

ПРОБЛЕМЫ ВАЛИДАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК В ЦИФРОВЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ⁵⁷

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 рассмотрен метод подтверждения (валидации) временных характеристик цифровой системы управления. Приведена типичная структура трехуровневой промышленной системы управления, основанная на циклическом алгоритме обработки информации. Для такой структуры разработан подход оценки временных параметров основанный на методе Network Calculus. Для случая, когда можно пренебречь временем пересылки данных по сравнению с временем их обработки на компонентах системы, данный подход позволяет получить простые формулы для оценки времени задержки обработки данных в системе.

Ключевые слова тестирование системы, временные характеристики, цифровые системы управления, Network Calculus, нестатистические методы, 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 [1-3]. Для оценки временных характеристик СУ используют симуляторы сетей на основе дискретной математики и имитационные модели [5-7]. 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 [8].

В качестве одной из альтернатив при расчете характеристик потоков данных между компонентами компьютерных сетей применяется нестатистический метод анализа детерминированных систем Network Calculus [9]. 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 заключается в использовании специфических функций: огибающей (конверта) потока входных и выходных данных и кривых обслуживания — для расчета характеристик системы, к которым, прежде всего, относится задержка прохождения данных и параметры буферизации.

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 (СУ), вообще говоря, к таковым не относятся, т.к. 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).

⁵⁷ Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-06044, гл. 2.

Нельзя сказать, что данные особенности не рассматривались в контексте Network Calculus. В работе [10] метод расширен на системы с циклическими зависимостями между входными и выходными потоками компонентов. В работах [11, 12] приведены подходы, позволяющие использовать Network Calculus в системах с существенным изменением соотношения объема входного и выходного потока. В работах [13, 14] рассмотрены различные методы описания дисциплин совместной обработки нескольких задач на одном вычислительном ресурсе.

Указанные подходы имеют общие недостатки. Во-первых, их применение требует точного знания внутренних особенностей функционирования системы, и, будучи привязаны к ним, они чувствительны к любому изменению режимов работы системы. Во-вторых, 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 данной работе мы при построении модели системы постарались, с одной стороны, сохранить общность и прозрачность результатов, но с другой — отразить неравномерность потока входных и выходных данных и зависимость алгоритма обработки данных от содержащейся в них информации.

Задача решалась как на модельных примерах СУ, так и на конкретном примере АСУ ТП АЭС [15]. Так как исследовалась СУ достаточно общего вида, и проблемы, с которыми сталкивались мы, также являются общими для разработчиков моделей СУ промышленных систем, то мы считаем, что 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 СУ

В работе будет рассматриваться типовая СУ для промышленного объекта (далее по тексту СУ).

Исследуемая типовая структура СУ представлена Рис. 1. Подобная структура СУ используется в различных приложениях для реальных объектов [15, 16]. На рисунке выделено три уровня:

- низовые контролеры и шлюзы — уровень G (1);
- серверы первичной обработки и хранения данных — уровень S (2);
- компоненты, обеспечивающие человеко-машинный интерфейс — уровень Z (3).

Архитектура обладает следующими 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 цикличны.

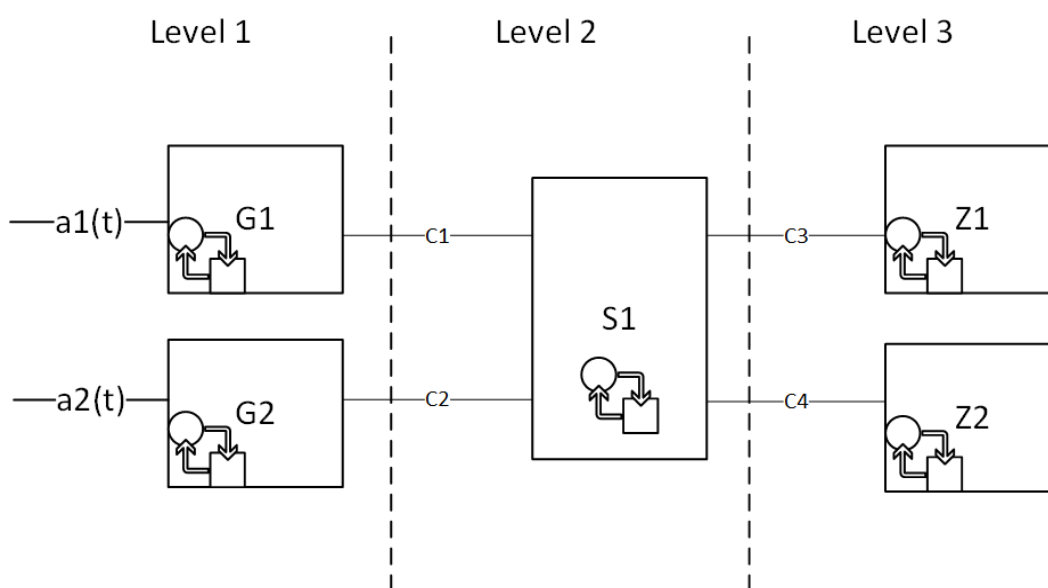


Рис. 1. Структурная схема исследуемой системы управления

1.2 Особенности обработки данных

В соответствии с практическими условиями эксплуатации СУ [15], на объекте в элементах разных уровней системы используются 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. Циклическим алгоритмом обработки данных назовем алгоритм, имеющий следующие свойства. В начале работы элемент системы находится в состоянии ожидания прихода данных. Последовательно поступающие пакеты данных обрабатываются по определенному единообразному алгоритму, после чего система приходит в исходное 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 Описание типовой системы управления в модели Network Calculus

Рассмотрим задачу описания СУ в модели Network Calculus на примере типовой СУ. Дополнительно сделаем предположение о наличии избыточной вычислительной мощности в СУ, что позволяет декомпозировать систему и рассматривать каждый логический канал системы по отдельности. Если это условие не выполняется, необходимо учитывать взаимное влияние различных каналов обработки друг на друга, используя, например, одну из возможных моделей планировщиков задач [14].

В СУ (Рис. 1) рассмотрим отдельно взятый канал управления, изображенный на рисунке 2. В модели канала каждый компонент СУ характеризуется собственной максимальной и минимальной кривой обслуживания. Как следует из определений минимальной и максимальной [9] кривых обслуживания выводы и уравнения для максимальной кривой 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 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 рисунке 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^* соответственно.

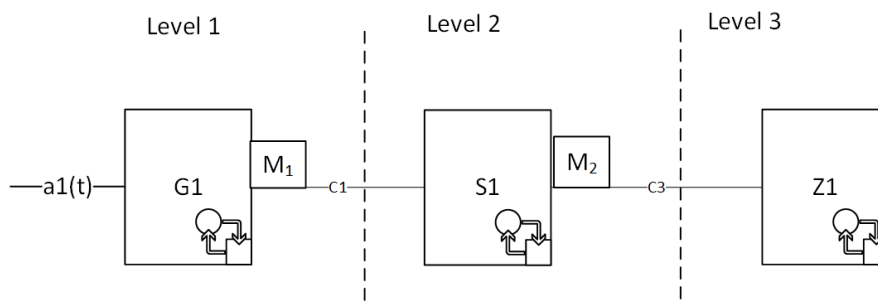


Рис. 2. Выделенный в СУ логический канал передачи $i1$

Тогда, в соответствии с определением минимальной функции обслуживания, 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 (Рис. 2) введены масштабирующая функция M и обратная ей функция M^{-1} , обеспечивающие преобразование

$M: A^* \rightarrow A$ и $M^{-1}: A \rightarrow A^*$ [11]. В этом случае кривая обслуживания системы β_{Si} для i -ого канала с учетом масштабирующих функций выражается в виде:

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

где $i, k, l, m, \in \mathbb{N}$ — номера последовательно соединенных компонент в логическом канале обработки данных на каждом из уровней СУ; $n1, n1 \in \mathbb{N}$ — 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 (1) 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 $ai(t)$, $i \in \mathbb{N}$. Однако на практике расчет масштабирующих функций M реальной системы — трудная и не всегда разрешимая задача.

Для того чтобы избежать трудностей с определением функций масштабирования, для систем с циклическим потоком данных мы 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 следующую функцию:

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

где j — номер цикла, а τ_j — длительность цикла j . Далее введем на интервале $[0, +\infty)$ функцию $Q(x)$:

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

Ступенчатая функция $Q(x)$ является в соответствии с определением (см.[9]) функцией потока.

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

$$Q^*(x) = \begin{cases} Q(x-1), x \in [1, +\infty) \\ 0, x \in [0, 1) \end{cases}, \quad (2)$$

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

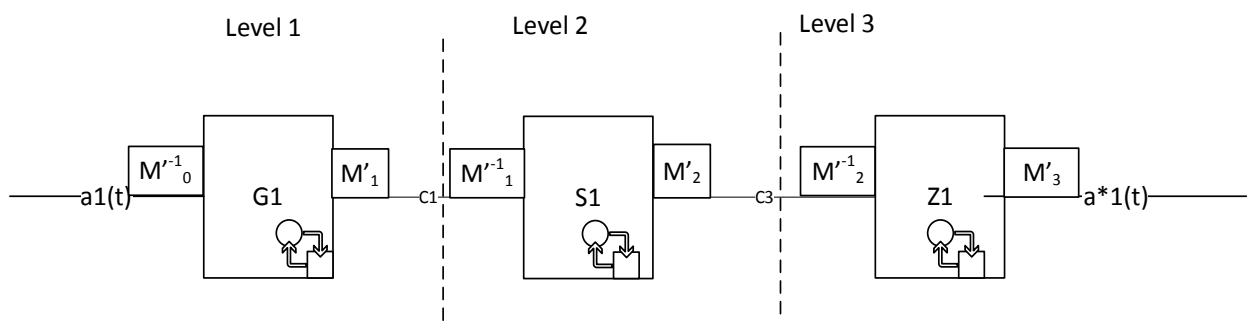


Рис. 3. Выделенный в СУ логический канал передачи $i1$

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

$$Q^* \geq Q \otimes \beta$$

$$Q^* \leq Q \otimes \gamma$$

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 функция обслуживания для системы, изображенной на рисунке 2, будет иметь вид:

$$\beta_{Si} = \beta_{Gk} \otimes M_1' \otimes \beta_{Cn1} \otimes M_1^{-1'} \otimes \beta_{S1} \otimes M_2' \otimes \beta_{Cn2} \otimes M_2^{-1'} \otimes \beta_{Zm}. \quad (3)$$

В свою очередь, уравнение (3) может быть приведено (см. [11] раздел 5.1) к более удобному виду переносом масштабирующих функций M' со входа на выход компонента и сокращения пары $M', M^{-1'}$ на выходе компонента:

$$\beta_{Si} = \beta_{Gk} \otimes M_1^{-1'}(\beta_{Cn1}) \otimes \beta_{S1} \otimes M_2^{-1'}(\beta_{Cn2}) \otimes \beta_{Zm}. \quad (4)$$

Частичный переход от потоков данных Δ к циклам ρ в уравнении (3) и (4) в целом не упрощает работу с масштабирующими функциями, однако при условии:

$$\beta_{Ci} \gg \beta_{\{G,S,Z\}i} \quad (5)$$

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, [9]).

Для монотонной масштабирующей функции сетевого компонента $M^{-1'}(\delta(t)) \rightarrow \delta(n), n \in N$, появляется возможность опустить β_{Ci} из уравнения (4) и соответственно избавиться от масштабирующих функций. Физически допущение (5) 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 (3) для i -ой цепочки для «вторичного» потока упрощается:

$$\beta_{Si} = \beta_{Gk} \otimes \beta_{S1} \otimes \beta_{Zm}. \quad (6)$$

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 при его помощи результатов, его особенностью является то, что в вычислениях применяются нестандартные характеристики исследуемых величин: конверт потока и кривая 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.

Заключение

В работе рассматривается нестатистический подход к расчету временной задержки в системах управления, базирующийся на методе Network Calculus. Метод Network Calculus 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 этим методом, с классическими (статистическим) методами оценивания временных параметров в СУ. Кроме того, входные данные о системе, которые необходимы для расчётов с применением метода Network Calculus, в общем случае не заданы как «паспортные параметры» 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, [11-14 17, 18]. 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.

В нашей работе рассмотрен специальный, хотя и весьма распространенный случай системы управления с циклическим алгоритмом обработки информации. Для рассмотренного вида систем приведена упрощенная формула расчета системной кривой обслуживания, не требующая задания масштабирующих функций.

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 [9, 19], однако его верификация для реальных систем недостаточна.

Литература

1. МАГАТЭ. On-line Monitoring of Instrumentation in Research Reactors. IAEA TECDOC Series. – Vienna: IAEA, 2017. – No. 1830. – 80 с.
2. Almes G., Kalidindi S., Zekauskas M., Morton A. A One-way Delay Metric for IP Performance Metrics. – RFC 7679, Tech. Rep., 2016. – <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7679>
3. Nguyen H., Begim T., Busson A., Lassous I. G. Approximating the end-to-end delay using local measurements: A preliminary study based on conditional expectation // 2016 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC), 2016. – P. 1-6. – doi: 10.1109/ISNCC.2016.7746061.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Zhang Z., Huang X., Keune B., Cao Y., 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.
8. Yang, Y., Huang, P., Peng, Q. et al. Statistical delay distribution analysis on high-speed railway trains. J. Mod. Transport. 27, 188–197 (2019). <https://doi.org/10.1007/s40534-019-0188-z>
9. 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 – 2019 – 245 p.
10. 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.
11. 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.
12. Промыслов В.Г. Моделирование вычислительных систем с переменным потоком данных // Проблемы управления. – 2012. – №1. – С. 62-70.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Байбулатов А.А., Промыслов В.Г. Аппроксимация огибающей в приложениях «Network calculus» // Проблемы управления. – 2016. – № 6. – С. 59-64.
18. 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.
19. 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.