

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ И РОБОТОТЕХНИКА AUTOMATIC CONTROL AND ROBOTICS

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-646-652

УДК 004.942

Повышение качества сетевого управления технологическими процессами

Александр Егорович Емельянов¹, Наталья Валентиновна Суханова²✉

^{1,2} Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, 394036, Российская Федерация

¹ emalexeg@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5639-602X>

² Suhanovanv1971@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-3210-7879>

Аннотация

Предмет исследования. Современные системы управления для передачи данных используют цифровые сетевые каналы. Такие системы обладают случайными задержками и потерями пакетов данных. Предметом исследования является изучение влияния буферизации данных на качество управления технологическими процессами для систем с ограниченным объемом буфера для пакетов данных путем имитационного моделирования и компенсация этого влияния с помощью упредителя Смита. Отличительной особенностью предлагаемого решения является компенсация случайного запаздывания. **Метод.** Для повышения качества сетевого управления технологическими процессами предложено использовать упредитель Смита. Упредитель Смита включает в себя модель объекта и буфер для пакетов данных. Буфер служит для формирования случайного времени задержки. Его работа определяется режимом передачи данных по сетевому каналу. **Основные результаты.** Моделирование функционирования сетевой системы управления выполнено в среде Simulink системы Matlab. Новизна разработанной имитационной модели заключается в том, что в основу разработки положено моделирование времени разрыва информационного потока данных. Моделирование проводилось для объемов буферов пакетов данных от 1 до 5 и вероятности передачи данных от 0,9 до 0,4. Результаты исследования показали, что использование упредителя Смита для компенсации случайного запаздывания существенно повышает качество переходных процессов сетевых систем управления. **Практическая значимость.** Показано, что использование упредителя Смита существенно повышает качество сетевых систем. Разработанные имитационные модели могут быть использованы при проектировании новых сетевых систем управления, а также при модернизации уже используемых на практике систем.

Ключевые слова

сетевое управление, буфер, случайная задержка, потеря пакета, упредитель Смита, имитационное моделирование

Ссылка для цитирования: Емельянов А.Е., Суханова Н.В. Повышение качества сетевого управления технологическими процессами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 5. С. 646–652. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-646-652

Improving the quality of network management of technological processes

Alexander E. Emelyanov¹, Natalia V. Sukhanova²✉

^{1,2} Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, 394036, Russian Federation

¹ emalexeg@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5639-602X>

² Suhanovanv1971@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-3210-7879>

Abstract

Modern control systems use digital networks for data transmission. Such systems have random delays and loss of data packets. The aim of the research is to study the impact of data buffering on the quality of process control focusing on systems with a limited buffer volume for data packets by simulation modeling and compensation of this influence using the Smith predictor. A distinctive feature of the proposed solution is the compensation for accidental delay. To improve the network management quality of technological processes, the authors proposed to use the Smith predictor. The Smith predictor includes a model of the object and a buffer for data packets. The buffer is used to generate a random delay time.

© Емельянов А.Е., Суханова Н.В., 2021

Its operation is determined by the mode of data transmission over the network channel. The simulation of the functioning of the network control system was performed in the Simulink environment of the Matlab system. The novelty of the developed simulation model lies in the fact that its development is based on modeling the time break of the information flow. The simulation was carried out for the volumes of data packet buffers ranging from 1 to 5 and the probability of data transmission ranging from 0.9 to 0.4. The results of the study proved that the use of the Smith predictor to compensate for random delay significantly increases the quality of transients of network control systems. It is shown that the use of the Smith predictor significantly improves the quality of network systems. The developed simulation models can be used in the design of new networked control systems and in the modernization of the systems already used in practice.

Keywords

network control, buffer, random delay, packet loss, Smith predictor, simulation modeling

For citation: Emelyanov A.E., Sukhanova N.V. Improving the quality of network management of technological processes. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 5, pp. 646–652 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-646-652

Введение

Внедрение инновационных технологий связано с осуществлением сопряжения оборудования, регулирующих, измерительных, информационных систем, путем устранения технических противоречий между функционированием и управлением технологическим потоком [1]. Для контроля, измерения и автоматизации параметров технологических процессов в современных системах управления используются интегральные датчики [2]. Преимущество таких датчиков состоит в том, что они хорошо адаптируются с современными микроконтроллерами, а также позволяют использовать для передачи данных цифровые сети. Такие каналы передачи данных имеют важные особенности: случайные задержки и очереди [3–16]. Эти каналы получили название — сетевые каналы, а системы — сетевые системы управления (Networked Control System, NCS) [17–20]. В научных работах показано, что случайные задержки оказывают существенное влияние на качество управления технологическими процессами. Для анализа режимов и качества управления в системах, использующих каналы стохастической передачи данных, ввиду сложности их функционирования, применяют имитационное моделирование. Такое моделирование требует применения методов и подходов, таких как теории управления и связи. В совокупности это значительно усложняет анализ, моделирование и синтез таких систем управления [7, 21–24]. Как правило, для согласования скоростей передачи данных в линиях связи и сглаживания кратковременных перегрузок в каналах передачи данных используется буферная память сетевых устройств. Ее размер оказывает влияние на количество потерянных пакетов в сети. Также представляет интерес оценка влияния размера буфера на качество регулирования. В работах [25–27] выполнен анализ времени передачи данных в распределенных сетях с конкурирующим доступом к сетевому каналу. Результаты проведенного анализа показали, что время передачи данных может быть удовлетворительно описано экспоненциальным законом распределения. В работах предпринята попытка компенсации потери пакетов данных при ограниченном объеме буфера путем дублирования данных. Таким образом, при функционировании сетевых систем управления избежать потерь данных практически невозможно, поэтому исследование вариантов решения проблемы актуально. Для этого необходимо оценить

влияние режимов функционирования системы и параметров оборудования (например, объема буфера) на качество управления системы. Для компенсации эффекта от потери данных предлагается использовать упредитель Смита.

Основная задача работы — оценка качества управления при наличии случайного запаздывания и потери пакетов данных в сети при использовании упредителя Смита и без него. Для реализации поставленной задачи была разработана имитационная модель, позволяющая провести анализ процесса качества управления при различных режимах функционирования системы и параметров оборудования. Новизна разработанной имитационной модели заключается в том, что в основу ее разработки положено моделирование времени разрыва информационного потока данных.

Моделирование

Для компенсации влияния случайного запаздывания, потери пакетов данных и разрыва информационного потока в системе управления с сетевыми каналами и ограниченным объемом буфера для пакетов данных предложено использовать упредитель Смита. На рис. 1 представлена функциональная схема системы управления с ограниченным объемом буфера для пакетов данных и упредителем Смита.

Данная система управления работает следующим образом. По модели объекта регулирования рассчитывается выходной сигнал y_k^M , значение которого подается на вход дискретного регулятора, а также помещается в буфер упредителя Смита. Если в буфере дискретного регулятора имеются пакеты данных от цифрового регулятора, то ключи S_1 и S_2 замкнуты. В этом случае происходит компенсация данных, поступающих из буфера дискретного регулятора, данными из буфера упредителя Смита. Разность этих значений подается на вход дискретного регулятора. В случае отсутствия пакетов данных в буфере дискретного регулятора, ключи S_1 и S_2 остаются разомкнутыми. Тогда пакеты данных, поступающие от модели объекта, будут теряться. А пакеты данных, которые находятся в буфере упредителя, остаются без изменений. На рис. 1 пунктирной линией показано управление ключами S_1 и S_2 в зависимости от наличия или отсутствия пакетов данных в буфере дискретного регулятора. Для более надежной компенсации в пакеты данных можно включать метки времени,

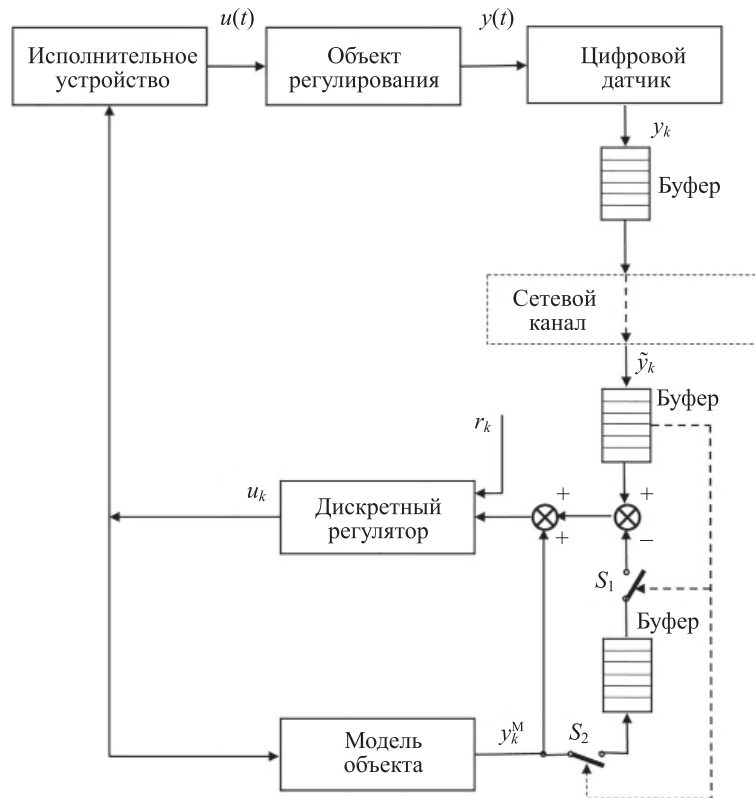


Рис. 1. Система управления с конечным объемом буфера для пакетов данных и упредителем Смита: $u(t)$ — выходной сигнал исполнительного устройства (непрерывный); $y(t)$ — выходной сигнал объекта регулирования (непрерывный); y_k — выходной сигнал цифрового датчика (дискретный); \tilde{y}_k — переданный сигнал цифрового датчика на дискретный регулятор; u_k — выходной сигнал дискретного регулятора; r_k — задание дискретному регулятору

Fig. 1. A control system with a finite buffer volume for data packets and a Smith predictor: $u(t)$ — the output signal of the executive device (continuous); $y(t)$ — the output signal of the control object (continuous); y_k — the output signal of the digital sensor (discrete); \tilde{y}_k — the transmitted signal of the digital sensor to the discrete regulator; u_k — the output signal of the discrete regulator; r_k — the task to the discrete regulator

характеризующие момент времени, когда они были сформированы. В этом случае компенсация должна происходить для пакетов, имеющих одинаковые метки времени, как в буфере регулятора, так и в буфере упредителя.

Моделирование функционирования сетевой системы управления осуществлено в среде Simulink системы Matlab.

Схема моделирования рассмотренной системы управления представлена на рис. 2.

Разработанная схема системы управления использует сетевой канал передачи данных между датчиком и контроллером. При этом сетевые устройства могут иметь буферные модули (датчик — выходной буфер, контроллер — входной). Рассматриваемая система работает следующим образом. Цифровой датчик считывает выходной сигнал объекта регулирования в моменты квантования выхода объекта регулирования. Если канал «открыт», то цифровой датчик сразу передает считанные данные на контроллер. Если канал «закрыт», т. е. передача данных по нему невозможна в течение такта квантования T_0 , то пакет данных помещается в буфер, если он не заполнен, в противном случае — данные теряются. Таким образом, если канал будет «закрыт» продолжительное время, в течение нескольких тактов квантования T_0 , то в буфере (если он имеется) датчика

будет находиться соответствующее количество пакетов данных. Предполагается, что как только сетевой канал будет «открыт», т. е. 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 ограниченными и одинаковыми по объему. Предполагается, что датчик и контроллер работают синхронно: квантование датчика и контроллера осуществляется с одинаковым тактом квантования T_0 и в один и тот же момент времени t . Контроллер вырабатывает регулирующее воздействие по определенному закону. Регулирующее воздействие от контроллера передается на исполнительное устройство в моменты времени $t = kT_0$ (k — номер такта квантования). Предполагается, что характеристики цифрового датчика и исполнительного устройства не влияют на процесс регулирования системы. Примем, что цифровой датчик и исполнительное устройство соответствуют безынерционным элементам с единичным коэффициентом усиления. В качестве объекта регулирования был выбран двигатель постоянного тока (сервопривод). В качестве

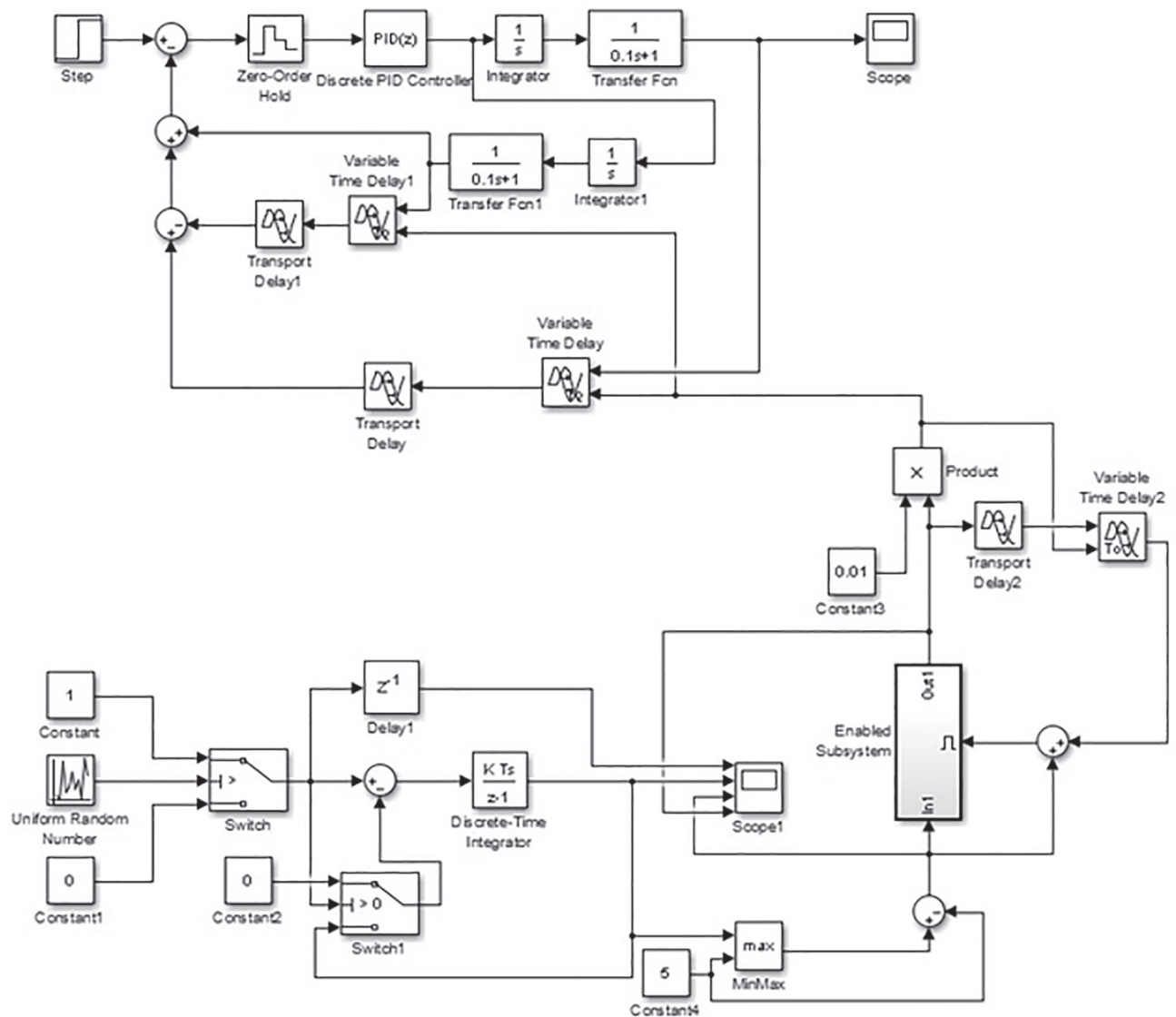


Рис. 2. Схема моделирования системы управления с конечным объемом буфера для пакетов данных и упредителем Смита
 Fig. 2. A control system simulation scheme with a finite buffer volume for data packets and a Smith predictor

контроллера — дискретный пропорционально-интегрально-дифференциальный-регулятор.

Схема на рис. 2 моделирует поведение системы управления, показанной на рис. 1. При моделировании принято, что модель в точности соответствует объекту регулирования.

Результаты и обсуждение

Численные результаты исследования представлены в виде графиков переходных процессов сетевой системы управления (рис. 3), где: P — вероятность «закрытия» канала; T_0 — такт квантования, с; N — объем буфера. На рис. 3, а показан переходной процесс системы управления при $P = 0,6$. Система имеет буфер для пакетов данных емкостью $N = 5$. Видно, что наличие буфера у элементов системы существенно снижает качество управления. Оно является неудовлетворительным: перерегулирование составляет 75 %; время переходного процесса более 1 с; имеется существенная

колебательность переходного процесса, которая близка к автоколебательному режиму.

На рис. 3, б показан переходной процесс рассматриваемой системы управления, при наличии упредителя Смита. Видно, что система управления является устойчивой, причем переходной процесс на ступенчатое изменение задающего воздействия соответствует системе управления без запаздывания в цепи обратной связи.

Имитационная модель позволяет проводить анализ качества систем управления, использующих сетевые стохастические каналы передачи данных, такие как цифровые сети, и оценить влияние при различных режимах функционирования системы и параметров оборудования. В качестве основной характеристики режима функционирования использована вероятность «закрытия» канала, в качестве основной характеристики оборудования — размер буфера сетевого устройства.

Исследование компенсации случайного запаздывания в системе управления при добавлении в систему упредителя Смита показало эффективность использо-

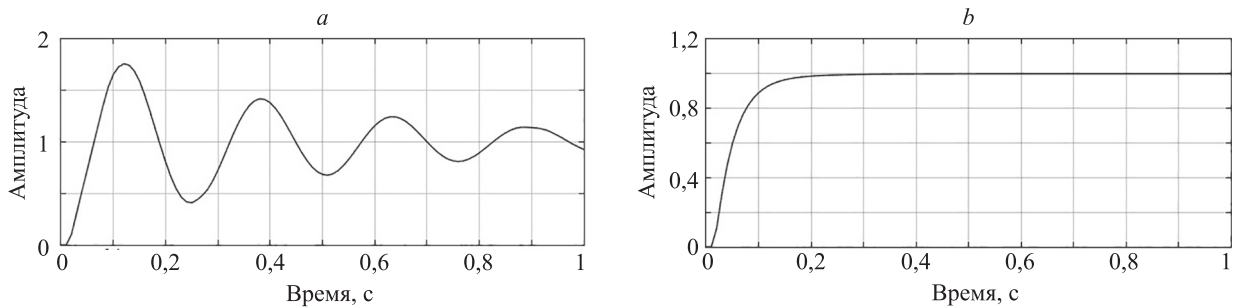


Рис. 3. Графики переходных процессов системы управления с параметрами: $P = 0,6$; $T_0 = 0,01$; $N = 5$ (а) и при наличии упредителя Смита (б)

Fig. 3. Graphs of transitional processes of the control system with parameters: $P = 0.6$; $T_0 = 0.01$; $N = 5$ (a) and in the presence of a Smith predictor (b)

вания данного подхода. Так при отсутствии упредителя при случайной задержке или потере данных по сети переходной процесс имеет большое время переходного процесса, амплитуда перегулирования превышает 75 %. С упредителем Смита время переходного процесса существенно снижается, а перегулирование отсутствует. Размер буфера практически не влияет на качество переходного процесса при использовании упредителя в случае, если модель достаточно хорошо описывает объект.

Выводы

Разработанная имитационная модель отличается тем, что в основе ее разработки лежит моделирование времени разрыва информационного потока данных. Компенсация случайной временной задержки при пе-

редаче данных осуществлялась с помощью упредителя Смита. Такой подход позволил улучшить качество переходных процессов рассматриваемых систем. По сравнению с известными подходами математического моделирования сетевых систем управления [28, 29], полученные модели позволяют исследовать более широкий класс таких систем — систем, элементы которых обладают буферами для хранения пакетов данных.

Заключение

Практическая ценность полученной имитационной модели заключается в том, что она может быть использована при проектировании новых сетевых систем управления, а также при модернизации систем, уже используемых на практике.

Литература

1. Reyes-Yanes A., Martinez P., Ahmad R. Real-time growth rate and fresh weight estimation for little gem romaine lettuce in aquaponic grow beds // *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020. V. 179. P. 105827. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105827>
2. Narushin V.G., Romanov M.N., Lu G., Cugley J., Griffin D.K. Digital imaging assisted geometry of chicken eggs using Hügelschäffer's model // *Biosystems Engineering*, 2020. V. 197. P. 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.06.008>
3. Povarov V., Danilov A., Burkovsky V., Gusev K. Data support system for controlling decentralised nuclear power industry facilities through uninterrupted condition monitoring // *MATEC Web of Conferences*, 2018. V. 161. P. 02012. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816102012>
4. Akashi S., Ishii H., Cetinkaya A. Self-triggered control with tradeoffs in communication and computation // *Automatica*, 2018. V. 94. P. 373–380. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2018.04.028>
5. Li H., Yan W., Shi Y. Triggering and control codesign in self-triggered model predictive control of constrained systems: With guaranteed performance // *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2018. V. 63. N 11. P. 4008–4015. <https://doi.org/10.1109/TAC.2018.2810514>
6. Zietkiewicz J., Horla D., Owczarkowski A. Sparse in the time stabilization of a bicycle robot model: Strategies for event- and self-triggered control approaches // *Robotics*, 2018. V. 7. N 4. P. 77. <https://doi.org/10.3390/robotics7040077>
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. V. 33. N 1. P. 61–75. <https://doi.org/10.1109/MCS.2012.2225931>
8. Hua M.-D., Hamel T., Morin P., Samson C. Control of VTOL vehicles with thrust-tilting augmentation // *Automatica*, 2015. V. 52. P. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2014.10.129>

References

1. Reyes-Yanes A., Martinez P., Ahmad R. Real-time growth rate and fresh weight estimation for little gem romaine lettuce in aquaponic grow beds. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, vol. 179, pp. 105827. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105827>
2. Narushin V.G., Romanov M.N., Lu G., Cugley J., Griffin D.K. Digital imaging assisted geometry of chicken eggs using Hügelschäffer's model. *Biosystems Engineering*, 2020, vol. 197, pp. 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.06.008>
3. Povarov V., Danilov A., Burkovsky V., Gusev K. Data support system for controlling decentralised nuclear power industry facilities through uninterrupted condition monitoring. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 161, pp. 02012. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816102012>
4. Akashi S., Ishii H., Cetinkaya A. Self-triggered control with tradeoffs in communication and computation. *Automatica*, 2018, vol. 94, pp. 373–380. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2018.04.028>
5. Li H., Yan W., Shi Y. Triggering and control codesign in self-triggered model predictive control of constrained systems: With guaranteed performance. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2018, vol. 63, no. 11, pp. 4008–4015. <https://doi.org/10.1109/TAC.2018.2810514>
6. Zietkiewicz J., Horla D., Owczarkowski A. Sparse in the time stabilization of a bicycle robot model: Strategies for event- and self-triggered control approaches. *Robotics*, 2018, vol. 7, no. 4, pp. 77. <https://doi.org/10.3390/robotics7040077>
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. <https://doi.org/10.1109/MCS.2012.2225931>
8. Hua M.-D., Hamel T., Morin P., Samson C. Automatica Control of VTOL vehicles with thrust-tilting augmentation. *Automatica*, 2015, vol. 52, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2014.10.129>

9. Nguyen L.-H., Hua M.-D., Hamel T. A nonlinear control approach for trajectory tracking of slender-body axisymmetric underactuated underwater vehicles // Proc. 18th European Control Conference (ECC). 2019. P. 4053–4060. <https://doi.org/10.23919/ECC.2019.8795880>
10. Hua M.-D., Trumpf J., Hamel T., Mahony R., Morin P. Nonlinear observer design on SL(3) for homography estimation by exploiting point and line correspondences with application to image stabilization // Automatica. 2020. V. 115. P. 108858. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2020.108858>
11. You K.-Y., Xie L.-H. Survey of recent progress in networked control systems // Zidonghua Xuebao/Acta Automatica Sinica. 2013. V. 39. N 2. P. 101–118. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1004.2013.00101>
12. Chen X., Hao F. Periodic event-triggered state-feedback and output-feedback control for linear systems // International Journal of Control, Automation and Systems. 2015. V. 13. N 4. P. 779–787. <https://doi.org/10.1007/s12555-013-0318-z>
13. Kravets O.Ja., Choporov O.N. The problems and peculiarities of modelling integrated systems of heterogeneous traffic service // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Математика и физика. 2018. Т. 11. № 5. С. 581–587. <http://dx.doi.org/10.17516/1997-1397-2018-11-5-581-587>
14. Kravets O.J., Ryzhkov A.P., Krasnovskiy E.E. Modelling heterogeneous data transmission systems based on queueing system networks // International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. 2020. V. 9. N 4. P. 6393–6399. <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/323942020>
15. Kravets O.J., Shaytura S.V., Minitaeva A.M., Atlasov I.V. Analysis of routing processes in telecommunication networks with unsteady flows using Markov processes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 862. N 5. P. 05205. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/862/5/052005>
16. Provotorov V.V., Raijhelgauz L.B., Fedotov A.A., Makarova S.N., Kravets O.J. Outrunning planning by network management in Industry 4.0 concept // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 862. N 4. P. 042011. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/862/4/042011>
17. Wu H., Lou L., Chen C.-C., Hirche S., Kuhnlenz K. Cloud-based networked visual servo control // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2013. V. 60. N 2. P. 554–566. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2186775>
18. Liu K., Selivanov A., Fridman E. Survey on time-delay approach to networked control // Annual Reviews in Control. 2019. V. 48. P. 57–79. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2019.06.005>
19. Zhao Y.-B., Liu G.-P., Kang Y., Yu L. Packet-Based Control for Networked Control Systems: A Co-Design Approach. Springer, 2017. 184 p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-6250-6>
20. Zhang D., Shi P., Wang Q.-G., Yu L. Analysis and synthesis of networked control systems: A survey of recent advances and challenges // ISA Transactions. 2017. V. 66. P. 376–392. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2016.09.026>
21. Kravets O.J., Choporov O.N., Bolnokin V.E. Mathematical models and algorithmization of monitoring control an affiliated network in maintenance service distributed organizations // Quality - Access to Success. 2018. V. 19. N 167. P. 68–72.
22. Kravets O.J., Abramov G.V., Beletskaja S.J. Generalization of the mechanisms of cross-correlation analysis in the case of a multivariate time series // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. V. 173. N 1. P. 012009. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/173/1/012009>
23. Куцакин М.А., Лапко А.Н., Лебеденко Е.В., Рябоконт В.В. К вопросу проверки адекватности имитационной модели системы децентрализованного управления процессом сетевого планирования на основе интеллектуальных автономных агентов // Информационные системы и технологии. 2019. № 1(111). С. 30–36.
24. Лебеденко Е.В., Минайчев А.А. Модель системы обработки мультисервисных данных высокоскоростных магистральных каналов с нестационарной нагрузкой // Телекоммуникации. 2017. № 8. С. 27–29.
25. Abramov G.V., Emelyanov A.E., Ivashin A.L. Identification of applicability area of mathematical model of network control system functioning in asynchronous mode during data transfer via multiple access channel // Proc. of the WMSCI 2011: The 15th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics. 2011. V. 3. P. 199–202.
9. Nguyen L.-H., Hua M.-D., Hamel T. A nonlinear control approach for trajectory tracking of slender-body axisymmetric underactuated underwater vehicles. Proc. 18th European Control Conference (ECC), 2019, pp. 4053–4060. <https://doi.org/10.23919/ECC.2019.8795880>
10. Hua M.-D., Trumpf J., Hamel T., Mahony R., Morin P. Nonlinear observer design on SL(3) for homography estimation by exploiting point and line correspondences with application to image stabilization. Automatica, 2020, vol. 115, pp. 108858. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2020.108858>
11. You K.-Y., Xie L.-H. Survey of recent progress in networked control systems. Zidonghua Xuebao/Acta Automatica Sinica, 2013, vol. 39, no. 2, pp. 101–118. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1004.2013.00101>
12. 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, p. 779–787. <https://doi.org/10.1007/s12555-013-0318-z>
13. Kravets O.Ja., Choporov O.N. The problems and peculiarities of modelling integrated systems of heterogeneous traffic service. Journal of Siberian Federal University — Mathematics and Physics, 2018, vol. 11, no. 5, pp. 581–587. <http://dx.doi.org/10.17516/1997-1397-2018-11-5-581-587>
14. Kravets O.J., Ryzhkov A.P., Krasnovskiy E.E. Modelling heterogeneous data transmission systems based on queueing system networks. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, 2020, vol. 9, no. 4, pp. 6393–6399. <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/323942020>
15. Kravets O.J., Shaytura S.V., Minitaeva A.M., Atlasov I.V. Analysis of routing processes in telecommunication networks with unsteady flows using Markov processes. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, vol. 862, no. 5, pp. 05205. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/862/5/052005>
16. Provotorov V.V., Raijhelgauz L.B., Fedotov A.A., Makarova S.N., Kravets O.J. Outrunning planning by network management in Industry 4.0 concept. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, vol. 862, no. 4, pp. 042011. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/862/4/042011>
17. 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, no. 2, pp. 554–566. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2186775>
18. Liu K., Selivanov A., Fridman E. Survey on time-delay approach to networked control. Annual Reviews in Control, 2019, vol. 48, pp. 57–79. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2019.06.005>
19. Zhao Y.-B., Liu G.-P., Kang Y., Yu L. Packet-Based Control for Networked Control Systems: A Co-Design Approach. Springer, 2017, 184 p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-6250-6>
20. Zhang D., Shi P., Wang Q.-G., Yu L. Analysis and synthesis of networked control systems: A survey of recent advances and challenges. ISA Transactions, 2017, vol. 66, pp. 376–392. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2016.09.026>
21. Kravets O.Ya., Choporov O.N., Bolnokin V.E. Mathematical models and algorithmization of monitoring control an affiliated network in maintenance service distributed organizations. Quality — Access to Success, 2018, vol. 19, no. 167, pp. 68–72.
22. Kravets O.J., Abramov G.V., Beletskaja S.J. Generalization of the mechanisms of cross-correlation analysis in the case of a multivariate time series. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, vol. 173, no. 1, pp. 012009. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/173/1/012009>
23. Kucakin M.A., Lapko A.N., Lebedenko E.V., Ryabokon V.V. On the question of verification of the adequacy of the imitation model of the decentralized management system of the process of network planning based on intellectual autonomous agents. Information Systems and Technologies, 2019, no. 1(111), pp. 30–36. (in Russian)
24. Lebedenko E.V., Minaychev A.A. Processing system model of multiservice data of high-speed trunk channels with non-stationary load. Telecommunications, 2017, no. 8, pp. 27–29. (in Russian)
25. Abramov G.V., Emelyanov A.E., Ivashin A.L. Identification of applicability area of mathematical model of network control system functioning in asynchronous mode during data transfer via multiple access channel. Proc. of the WMSCI 2011: The 15th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, 2011, vol. 3, pp. 199–202.
26. Abramov G.V., Emel'yanov A.E., Kolbaya K.Ch. Distribution law evaluation for demand service time in information system with multiple access to the data link. Automation and Remote Control,

26. Abramov G.V., Emel'yanov A.E., Kolbaya K.Ch. Distribution law evaluation for demand service time in information system with multiple access to the data link // Automation and Remote Control. 2012. V. 73. N 1. P. 181–185. <http://dx.doi.org/10.1134/S000511791201016X>
27. Abramov G.V., Avcinov I.A., Emelyanov A.E., Sukhanova N.V. Application of computer simulation models in the study of the impact of data buffering on the quality of control in network systems // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1278. N 1. P. 012004. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1278/1/012004>
28. Pheng S., Xiaonan L., Lav R., Wang Z., Jiang Z. Robust speed control for networked DC motor system // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2020. V. 11. N 5. P. 10–17. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0110502>
29. Wu Y., Wu Y., Zhao Y. An enhanced predictive control structure for networked control system with random time delays and packet dropouts // Proc. 3rd International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE). 2016. P. 834–838. <https://doi.org/10.1109/ICISCE.2016.182>
- 2012, vol. 73, no. 1, pp. 181–185. <http://dx.doi.org/10.1134/S000511791201016X>
27. Abramov G.V., Avcinov I.A., Emelyanov A.E., Sukhanova N.V. Application of computer simulation models in the study of the impact of data buffering on the quality of control in network systems. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1278, no. 1, pp. 012004. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1278/1/012004>
28. Pheng S., Xiaonan L., Lav R., Wang Z., Jiang Z. Robust speed control for networked DC motor system. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2020, vol. 11, no. 5, pp. 10–17. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0110502>
29. Wu Y., Wu Y., Zhao Y. An enhanced predictive control structure for networked control system with random time delays and packet dropouts. *Proc. 3rd International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)*, 2016, pp. 834–838. <https://doi.org/10.1109/ICISCE.2016.182>

Авторы

Емельянов Александр Егорович — кандидат технических наук, доцент, доцент, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, 394036, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-5639-602X>, emalexeg@yandex.ru

Суханова Наталья Валентиновна — кандидат технических наук, доцент, доцент, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, 394036, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-3210-7879>, Suhanovanv1971@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25.06.2021
Одобрена после рецензирования 09.08.2021
Принята к печати 02.10.2021

Authors

Alexander E. Emelyanov — PhD, Associate Professor, Associate Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, 394036, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-5639-602X>, emalexeg@yandex.ru

Natalia V. Sukhanova — PhD, Associate Professor, Associate Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, 394036, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-3210-7879>, Suhanovanv1971@mail.ru

Received 25.06.2021
Approved after reviewing 09.08.2021
Accepted 02.10.2021



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»