

УДК 531.36

**СИНХРОНИЗАЦИЯ ДВУХ МАЯТНИКОВ НА ТЕЛЕЖКЕ ПО КАНАЛУ СВЯЗИ,  
ПРОХОДЯЩЕМУ ЧЕРЕЗ ИНТЕРНЕТ**

© 2013 г.

*М.С. Аняньевский<sup>1,2</sup>, И.Ю. Широколов<sup>2</sup>*<sup>1</sup>Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург<sup>2</sup>Санкт-Петербургский госуниверситет

msaipme@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.11.2012

Статья посвящена управлению мехатронными системами по каналам связи, проходящим через Интернет. Представлен исчерпывающий обзор научной литературы по дистанционным лабораториям. Приводятся результаты эксперимента проведенного с помощью облачной мехатронной лаборатории (<http://cmlaboratory.com>) по синхронизации двух установок типа «маятник на тележке», собранных из робототехнического конструктора.

*Ключевые слова:* дистанционная лаборатория, управление колебаниями, управление маятником на тележке, ограниченная пропускная способность канала связи, нелинейные динамические системы, системы с запаздыванием, облачная мехатронная лаборатория.

**Введение**

В последние годы в научном мире наблюдается повышенный интерес к задачам дистанционного образования и дистанционному проведению экспериментов. Согласно данным международной базы научных статей «Web of Science», количество публикаций по тематике «дистанционные лаборатории» (remote laboratory) стремительно нарастает: так, если в 2001 году по этой теме было опубликовано всего 7 работ, то в 2008 году их количество составило уже 49 работ (см. рис. 1).

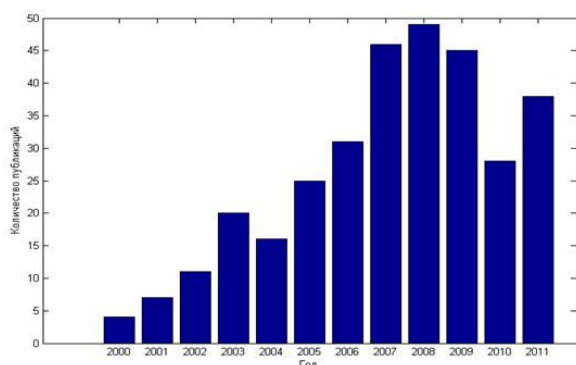


Рис. 1. Количество публикаций по тематике «дистанционные лаборатории» (remote laboratory) согласно данным международной базы научных статей «Web of Science»

Первая работа, которую можно отнести к этой тематике, появилась в 1991 году [1], в ней было предложено использовать дистанционный доступ (через всемирную сеть) для обработки

данных, полученных в ходе научных экспериментов. Первым внедрением концепции лаборатории дистанционного доступа в учебный процесс можно считать проект «Second Best to Being There (SBBT)», начатый в университете штата Орегон в 1994 г. [2]. Позже был проведен ряд исследований по возможностям применения дистанционных лабораторий в образовании [3–10]. Были разработаны и успешно внедрены в университетское образование следующие дистанционные лаборатории:

1. The Virtual Lab of Carnegie Mellon University.
2. <http://www.ece.cmu.edu/~stancil/virtuallab/virtual-lab.html>.
3. Controls and Process Dynamics Lab, The University of Tennessee at Chattanooga.
4. <http://chem.engr.utc.edu/>.
5. Bugscope, University of Illinois at Urbana-Champaign.
6. <http://bugscope.beckman.uiuc.edu/>.
7. I-Lab, Massachusetts Institute of Technology.
8. <https://wikis.mit.edu/confluence/display/ILA/B2/Home>.
9. Microelectronics WebLab, Massachusetts Institute of Technology [11].
10. Measurement Request Broker (MaRBL), University of Illinois at Chicago [11].
11. ITL OnLine Lab, University of Colorado at Boulder [11].
12. Automated Internet Measurement Laboratory, Rensselaer Polytechnic Institute [11].

В работе [12] описывается дистанционная лаборатория, в которой возможно управление роботом-манипулятором, наполнением резервуара, игрушкой-вертолетом. В работе [13], представлена дистанционная лаборатория по управлению двигателем переменного тока, которая была разработана с использованием программных пакетов MatLab Simulink, LabVIEW, Java.

В 2012 году в Нижнем Новгороде прошел симпозиум Международной ассоциации по автоматическому управлению (IFAC) на тему «Новые технологии в обучении теории автоматического управления». На этом симпозиуме было представлено несколько докладов по применению виртуальных лабораторий в образовании [14–18].

Бурное развитие телекоммуникационных технологий в последнее десятилетие, уменьшение времени задержек, увеличение скорости передачи информации позволяет надеяться на возможность решения качественно новых типов задач управления, по каналам связи проходящим через Интернет. Одним из перспективных направлений является исследование возможностей дистанционного разделения управляющей и исполнительской части сложных технических устройств (например, таких устройств, как станки с числовым программным управлением).

Дистанционные лаборатории могут быть использованы для проведения совместных исследований группами учёных, находящимися в разных странах, предоставляя единую исследовательскую среду и общую базу данных для всех участников исследований. Другим применением таких лабораторий может являться предоставление студентам дополнительных возможностей для выполнения лабораторных и исследовательских работ, когда доступ в реальную лабораторию невозможен. Кроме того, так как в подавляющей части таких систем доступ к ним предоставляется посредством подключения через сеть Интернет, то они могут быть применены в системах дистанционного обучения, круг пользователей которых часто не ограничивается студентами одного университета или даже страны, что позволит сделать исследования более доступными и дешёвыми для университетов. Так, некоторые ведущие западные университеты, например Стэнфордский и Принстонский университеты, Массачусетский технологический институт, уже сейчас предлагают широкий спектр курсов дистанционного обучения с возможностью выполнения практических заданий и исследований, которые доступны любому пользователю Интернета.

На данный момент наиболее распространены два типа дистанционных лабораторий. К первому типу можно отнести лаборатории, предоставляющие доступ только к своим вычислительным мощностям. Этот подход чаще всего используется в работах, связанных с распределёнными и параллельными вычислениями. Другие работы используют такой подход, чтобы предоставлять пользователям доступ к виртуальным моделям реальных физических систем и устройств, полностью моделируя их поведение средствами системы [19]. Так, например, в работе [20] авторы предлагают реализацию лаборатории, предоставляющей доступ к виртуальным моделям, реализованным средствами пакета MATLAB Simulink. Второй тип лабораторий предоставляет пользователям возможность взаимодействовать с реальными физическими устройствами. Так, в работе [21] дистанционная лаборатория предоставляет доступ к реальным измерительным приборам, что позволяет её пользователям работать с реальными данными, как если бы они работали непосредственно с самими устройствами. Лаборатория, предлагаемая в работе [22], позволяет пользователям взаимодействовать с исследуемой системой и наблюдать за её последующим поведением.

В России подобные виртуальные лаборатории практически отсутствуют. Тем не менее, начинают появляться лаборатории, ориентированные, например, на исследование физических процессов на основе данных, которые не всегда доступны в обычных лабораториях [23]. Некоторые лаборатории предлагают инструменты для дистанционного обучения электротехнике [24], а также для исследования алгоритмов распределённых вычислений [25]. Надо отметить, что часть этих работ предоставляет доступ не только к своим вычислительным ресурсам или моделируемой среде, но и к реальным устройствам [23, 24, 26]. В лаборатории электронных средств обучения СибГУТИ [27] разработан и внедрен в процесс обучения комплекс лабораторных работ по следующим электротехническим дисциплинам: «Цифровые устройства и микропроцессоры», «Вычислительная техника» и «Физические основы электроники». Первые две лабораторные работы выполняются полностью с браузера с применением вебкамеры, а третья — с помощью специальной клиентской программы без видекамеры.

Тематика дистанционных лабораторий имеет много пересечений с бурно развивающейся в последние годы научной областью телеоператоров. Телеоператор — это устройство позволяющее оператору (человеку) воспринимать и механически управлять дистанционно удален-

ными объектами. Отдельным подклассом телеоператоров является телеробот – робот, который принимает инструкции на расстоянии и выполняет различные действия в своей дистанционно удаленной среде за счет использования датчиков и других механизмов контроля. Обычно телеробот имеет сенсоры и моторы для манипуляций и (или) передвижения, а также сенсоры и программные средства для общения с оператором. Первый действующий телеоператор с обратной связью был разработан Рэем Герцем в 1954 г. Имеется ряд научных публикаций, посвященных управлению манипуляторами по каналам связи, проходящим через Интернет [28–30]. В последние несколько лет наблюдается повышенный интерес к применению телеоператоров в хирургии. В статье [31] приводится несколько различных экспериментов с телеоператорами, расположенными на разных расстояниях и общающихся с устройством по разным каналам связи: commercial internet (выделенный Интернет-канал), wireless lan (беспроводной Интернет), ethernet lan (проводной Интернет). Отличительной особенностью эксперимента являлось то, что изображение с телеробота передавалось посредством различных компьютерных программ: iChat/Skype, HaiVision, Hai1000, Hai200 и др.

Каналы связи, проходящие через Интернет, обладают рядом недостатков, наиболее существенными из которых являются наличие нестационарных задержек при передаче данных и ограниченная пропускная способность канала. Математическая теория управления через каналы с ограниченной пропускной способностью – это молодое, но уже сформировавшееся, направление в науке. Первая монография на эту тему была опубликована в 2009 году [25]. Известно, что наличие ограничений на пропускную способность канала может не только существенно увеличить погрешность управления, но и даже сделать принципиально невозможным само достижение цели [25, 32–34]. Модели канала, используемые в этих исследованиях, плохо применимы к описанию передачи данных через Интернет. Если руководствоваться классификацией OSI, то эти модели удовлетворительно описывают передачу данных только на физическом (первом) и канальном (втором) уровне OSI, а нужно иметь модель канала для уровня приложений (седьмой уровень по классификации OSI). Такая модель в настоящее время в научной литературе отсутствует.

#### Описание эксперимента

Для получения экспериментальных данных была разработана «Облачная мехатронная лабо-

ратория» – пакет программ [35, 36], позволяющий проводить исследования по дистанционному управлению через Интернет мехатронными установками, собранными на базе робототехнического конструктора Lego Mindstorms NXT (документация и исходные коды доступны на сайте <http://cmlaboratory.com/>). Был поставлен эксперимент по синхронизации двух установок типа «маятник на тележке» при передаче управляющих сигналов через различные каналы связи.

Первой частью эксперимента было получение статистики по задержкам в канале связи. Рассматривались три варианта каналов: ethernet lan (локальная сеть), wireless lan (беспроводная сеть), Internet (Интернет). В третьем случае установка находилась в Санкт-Петербурге (Россия), а блок управления – на сервере в штате Техас (США). Гистограммы длительности задержек представлены на рис. 2, 3, 4, по оси абсцисс – время задержки в секундах, по оси ординат – количество управляющих импульсов, переданных с такой задержкой. Как видно из графиков, получившиеся распределения не похожи ни на одно известное распределение (возможно, они являются комбинациями нескольких), кроме того, длительности задержек существенно отличались по длине (в разы).

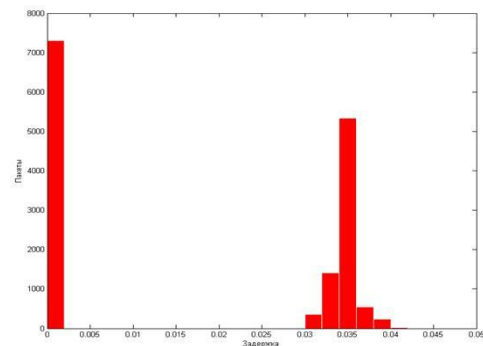


Рис. 2. Гистограмма задержек в канале связи при управлении по локальной сети.

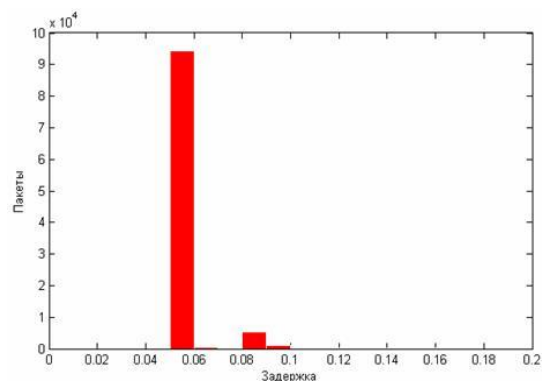


Рис. 3. Гистограмма задержек в канале связи при управлении по беспроводной сети.

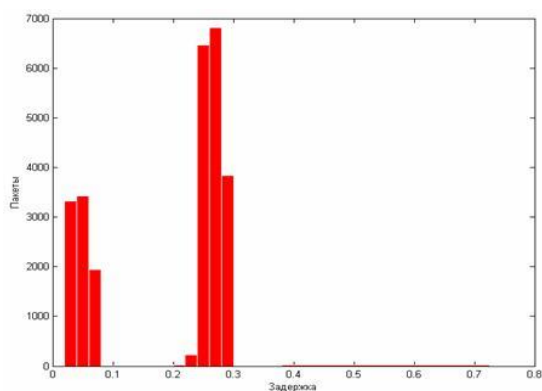


Рис. 4. Гистограмма задержек в канале связи при управлении через Интернет (США-Россия).

Использовалась следующая математическая модель маятников на тележке [37]:

$$(M + m)\ddot{x} + ml\dot{\phi}\cos\phi = u + ml\phi^2 \sin\phi + f(t, x),$$

$$ml\ddot{x}\cos\phi + (ml^2 + J)\ddot{\phi} = -mgl\sin\phi + \mu(t, \phi)$$

где  $x$  – координата тележки на прямой;  $\phi$  – угол между вертикалью и прямой, соединяющей точку подвеса и центр инерции маятника;  $l$  – длина маятника;  $J$  – момент инерции маятника относительно центра инерции;  $f(t, x)$  – сила сухого трения, действующая со стороны поверхности на тележку;  $\mu(t, \phi)$  – момент, обусловленный сухим трением в точке подвеса;  $M$  – масса тележки;  $m$  – масса маятника.

Полная энергия системы имеет вид:

$$E = \frac{1}{2}((M + m)\dot{x}^2 + (ml^2 + J)\dot{\phi}^2 + 2ml\dot{x}\dot{\phi}\cos\phi) + mgl(1 - \cos\phi).$$

При проведении эксперимента для построения алгоритма управления использовалась следующая упрощенная модель маятников на тележке, в которой масса тележки существенно превышает массу маятника, трение в точке подвеса отсутствует, масса маятника сосредоточена в одной точке:

$$u_k ml \cos\phi_k(t) + ml^2 \ddot{\phi}_k(t) = -mgl \sin\phi_k(t),$$

где  $\phi_k$  – отклонение  $k$ -го маятника от вертикальной оси,  $u$  – управление (ускорение тележки), второй маятник был ведущим, поэтому для него  $u_2(t) \equiv 0$ .

Целью управления была фазовая синхронизация маятников:

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} (\phi_1(t) - \phi_2(t))^2 = 0.$$

Алгоритм управления был следующий:

$$u(t + h(t)) = A \operatorname{sign}(\phi_1(t)),$$

здесь  $h(t)$  — нестационарная задержка в управлении (неизвестна, измерима постфактум),  $A$  — постоянная (параметр алгоритма).

Эксперимент заключался в раскашке второго маятника и фазовой синхронизации к нему первого. Результаты эксперимента (данные получены с датчиков углов поворота маятников) представлены на рис. 5 (ethernet lan) и рис. 6 (wireless lan). В случае управления по локальной сети (см. рис. 5) задержки были небольшими и синхронизация достигалась. В случае управления по беспроводной сети задержки были значительными и синхронизация достигалась только при малых амплитудах колебаний маятников.

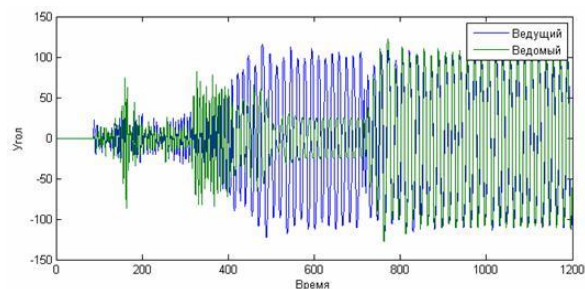


Рис. 5. Динамика изменения углов маятников при управлении по локальной сети.

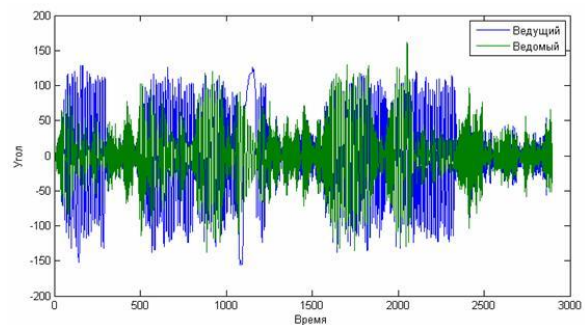


Рис. 6. Динамика изменения углов маятников при управлении по беспроводной сети.

#### Список литературы

1. Aburdene M.F., Mastascusa E.J. Massengale R. A proposal for a remotely shared control systems laboratory // Proceedings of the ASEE. 1991. Frontiers in Education Conference. Session 24A3. P. 589–592.
2. Remote Access to Instrumental Analysis for Distance Education in Science // 2005. <http://www.discoverlab.com/References/Remote%20Access%20to%20Instrumental%20Analysis.htm>
3. Shor M.H. Remote-access engineering educational laboratories: who, what, when, where, why, and how? // Proceedings of the American Control Conference. 2000. P. 2949–2950.
4. Overstreet J.W., Tzes A. Internet-based real-time control engineering laboratory // Proceedings of the American Control Conference. 1999. P. 1472–1476.
5. Shen H. Low-cost modules for remote engineering education: Performing laboratory experiments over the Internet // Proceedings 30th Annual Frontiers in Education Conference. 2000. P. T1D-7.

6. Shen H. et al. Conducting laboratory experiments over the internet // *IEEE Transactions on Education*. 1999. V. 42. N3. P. 180–185.
7. Arpaia P. et al. Remote measurement laboratory for educational experiments // *Journal of the International Measurement Confederation*. 1997. V. 21, N4. / Elsevier Sci B. V. Amsterdam. Netherlands. P. 157–169.
8. Carr R. et al. Enhancement of freshman engineering laboratory through remote web-based experiments // *Proceedings of the 1998 Annual ASEE Conference*. P. 20.
9. Saliyah H.H. Resource management strategies for remote virtual laboratory experimentation // *Proceedings 30th Annual Frontiers in Education Conference*. 2000. P. T1D-8–T1D-12.
10. Gillet D. et al. Recent advances in remote experimentation // *Proceedings of the American Control Conference*. 2000. P. 2955–2956.
11. Esche S.K., Chassapis C., Nazalewicz J.W., Hromin D.J. A scalable system architecture for remote experimentation // *32nd ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference*. November 6-9, 2002. Boston MA.
12. Arnaz R., Pacheco M.A., Mendoza A., Bernardez J., Peran J.R. Development of a distant ac motor laboratory // *IFAC 15th Triennial World Congress*. Barcelona. Spain, 2002.
13. Casinim M., Praticizzo D., Vicino A. The automatic control Telelab: A remote control engineering laboratory // *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*. Orlando FL. 2001. P. 3242–3247.
14. Tkachev S., Aldoshin D., Golubev A. Virtual laboratory on nonlinear control // *Proc. 9th IFAC Symposium Advances in Control Education*. Nizhii Novgorod, 2012.
15. Fuertes J.J., Alonso C.S., Morán Á.A. Virtual and remote laboratory of a DC motor // *Proc. 9th IFAC Symposium Advances in Control Education*, Nizhii Novgorod, 2012.
16. Kozáková A., Vesely V. Robust decentralized controller design: laboratory project-based learning // *Proc. 9th IFAC Symposium Advances in Control Education*. Nizhii Novgorod. 2012.
17. Dominguez G.M., Prada M.A., Morán Á.A. Improving user interaction in remote laboratories through HTML5/AJAX // *Proc. 9th IFAC Symposium Advances in Control Education*. Nizhii Novgorod, 2012.
18. Krausser T., Evertz L., Epple U. A Hands-on laboratory on industrial hardware, process control and advanced automation // *Proc. 9th IFAC Symposium Advances in Control Education*, Nizhii Novgorod, 2012.
19. Faltin N., Bohne A., Tuttas J. and Wagner B. Distributed Team-learning in an internet assisted laboratory // *International Conference on Engineering Education*. August 18-20, 2002. Manchester, UK.
20. Schmid Ch. A Remote Laboratory Using Virtual reality on the web // *Simulation*. 1999. V. 73. P. 23–21.
21. Canforaa G., Daponteb P., Rapuano S. Remotely accessible laboratory for electronic measurement teaching // *Computer Standards & Interfaces*. 2004. V. 26. P. 489–499.
22. Guzman J.L., Berenguel M., Rodriguez F., Dormido S. Web-based remote control laboratory using a greenhouse scale model // *Wiley Periodicals. Inc. Comput Appl Eng Educ*. 2005. V. 13. P. 111–124.
23. Сазанова Н.Г., Ланкина М.П. Применение удалённой лабораторной установки для изучения законов гравитации // *Омский научный вестник*. 2007. Т. 56. С. 166–169.
24. Бурьков Д.В., Волощенко Ю.П. Лабораторные работы по курсу “Электрический привод” для системы дистанционного обучения // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2008. Т. 11. С. 146–150.
25. Matveev A.S., Savkin A.V. Estimation and control over communication networks. Springer, 2009.
26. Баранов П.Ф., Бориков В.Н., Горисев С.А., и др.. Сетевая виртуальная лаборатория удалённого доступа по электротехнике // *Открытое образование*. 2011. Т. 4. С. 19–24.
27. Борисов А.В., Шауэрман А.А., Попов Н.В. Лаборатория с удалённым доступом для исследования микропроцессоров // «Информатика и проблемы телекоммуникаций»: Тезисы доклада. Российск. научно-техническая конференция. 2007. С. 269–270.
28. Andreu D., Fraisse P. Internet enhanced teleoperation: Toward a remote supervised delay regulator. // *IEEE International Conference on Industrial Technology*. December 10-12, 2003. Maribor. Slovenia.
29. Book W.J., Lane H., Love L.J., et al. A novel teleoperated long-reach manipulator testbed and its remote capabilities via the internet // *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. April 22-28, 1996. Minneapolis MN. P. 1036–1041.
30. Debus T., Stoll J., Howe R. D., Dupont P. Cooperative human and machine perception in teleoperated assembly // *Experimental Robotics VII. The Fifth International Symposium*, December 10-13, 2000. Honolulu, HI.
31. Lum M.J.H., Rosen J., King H., et al. Teleoperation in surgical robotics – network latency effects on surgical performance // *31st Annual International Conference of the IEEE EM Minneapolis, Minnesota.. September 2-6, 2009. USA*.
32. Андриевский Б.Р., Матвеев А.С., Фрадков А.Л. Управление и оценивание при информационных ограничениях: к единой теории управления, вычислений и связи // *Автоматика и телемеханика*. 2010. N 4. С. 34–99.
33. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Управление и наблюдение через каналы связи с ограниченной пропускной способностью // *Гироскопия и навигация*. 2009. N 4. С. 103–114.
34. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Адаптивная синхронизация нелинейных систем одного класса при ограниченной пропускной способности канала связи // *Управление большими системами*. Вып. 25. М.: ИПУ РАН, 2009. С.48–83.
35. Облачная мехатронная лаборатория // *Пакет программ, дата регистрации 2012.05.15, исходящий номер ВНТИЦ: И120515103039*.

36. ИПП Лего для Облачной мехатронной лаборатории // Пакет программ, дата регистрации 2012.05.15, исходящий номер ВНИИЦ: И120515102138.
37. Черноусько Ф.Л., Ананьевский И.М., Решмин С.А. Методы управления нелинейными механическими системами. М.: Физматлит, 2006.
38. Виноградов А.Л. Электротехнические виртуальные лабораторные работы в среде Multisim // Новые технологии и формы обучения. 2010. Т. 17. С. 67–69.
39. Окулов Н.Н. Компонент “Виртуальная лаборатория” системы удалённого доступа к распределённым вычислительным ресурсам // Вестник Томского государственного университета. 2009. Т. 7. С. 95–100.
40. Ананьевский М.С. Метод скоростного градиента в задачах адаптации и управления с ограничениями // Вестник Нижегородского университета им. Лобачевского. 2011. Т. 4.

## SYNCHRONIZATION OF TWO PENDULUMS ON MOVING PLATFORMS OVER INTERNET

*M.S. Ananyevskiy, I.Yu. Shirokolobov*

This paper studies a control problem of mechatronics systems over Internet. The overview of publications is presented. Some experiment results of synchronization of two pendulums on moving platforms are presented. The experiment was realized with «Cloud mechatronics laboratory» (<http://cmlaboratory.com>) – software and Lego – hardware.

*Keywords:* remote laboratory, control of oscillations, control of pendulum on moving platform, systems with delay, cloud mechatronics laboratory.