

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ БУФЕРИЗАЦИИ ДАННЫХ НА КАЧЕСТВО УПРАВЛЕНИЯ В СЕТЕВЫХ СИСТЕМАХ

И. А. Авцинов¹, А. Е. Емельянов¹, М. Н. Ивлиев²

*Кафедры: информационных и управляющих систем (1);
высшей математики и информационных технологий (2),
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет
инженерных технологий», г. Воронеж, Россия; max1m@mail.ru*

Ключевые слова: вероятность передачи данных; дискретный регулятор; контроллер; сетевая система управления; сетевой канал; система управления; такт квантования.

Аннотация: Проведено имитационное моделирование системы управления с сетевым каналом передачи информации. Исследовано влияние процесса буферизации данных на качество управления для систем с бесконечно большим буфером. Моделирование функционирования цифровой и сетевых систем управления проводилось в среде Simulink системы MATLAB. Сделан вывод, что несмотря на наличие бесконечно большого буфера в цифровой системе управления может накапливаться запаздывание, приводящее к потере устойчивости системы в целом.

Значительное число научных работ посвящено анализу, моделированию и синтезу технических систем с вероятностными каналами передачи данных [1 – 5]. Как правило, в качестве таких каналов выступают цифровые сети (промышленные и общедоступные), по которым информация передается в виде пакетов данных [6 – 8]. Данные каналы передачи получили название сетевых, а системы – *сетевые системы управления* (Networked Control System – NCS) [9, 10]. Применение сетевых каналов в системах управления имеет ряд преимуществ: снижение затрат на монтажные работы, упрощенное конфигурирование системы, простота диагностики и обслуживания. Однако использование таких каналов передачи создает и ряд новых проблем, игнорирование которых может привести к потере устойчивости системы управления: случайная временная задержка в процессе передачи, вероятная потеря пакета данных, возможность асинхронной работы элементов системы.

Традиционный подход к синтезу таких систем не позволяет решить данные проблемы, так как анализ систем управления с сетевыми каналами передачи информации требует использования методов и подходов как теории управления, так и теории связи, что значительно усложняет анализ, моделирование и синтез таких систем управления [10].

В работе проведено исследование влияния буферизации данных на качество управления для систем с бесконечно большим буфером.

На рисунке 1 представлена схема системы управления с сетевым каналом связи и буферами для пакетов данных.

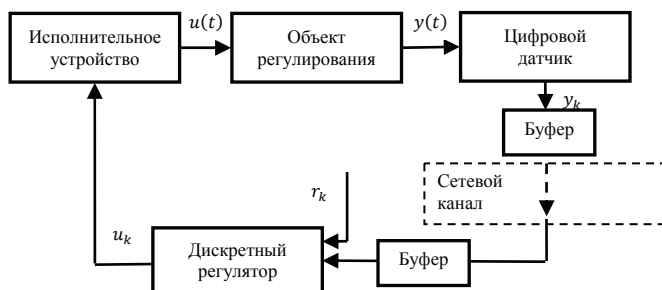


Рис. 1. Система управления с сетевым каналом связи и буферами для пакетов данных

Система работает следующим образом. Цифровой датчик считывает выходной сигнал объекта регулирования $y(t)$ в моменты времени $t = kT_0$, где T_0 – такт квантования цифровым датчиком выхода объекта регулирования.

Если канал «открыт», то цифровой датчик сразу передает данные $y(kT_0)$ на контроллер; если канал «закрыт», то есть передача данных по нему в течение такта квантования T_0 невозможна, то пакет данных помещается в буфер. Таким образом, если канал будет «закрыт» продолжительное время в течение нескольких тактов квантования T_0 , то в буфере датчика будет находиться соответствующее количество пакетов данных. Будем считать, что как только сетевой канал будет «открыт», то есть передача данных по нему станет возможной, все пакеты данных из буфера датчика будут перемещены в буфер контроллера. Контроллер последовательно обрабатывает поступающие данные от датчика: в момент времени $t = kT_0$ обрабатывается только один пакет данных, который поступил первым, остальные находятся в очереди. Объемы буферов датчика и контроллера считаются неограниченными. Предполагается, что датчик и контроллер работают синхронно: квантование датчика и контроллера осуществляется с одинаковым тактом квантования T_0 в один и тот же момент времени $t = kT_0$.

Контроллер вырабатывает регулирующее воздействие $u(kT_0)$ по определенному закону с учетом задающего воздействия $r(kT_0)$ и полученных данных от датчика $y(kT_0)$. Регулирующее воздействие $u(kT_0)$ передается на исполнительное устройство в моменты времени $t = kT_0$. Регулирующее воздействие $u(t)$ реализуется исполнительным устройством на объекте регулирования.

В дальнейшем дискретные переменные $y(kT_0)$, $u(kT_0)$, $r(kT_0)$ и др. для упрощения записи будем представлять в виде: y_k, u_k, r_k .

Для простоты считаем, что характеристики цифрового датчика и исполнительного устройства не влияют на процесс регулирования системы. Поэтому примем, что цифровой датчик и исполнительное устройство соответствуют безынерционным элементам с единичным коэффициентом усиления. В качестве объекта регулирования выбран двигатель постоянного тока (сервопривод); в качестве контроллера – дискретный ПИД-регулятор. Имитационное моделирование функционирования цифровой системы управления проведено в среде Simulink системы MATLAB.

Для характеристики функционирования системы введем несколько определений. Сетевой канал является «закрытым», если передача данных по нему в течение такта квантования T_0 невозможна, и «открытым» – если передача данных в течение T_0 возможна. Запоздыванием в сетевом канале передачи данных назы-

вается промежуток времени, в течение которого передача данных по нему невозможна. По сути, запаздывание в сетевом канале передачи данных – это время, в течение которого канал является «закрытым». Запаздыванием в системе управления называется промежуток времени с момента формирования пакета данных в цифровом датчике до момента его переработки в дискретном регуляторе. Очевидно, что запаздывание в системе управления складывается из времени ожидания пакета данных в буферах цифрового датчика и дискретного регулятора до момента его обработки. Информационным потоком системы управления с сетевыми каналами связи называется поток данных, поступающих непосредственно на обработку от одних элементов системы к другим. При этом поступившие данные могут некоторое время находиться в буфере, ожидая своей очереди обработки элементом системы. Разрывом информационного потока называется событие, состоящее в том, что дискретный регулятор не имеет данных от цифрового датчика для выработки регулирующего воздействия. Временем разрыва информационного потока называется промежуток времени, в течение которого наблюдался разрыв информационного потока в системе управления. Система управления с сетевыми каналами связи является замкнутой, если в ней не наблюдается разрыва информационного потока; в противном случае система считается разомкнутой.

Таким образом, в процессе функционирования цифровой системы управления может возникнуть следующая ситуация: сетевой канал передачи данных «закрыт», но в свете введенного выше определения система управления будет считаться замкнутой, а информационный поток – непрерывным, если в буфере дискретного регулятора будут данные от цифрового датчика, которые еще не были обработаны.

В некоторый момент времени в системе может сложиться следующая ситуация:

- сетевой канал «закрыт»;
- буфер регулятора пуст;
- буфер датчика содержит пакеты данных от цифрового датчика.

При этом на следующем такте квантования:

- новые данные от цифрового датчика будут помещены в буфер датчика;
- регулятор для выработки регулирующего воздействия будет использовать последние полученные данные от цифрового датчика, которые были уже использованы.

Рассмотренный выше случай функционирования системы управления с сетевым каналом связи приводит к разрыву информационного потока, в результате время запаздывания в системе увеличится на время разрыва информационного потока.

Когда сетевой канал «открывается», то пакеты данных из буфера цифрового датчика в течение такта квантования T_0 перемещаются в буфер дискретного регулятора.

Анализ функционирования такой системы показывает, что разрыв информационного потока наблюдается, когда текущее время запаздывания в сетевом канале передачи данных становится больше времени запаздывания в системе управления, которое наблюдалось до этого момента времени. Другими словами, разрыв информационного потока наблюдается в том случае, когда число последовательных тактов квантования T_0 , в течение которых сетевой канал находится в состоянии «закрыт», превышает максимальное число аналогичных тактов, наблюдавшихся до этого момента времени.

На рисунке 2 представлена схема моделирования рассматриваемой системы, предусматривающая следующие устройства:

- 1) модуль формирования дискретного случайного процесса ξ_k «закрытия–открытия» сетевого канала.

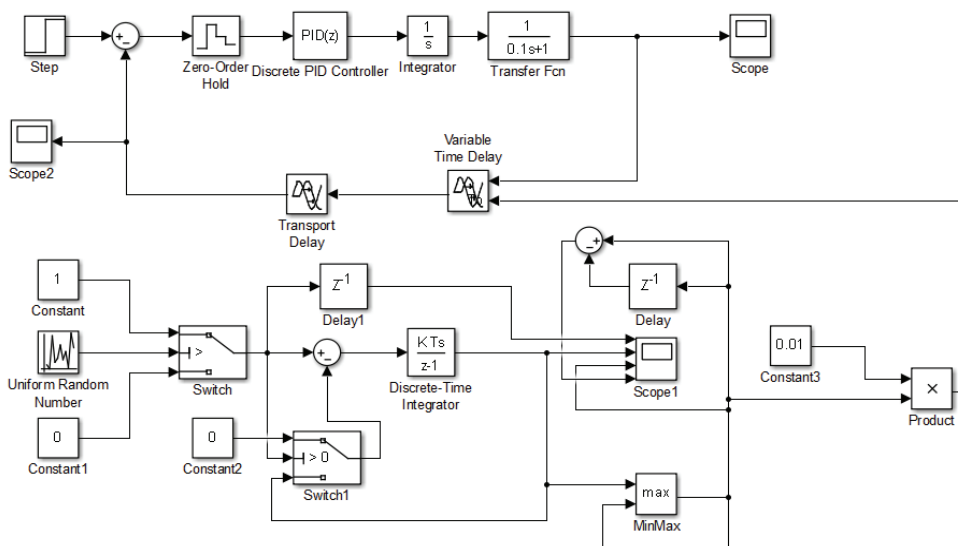


Рис. 2. Схема моделирования системы управления с бесконечно большим буфером

С этой целью в системе используется блок формирования случайного числа, имеющего равномерное распределение. Вероятность p задается путем установки соответствующего значения в управляемом переключателе Switch

$$\xi_k = \xi(kT_0) = \begin{cases} 1, & \text{канал закрыт – вероятность } p; \\ 0, & \text{канал открыт – вероятность } q = 1 - p; \end{cases}$$

2) модуль формирования числового значения времени закрытия канала передачи в тактах квантования.

В данном случае формируется дискретный случайный процесс

$$\varepsilon_{k+1} = (\varepsilon_k + 1)\xi_k,$$

где ε_k – число последовательных тактов квантования «закрытия» сетевого канала на момент времени $t = kT_0$.

Для реализации данного случайного процесса используется интегрирующий блок. Пока $\xi_k = 1$, выход интегратора возрастает; если $\xi_k = 0$, то выход интегратора обнуляется. Условие такого перехода задается в управляемом переключателе Switch;

3) модуль формирования максимального значения времени «закрытия» сетевого канала в тактах квантования за время работы системы управления.

С этой целью формируется дискретный случайный процесс

$$\varepsilon_{k+1}^{\max} = \varepsilon_{k+1} \cdot 1[\varepsilon_{k+1} - \varepsilon_k^{\max}] + \varepsilon_k^{\max} (1 - 1[\varepsilon_{k+1} - \varepsilon_k^{\max}]),$$

где ε_k^{\max} – максимальное значение времени «закрытия» сетевого канала в тактах квантования на момент времени $t = kT_0$; $1[\varepsilon_{k+1} - \varepsilon_k^{\max}]$ – единичная функция (значение 1, если $\varepsilon_{k+1} \geq \varepsilon_k^{\max}$, в противном случае – 0).

Для реализации данного случайного процесса используется блок MinMax. С этой целью формируется дискретный случайный процесс

$$z_k^p = \varepsilon_k^{\max} - \varepsilon_{k-1}^{\max}.$$

В момент, когда наступает разрыв информационного потока, $z_k^p = 1$ и это значение удерживается в течение всего времени разрыва.

Функционирование рассматриваемой системы управления моделируется следующим образом.

1. В цепи обратной связи имеются два элемента временной задержки: Transport Delay – предназначен для моделирования запаздывания на 1 такт квантования T_0 , что связано с особенностями сетевой системы управления; Variable Time Delay – для моделирования временной задержки, определяемой числом пакетов данных в буфере элементов системы.

2. В случае, если в системе не наблюдается разрыв информационного потока, система работает с постоянным запаздыванием в цепи обратной связи; если же разрыв есть, то значение запаздывания в блоке Variable Time Delay увеличивается как раз на это время.

3. В течение разрыва информационного потока система работает в разомкнутом состоянии; после окончания разрыва система работает с новым значением запаздывания в цепи обратной связи.

На рисунке 3, а, показан переходной процесс рассматриваемой системы управления при вероятности «закрытия» канала $P = 0,6$ и времени такта квантования $T_0 = 0,01$ с. Очевидно, что в этом случае система управления является неустойчивой – с течением времени амплитуда колебаний выходной величины объекта управления увеличивается.

Рисунок 3, в, дает информацию о работе системы в течение времени переходного процесса. Показано, в какие моменты канал находится в «открытом» состоянии, в какие – «закрытом»; как изменяется число тактов «закрытия» канала; в какие моменты времени имеется разрыв информационного потока системы. С течением времени запаздывание в системе управления, определяемое максимальным числом тактов «закрытия» канала или суммарным временем разрыва информационного потока, растет.

На рисунках 3, б, г, показаны соответственно переходной процесс и информация о работе рассматриваемой системы управления при вероятности «закрытия» канала $P = 0,4$ и времени такта квантования $T_0 = 0,01$ с. Из рисунка 3, б, можно заключить, что на данном отрезке времени система управления ведет себя как устойчивая: с течением времени амплитуда колебаний выходной величины систем уменьшается.

Однако если рассматривать более длительный промежуток времени (см. рис. 3, д), то можно увидеть, что с этими же параметрами система является неустойчивой: затухание колебаний с течением времени заканчивается, и амплитуда колебаний начинает увеличиваться. Следует отметить, что запаздывание в системе управления, как это видно из рис. 3, ж, по сравнению с рис. 3, г, не изменилось с увеличением времени переходного процесса.

На рисунке 3, е, показан переходной процесс, – рис. 3, и, – информация о работе рассматриваемой системы управления при вероятности «закрытия» канала $P = 0,2$ и времени такта квантования $T_0 = 0,01$ с. Из рисунка 3, е, следует, что на данном отрезке времени система управления ведет себя как устойчивая. Однако, как было установлено ранее для данной системы, с течением времени запаздывание в системе управления будет только увеличиваться, поэтому, рано или поздно, рассматриваемая система потеряет устойчивость.

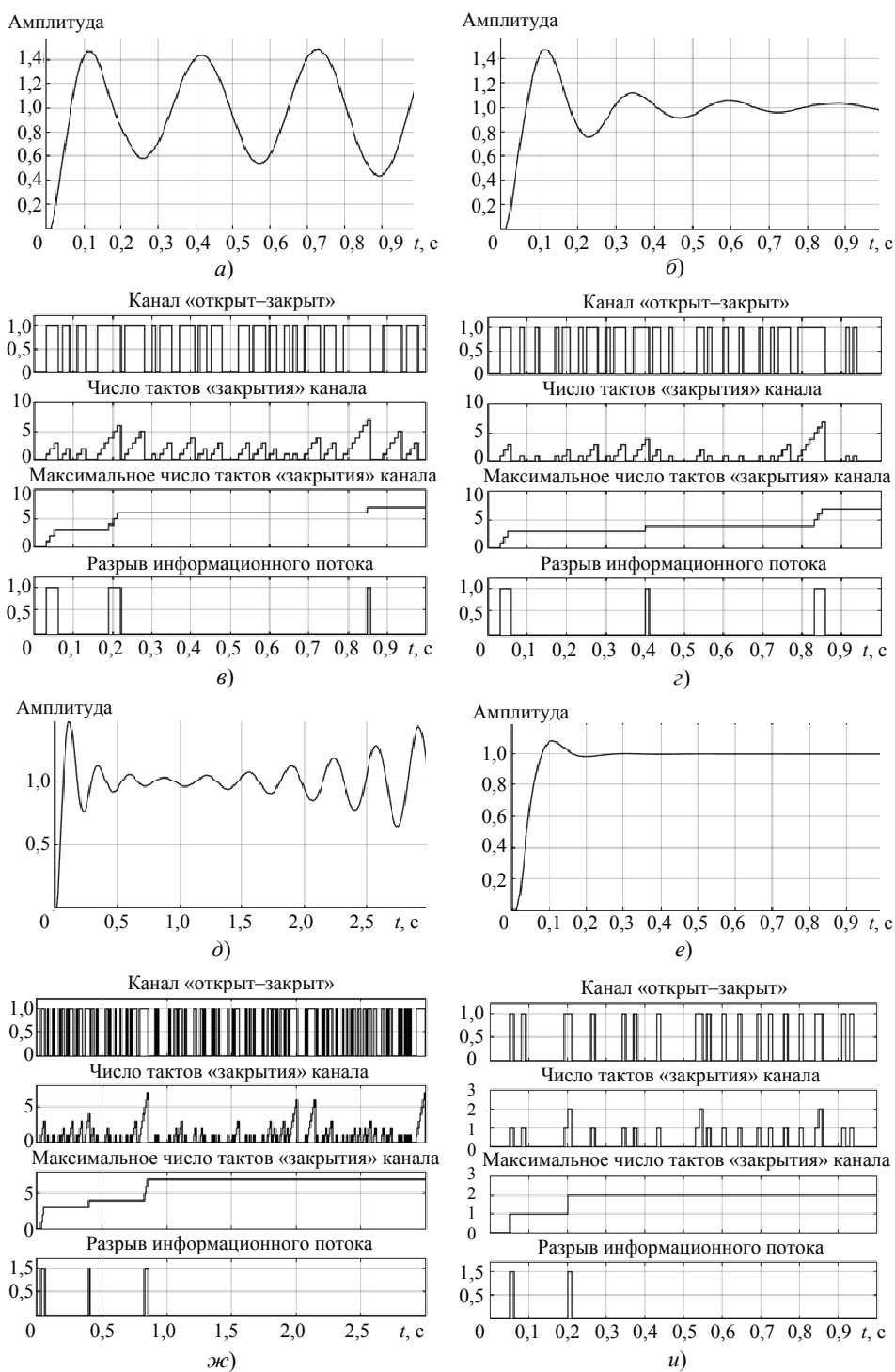


Рис. 3. Переходной процесс и информация о работе системы управления при времени такта квантования $T_0 = 0,01$ с и вероятности «закрытия» канала: $a, в - P = 0,6$; $б, г, д, ж - P = 0,4$; $е, и - P = 0,2$

Таким образом, проведенное в работе имитационное моделирование сетевой системы управления с бесконечно большим буфером для пакетов данных показало, что с течением времени в системе управления время запаздывания увеличивается, что рано или поздно может привести к потере устойчивости.

Список литературы

1. Абрамов, Г. В. Анализ времени передачи данных в распределенных сетях с конкурирующим доступом / Г. В. Абрамов, А. Е. Емельянов, К. Ч. Колбая // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Сер.: Системный анализ и информационные технологии. – 2016. – № 4. – С. 61 – 67.
2. Битюков, В. К. Модель канала передачи со случайной задержкой и потерей пакетов данных для сетевых систем управления / В. К. Битюков, А. Е. Емельянов // Вестн. Воронежского гос. ун-та инженерных технологий. – 2015. – № 3 (65). – С. 68 – 73.
3. Burger, M. Hierarchical Clustering of Dynamical Networks Using a Saddle-Point Analysis / M. Burger, D. Zelazo, F. Allgower // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2013. – Vol. 58, No. 1. – P. 113 – 124.
4. Chen, X. Periodic Event-Triggered State-Feedback and Output-Feedback Control for Linear Systems / X. Chen, F. Hao // International Journal of Control, Automation and Systems. – 2015. – Vol. 13, No. 4. – P. 779 – 787.
5. Fuhrmann, P. A. Reachability, Observability and Strict Equivalence of Networked Linear Systems / Fuhrmann P. A., Helmke U. // Mathematics of Control, Signals and Systems. – 2013. – Vol. 25, Issue 4. – P. 437 – 471.
6. Self-Triggered Linear Quadratic Control / T. Gommans [et al.] // Automatica. – 2014. – Vol. 50, No. 4. – P. 1279 – 1287.
7. Introduction to Feedback Control of Underactuated VTOL Vehicles: A Review of Basic Control Design Ideas and Principles / M.-D. Hua [et al.] // IEEE Control Systems. – 2013. – Vol. 33, No. 1. – P. 61 – 75. doi: 10.1109/MCS.2012.2225931
8. You, K.-Y. Survey of Recent Progress in Networked Control Systems / K.-Y. You, L.-H. Xie // Acta Automatica Sinica. – 2013. – Vol. 39, No. 2. – P. 101 – 117.
9. Cloud-Based Networked Visual Servo Control / H. Wu [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2013. – Vol. 60. – P. 554 – 566.
10. Zhang, L. Network-Induced Constraints in Networked Control Systems / L. Zhang, H. Gao, O. Kaynak // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2013. – Vol. 9. – P. 403 – 416.

Investigating the Effect of Data Buffering on the Quality of Network Control Systems

I. A. Avtsinov¹, A. E. Emelyanov¹, M. N. Ivliev²

*Departments of Information and Control Systems (1);
Higher Mathematics and Information Technology (2),
Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia;
max1m@mail.ru*

Keywords: data transmission probability; discrete regulator; controller; network control system; network channel; control system; quantization tact.

Abstract: Simulation modeling of the control system with a network channel for transmitting information was carried out. The influence of the data buffering process on the quality of control for systems with an infinitely large buffer was investigated.

Simulation of the operation of digital and network control systems was carried out in the Simulink environment of the MATLAB system. It is concluded that, despite the presence of an infinitely large buffer, a delay may accumulate in the digital control system, leading to a loss of stability of the system as a whole.

References

1. Abramov G.V., Yemel'yanov A.Ye., Kolbaya K.Ch. [Analysis of data transmission time in distributed networks with competing access], *Vestnik Voronezhskogo gos. un-ta. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnyye tekhnologii* [Vestnik of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies], 2016, no. 4, pp. 61-67. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Bityukov V.K., Yemel'yanov A.Ye. [A model of a transmission channel with random delay and loss of data packets for network control systems], *Vestnik Voronezhskogo gos. un-ta inzhenernykh tekhnologiy* [Vestnik of Voronezh State University of Engineering Technology], 2015, no. 3 (65), pp. 68-73. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Burger M., Zelazo D., Allgower F. Hierarchical Clustering of Dynamical Networks Using a Saddle-Point Analysis, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2013, vol. 58, no. 1, pp. 113-124.
4. Chen X., Hao F. Periodic Event-Triggered State-Feedback and Output-Feedback Control for Linear Systems, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2015, vol. 13, no. 4, pp. 779-787.
5. Fuhrmann P.A., Helmke U. Reachability, Observability and Strict Equivalence of Networked Linear Systems, *Mathematics of Control, Signals and Systems*, 2013, vol. 25, issue 4, pp. 437-471.
6. Gommans T., Antunes D., Donkers T., Tabuada P., Heemels W. Self-Triggered Linear Quadratic Control, *Automatica*, 2014, vol. 50, no. 4, pp. 1279-1287.
7. Hua M.-D., Hamel T., Morin P., Samson C. Introduction to Feedback Control of Underactuated VTOL Vehicles: A Review of Basic Control Design Ideas and Principles, *IEEE Control Systems*, 2013, vol. 33, no. 1, pp. 61-75, doi: 10.1109/MCS.2012.2225931
8. You K.-Y., Xie L.-H. Survey of Recent Progress in Networked Control Systems, *Acta Automatica Sinica*, 2013, vol. 39, no. 2, pp. 101-117.
9. Wu H., Lou L., Chen C.-C., Hirche S., Kuhnlenz K. Cloud-Based Networked Visual Servo Control, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, vol. 60, pp. 554-566.
10. Zhang L., Gao H., Kaynak O. Network-Induced Constraints in Networked Control Systems, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, vol. 9, pp. 403-416.

Untersuchung der Auswirkungen der Pufferung von Daten auf die Qualität der Verwaltung in Netzwerksystemen

Zusammenfassung: Es ist eine Simulationsmodellierung des Steuerungssystems mit einem Netzwerkkanal zur Übertragung von der Information durchgeführt. Der Einfluss des Datenpufferprozesses auf die Steuerungsqualität für Systeme mit unendlich großem Puffer ist untersucht. Die Modellierung des Betriebs digitaler und Netzwerksteuerungssysteme wurde in der Simulink-Umgebung des MATLAB-Systems durchgeführt. Es ist eine Schlussfolgerung gezogen, dass sich trotz des Vorhandenseins eines unendlich großen Puffers eine Verzögerung im digitalen Steuersystem ansammeln kann, was zu einem Verlust der Stabilität des Gesamtsystems führt.

Étude de l'impact de la mise en mémoire tampon des données sur la qualité de la gestion dans les systèmes de réseau

Résumé: Est effectuée la simulation d'un système de contrôle avec un canal de transmission d'informations de réseau. Est étudié l'impact du processus de calcul des données sur la qualité de la gestion des systèmes avec un tampon infiniment grand. Est réalisée la simulation du fonctionnement des systèmes de contrôle numérique et ceux de réseau dans l'environnement Simulink du système MATLAB. Est faite la conclusion qu'en dépit de la présence d'un tampon infiniment grand, le système de la commande numérique peut accumuler un retard, ce qui entraîne une perte de la stabilité du système dans son ensemble.

Авторы: *Авцинов Игорь Алексеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры информационных и управляющих систем; *Емельянов Александр Егорович* – кандидат технических наук, доцент кафедры информационных и управляющих систем; *Ивлиев Максим Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики и информационных технологий, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», г. Воронеж, Россия.

Рецензент: *Кудряшов Владимир Сергеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры информационных и управляющих систем, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», г. Воронеж, Россия.