовались внешние и встроенные программные агенты. Измерения с участием внешнего наблюдателя проводились для верификации и валидации программных средств измерений с помощью агентов.

Для тестирования временных характеристик было разработано специальное тестовое программное обеспечение, измеряющее время передачи сигналов от уровня G до их отображения на уровне Z. Сигнал – это пакет данных, который имеет свой уникальный идентификатор, и имеющий три обязательных атрибута: значение(V), метку времени (T) и метку достоверности (Q). Стоит отметить, что метка времени сигналу (T) присваивается при имитации на уровне G, там же ему задаются два остальных атрибута: V- значение и Q – достоверность. После поступления на уровень S, сигнал архивируется, включая все его атрибуты, и передаётся на уровень Z, где происходит его отображение.

Специальное тестовое программное обеспечение реализовано как внешний программный агент и состоит из трёх основных компонент:

- компонент, обеспечивающий конфигурацию имитаторов уровня G, создающих поток и имитации отдельно взятых сигналов. Данный компонент, во-первых, обеспечивает непрерывную имитацию различных потоков сигналов, переходящих друг в друга, соответствующих реальным потокам информации от исполнительных механизмов и датчиков объекта автоматизации во всех режимах его работы, включая переходные, а, во-вторых, создаёт краткосрочные “пиковые” нагрузки, имитирующие нештатные ситуации, например, срабатывание аварийных защит. Также на данном уровне осуществляется присвоение меток времени симитированным сигналам и меток времени поступления на уровень G команд, поданных с уровня Z;
- компонент, обеспечивающий измерение времени отображения информации на уровне Z, а также времени подачи команды с уровня Z. Для изменения времени отображения информации компонент Z определяет состояние элемента (цвет), отражающего технологический параметр или оборудование, и присваивает метку времени моменту его изменения;
- компонент управления, устанавливающийся на сервисном компьютере и обеспечивающий запуск компонента, установленного на уровне Z, подготовку конфигураций уровня G, поиск сигналов в архиве уровня S и получение их меток времени.

Получив конфигурацию от компонента управления, уровень G имитирует непрерывный поток сигналов, также с определённой периодичностью обеспечивается имитация отдельно взятого сигнала (обозначен меткой Sig на Рис.2), на примере которого и проводится измерение времени прохождения информации. После передачи конфигурации на уровень G основной задачей компонента управления является получение метки времени имитации сигнала, для чего вышеуказанный компонент непрерывно осуществляет поиск в архиве уровня S сигнала (Sig). Параллельно с вышеуказанными процессами, компонентом, установленный на уровне Z, проводится непрерывное сканирование дисплея РС и обеспечивается измерение метки времени T(Z) отображению сигнала (Sig). После получения компонентом управления T(Z) происходит вычисление времени прохождения Sig от уровня G до уровня Z по формуле:

где T(S)- время прохождения сигнала от уровня G до отображения на уровне Z, T(– метка времени отображения сигнала на уровне Z, T(G) - это метка времени имитации сигнала.

Схема функционирования тестового программного обеспечения в части измерения времени прохождения сигнала от уровня G до уровня Z приведена на Рис. 2.

Встроенные в систему на уровнях S, Z агенты использовались для тестирования времени обработки данных на отдельных компонентах.

Для проведения валидации с целью подтверждения корректности величин, получаемых с помощью тестового программного обеспечения, а также для подтверждения того, что тестовое программное обеспечения не оказывает существенного влияния на функционирования системы, был собран специальный технологический полигон, в состав которого входили компьютеры, имитирующие уровень G, а так же сервер астрономического точного времени, сервер (уровень S), рабочие станции оператора (уровень Z) из состава реальной СУ. Сервер времени использовался для синхронизации времени по протоколу NTP всех программно-технических средств испытательного полигона.

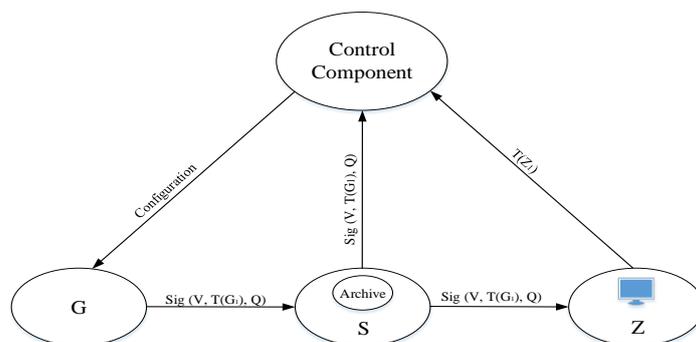


Рис. 2. Схема функционирования тестового программного обеспечения в части измерения времени прохождения сигнала от уровня G до уровня Z

В качестве внешнего наблюдателя использовалось средство видеофиксации, способное снимать видео с разрешением 60 кадров в секунду, использование средств с большей частотой было нецелесообразным, по причине того, что максимальная частота обновления информации на мониторах из состава рабочих станций оператора была 60 Гц.

Для независимой проверки был выбран следующий алгоритм:

- с помощью программного имитатора уровня G (который был предварительно верифицирован отдельно) имитировался сигнал, причём метка времени имитации сигнала, присваивалась ПО имитатора шлюза;
- на рабочей станции из состава реальной СУ запускалось штатное прикладное программное обеспечения, которое отображало сигналы, сымитированные на уровне G, и точное астрономическое время, которое СУ получала от операционной системы;
- запускалось средство видеофиксации, и с помощью программы имитатора уровня G автоматически в начале секунды проводилась имитация сигнала.

После выполнения вышеуказанных действий проводилось вычисление времени прохождения сигнала по следующей формуле:

$$60 - T(i)$$

где T это - время прохождения сигнала от уровня G до отображения на уровне Z, n- количество кадров, отснятое средством видеофиксации с момента начала секунды имитации, T(– время имитации сигнала на имитаторе уровня G (использовались только миллисекунды).

Измерения времени прохождения сигналов измерялись при одновременной имитации различных потоков сигналов, соответствующих определённым режимам работы объекта автоматизации.

После проведения измерений с помощью средств видеофиксации проводились измерения временных характеристик с помощью тестового программного обеспечения в идентичных условиях и вычислялись значения математического ожидания измеряемых величин, абсолютной и относительной погрешностей измерений.

В результате были получены следующие данные:

- абсолютная погрешность не превышала 3 мс;
- относительная погрешность измерений не превышала 0.3%.

3 Статистические характеристики задержек

Мы исследовали временные характеристики реальной системы [7] с архитектурой, представленной выше (Рис.2). В работе данные приведены только для одного компонента уровня Z, так как для остальных компонентов параметры аналогичны.

Измерения для величины времени прохождения сигнала от уровня G до Z в данной работе не приведены, но имеют аналогичные характеристики

3.1 Характеристики задержки при циклической обработке данных

Приведем результаты оценки максимального времени обработки данных в компоненте с циклическим алгоритмом функционирования.

Измерения проводились для компонент уровня Z (Рис.2). Объем обрабатываемых циклических данных сравнительно стабилен в нормальных режимах работы и имеет среднюю скорость. Однако

при некоторых особых (срабатывание защит и блокировок) или переходных (смена режимов) процессах объем данных и алгоритм (скорость) обработки могут значительно меняться.

На рисунке 3 приведена временная диаграмма циклов в нормальном режиме.

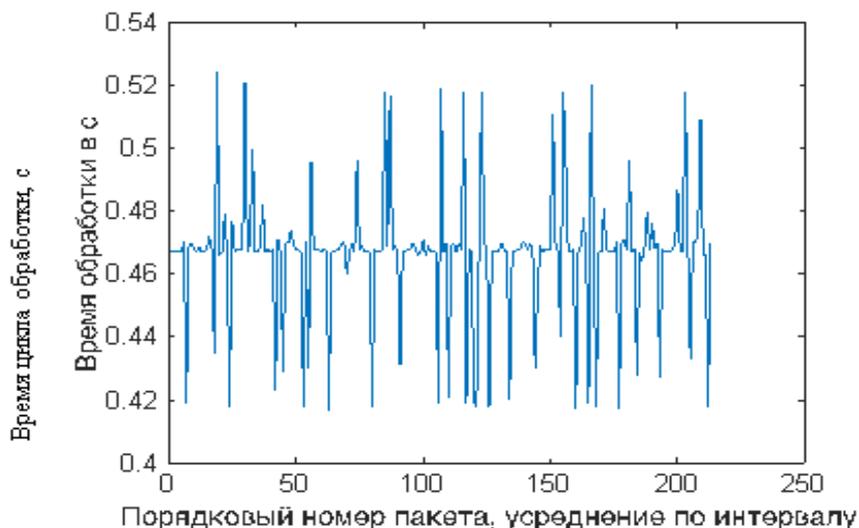


Рис. 3. Пример экспериментальной зависимости времени цикла обработки от номера пакета.

Эмпирическое распределение времени цикла T_S (Рис.4) очевидно отличается от нормального или пуассоновского и является многомодовым. Каждая из мод соответствует характерному циклу обработки для определенного вида данных.

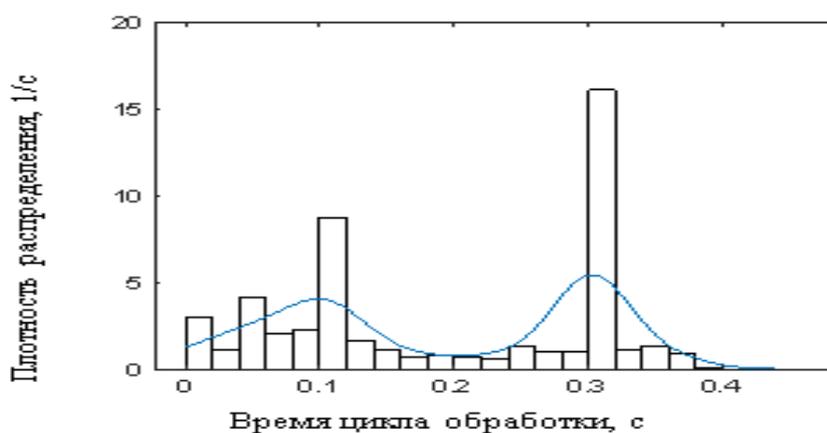


Рис.4. Эмпирическое распределение плотности вероятности времени цикла компонента Z

3.2 Характеристики задержки передачи данных по сети

Рассмотрим результаты измерений параметров сетевой задержки передачи данных между компонентами СУ. Для примера приведены данные прохождения сетевых пакетов между компонентами уровня S и уровнем Z. Все компоненты в рассматриваемом примере обмениваются данными по протоколу TCP/IP. Характеристики для процесса передачи данных между компонентами других уровней системы имеют сходный характер.

В эксперименте с помощью утилиты `tcpdump` из состава ОС измерялось время двойного прохождения TCP-пакета (round-trip time, RTT) — время, прошедшее с момента отправки пакета компонентом S до момента получения подтверждения (ACK) от компонента уровня Z. Измеренные значения RTT приведены на Рис.5.

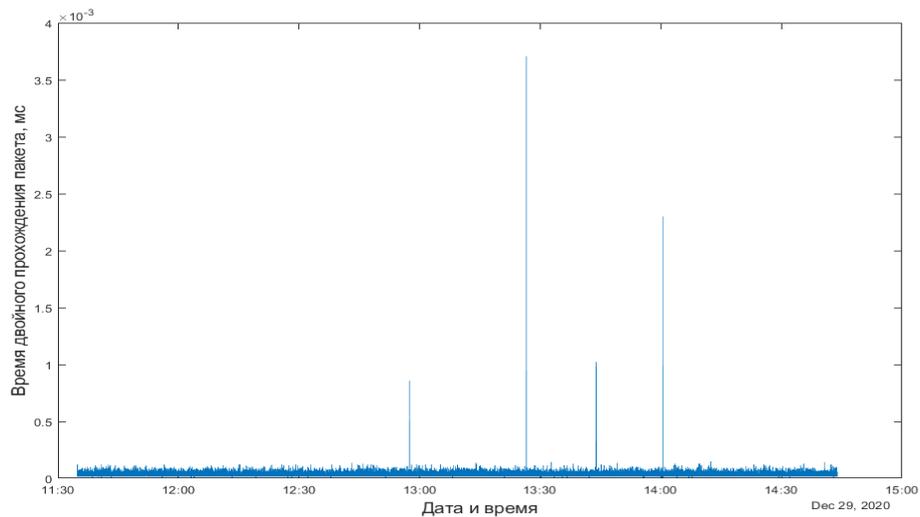


Рис.5. Время двойного прохождения пакета между компонентами *S* и *Z* в реальной СУ.

Типичное время двойного прохождения пакета составляет десятки микросекунд. В то же время, распределение RTT, где четко выделяются три характерных времени, существенно отличается от нормального распределения, характерного для физических процессов, или пуассоновского распределения, широко используемого в теории обслуживания (Рис. 6).

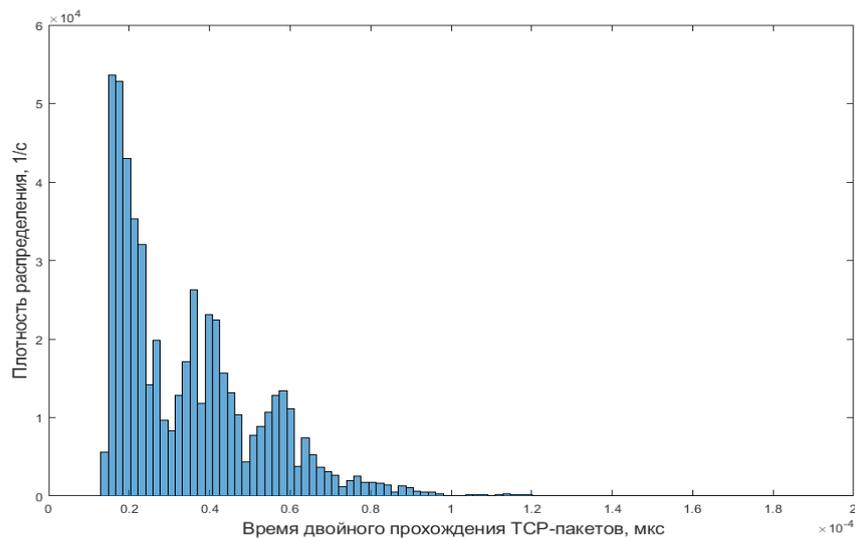


Рис.6. Эмпирическое распределение плотности вероятности для времени двойного прохождения TCP-пакета.

Заключение

В работе рассматриваются практические и теоретические задачи валидации временных характеристик цифровых автоматизированных систем управления (СУ).

Для решения практической задачи рассмотрены методы основанные как на внешнем по отношению к СУ устройств для измерения временных характеристик, так и с применение встроенных в прикладное и системное программное обеспечения агентов. Разработаны алгоритмы и тестовое программное обеспечения для измерения временных характеристик системы верхнего уровня АЭС. Программное обеспечение верифицировалось внешними инструментальными средствами.

Рассмотрены теоретические аспекты задачи подтверждения временных характеристик СУ. В требования по производительности СУ часто включаются:

- ограничения на время обработки в отдельных компонентах СУ,
- 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 задаётся ее доверительный интервал, либо в виде ограничений на абсолютные значения [4].

Оценивание случайной величины по выборке — классическая задача математической статистики, она давно и хорошо разработана и изложена в литературе (см., например, [6]). Однако интерпретация полученных оценок, распространяющая опыт работы с «обычными» измерениями физических величин на оценку временных характеристик цифровых систем управления, может привести к неверным выводам.

Сформулируем основные проблемы.

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 означают, что функция распределения изначально не является в строгом смысле функцией распределения нормальной случайной величины.

Проведённые измерения времени прохождения сигнала и обработки его на компонентах с применением встроенных и внешних программных агентов показали, что распределения существенно отличаются от нормального.

Процедура подтверждения требований в основном базируется на значении выборочного среднего и выборочной дисперсии [2]. При условии, что случайная величина имеет конечное математическое ожидание и дисперсию, выборочное среднее является несмещённой состоятельной оценкой теоретического среднего и не зависит от вида распределения. Его известным недостатком [10] является низкая робастность в случае наличия посторонних выбросов в выборке. Выборочная дисперсия, как смещенная, так и несмещенная, также является состоятельной оценкой теоретической дисперсии величины.

Если бы случайная величина имела нормальное распределение, то имея выборочное среднее и дисперсию, несложно точно оценить доверительный интервал для подтверждаемого параметра. Однако, как показано ранее, функции распределения задержки в СУ в общем случае не являются нормальной поэтому интуитивно, перенося оценки доверительных интервалов для нормально распределенной величины, на случай временных задержек в системах управления, получают ложные результаты.

В общем случае для оценки вероятности превышения случайной величиной некоторого значения можно воспользоваться неравенством Чебышева, но оно дает очень грубую оценку. Поэтому при оценке временных параметров необходимо исследовать функцию распределения и при необходимости использовать соответствующие статистические методы оценки для данного класса распределений. Также можно применять детерминированные методы оценки временных параметров, например, использовать метод Network Calculus [9]. Network calculus предлагает удобную методику расчета времени прохождения сигналов (задержек) в цифровых потоковых сетях. Основные понятия, необходимые для решения этой задачи, следующие: рассмотрим систему без потерь как черный ящик. Входящий и выходящий потоки моделируются кумулятивными функциями, т.е. суммарным количеством данных, наблюдаемых на входе и на выходе за определенный интервал времени. Время прохождения сигнала (задержка) определяется как горизонтальное отклонение между этими функциями. Максимальное значение времени прохождения сигнала может быть вычислено с помощью соответствующих ограничений, а не фактических кумулятивных функций. Для этой цели используется верхняя граница или огибающая входящего потока и нижняя граница или минимальная функция обслуживания. При этом максимальное время прохождения сигнала равно горизонтальному отклонению между этими ограничениями. Данный метод успешно применялся для расчета временных характеристик современных систем управления [11, 12].

Литература

1. Raj Jain. Art of Computer Systems Performance Analysis Techniques For Experimental Design Measurements Simulation And Modeling. Wiley Computer Publishing, John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 0471503363 1991
2. IAEA TECDOC No. 1830 On-line Monitoring of Instrumentation in Research Reactors 978-92-0-108517-7 2017.
3. Topor-Kaminski T., Żurkowski, R. Grygiel, M. (2011). Selected Methods of Measuring the Delay in Data

- Transmission Systems with Wireless Network Interfaces. Acta Physica Polonica A. 120. 10.12693/APhysPolA.120.748.
4. ГОСТ 28195-89 Оценка качества программных средств. Общие положения. 1989.
 5. *Ahmad Z., Durad M. H.* Development of SCADA Simulator using Omnet++ // 2019 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST), Islamabad, Pakistan, 2019, pp. 676-680, doi: 10.1109/IBCAST.2019.8667158.
 6. *Golshani G., Taylor G., and Pisica I.* Simulation of power system substation communications architecture based on IEC 61850 standard // 2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2014, pp. 1-6.
 7. *Бывайков М.Е., Жарко Е.Ф., Менгазетдинов Н.Э., Полетыкин А.Г., Прангишвили И.В., Промыслов В.Г.* Опыт проектирования и внедрения системы верхнего блочного уровня АСУ ТП АЭС // Автоматика и телемеханика. 2006. Т. 5. с. 65-79.
 8. *Burnecki K., Wylomanska A., Chechkin A.* (2015) Discriminating between Light- and Heavy-Tailed Distributions with Limit Theorem. PLoS ONE 10(12): e0145604. doi:10.1371/journal.pone.0145604 2015
 9. *Le Boudec, J-Y., Thiran, P.* (2019). Network Calculus: A Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet, Springer Verlag, Online Version of the Book, LNCS 2019.
 10. *Smith M.* Statistical Analysis Handbook A Comprehensive Handbook of Statistical Concepts, Techniques and Software Tools Copyright © 2015-2018 All Rights reserved. 2018 Edition. Issue version: 2018-1
 11. *Масолкин С.И., Промыслов В.Г.* Расчет некоторых параметров промышленной вычислительной сети объектов повышенного риска эксплуатации на примере АСУТП АЭС // Проблемы управления. 2010.с53.
 12. *Baybulatov A. and 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.