

# РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

*Е.В. Боловин, А.С. Глазырин*

Научный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, Томск

## **Введение**

В настоящее время существует проблема непрерывного мониторинга параметров асинхронных электродвигателей в течении всего жизненного цикла, что включает в себя определение параметров при производстве двигателя, его эксплуатации с учетом различных режимов работы и нагрузках, испытаний после текущего и капитального ремонта двигателя. Для автоматизации процесса непрерывного мониторинга служат компьютеризированные испытательные стенды. В зависимости от конкретной производственной задачи может отличаться компоновка стенда, включающая в себя силовое, измерительное оборудование, а также программное обеспечение.

Разработку математического и программно-алгоритмического обеспечения компьютеризированного испытательного стенда для тестирования параметров асинхронных электродвигателей рассмотрим на примере мониторинга параметров погружных электродвигателей (ПЭД) широко применяемых при эксплуатации нефтяных скважин в осложненных условиях.

В последние годы существенно меняется структура запасов нефти, добываемой в Российской Федерации, что связано с тем, что большинство легкодоступных нефтегазовых месторождений находятся на завершающей стадии разработки [1]. Вместе с тем совершенствуются технологии извлечения нефтегазовых ресурсов [2]. Соответственно становится привлекательной разработка новых месторождений с трудноизвлекаемыми запасами, истощенных нефтяных запасов, нефтегазовых месторождений с неоднородными пластами, разведка и разработка скважин на Арктическом шельфе [3]. На конец 2014 года доля трудноизвлекаемых запасов составляет 55% от общего числа запасов, при этом средняя динамика роста трудноизвлекаемых запасов 3% в год [4].

Для уменьшения затрат используют современные технологии и разработки направленные на совершенствование уже созданных способов для увеличения нефтеотдачи и уменьшения затрат на единицу добытой нефти и повышение средних дебитов, что приводит к сокращению числа малодебитных скважин, входящих в нерентабельный фонд [2, 5, 6].

В настоящее время почти 80% нефти Российской Федерации добывается с помощью установок электроприводных центробежных насосов (УЭЦН) и этот показатель растет [7], при этом удельное соотношение скважин оснащенных

УЭЦН в общем фонде остается практически неизменным и является не самым высоким – около 34% [8].

Стоит отметить, что производительность установок скважных насосов в большой степени зависит от эффективности работы их системы управления. В последние годы активно разрабатываются интеллектуальные станции управления установок электроприводных центробежных насосов (ИСУ УЭЦН), которые позволяют успешно решать основные задачи управления, а также имеет еще дополнительные возможности, такие как настройки на нужный параметр, которым может быть максимальная добыча [9] или снижение удельного электропотребления на тонну добываемой нефти. Положительный эффект от ИСУ был доказан испытаниями на Приобском и Мало-Балыкском месторождениях ООО «РН-Юганскнефтегаз» [10], который выражался в увеличении среднего прироста добываемой жидкости на 37 м<sup>3</sup> в сутки и добываемой нефти на 24 т/сут, при том же потреблении электроэнергии, что позволило сэкономить 12 млн. рублей в год с одной установки [11]. При этом испытания сводились лишь к поддержанию заданного режима работы.

Поддержание заданного режима работы электропривода зависит не только от правильной настройки уставок и корректной обработки внешних воздействий, но и от процессов самонастройки адаптивной системы управления в режиме реального времени. Процесс самонастройки зависит от текущих значений параметров ПЭД, таких как активное сопротивление и индуктивность статорной обмотки, взаимная индуктивность обмоток статора и ротора, активное сопротивление и индуктивность роторной обмотки. Однако при наладке асинхронных электроприводов измеряют лишь активное сопротивление статорной обмотки, другие же параметры берутся из каталожных данных, которые являются расчетными и могут сильно отличаться от реальных значений [12]. Ситуация с погружными двигателями является наиболее сложной, так как данный тип двигателей не является продуктом общепромышленного исполнения асинхронных двигателей и разработан для нужд нефтедобычи с учетом параметров скважин, таких как диаметр, кривизна, угол наклона и т.д.

Усугубляет положение и то факт, что параметры асинхронных электродвигателей зависят от теплового состояния и режима работы. Например, в режиме прямого пуска индуктивность может измениться на 30-40%, а активное сопротивление ротора – более чем в полтора раза [13]. В свою очередь активное сопротивление статорной обмотки, зависящее от теплового состояния, может изменяться на 20-30% в процессе работы двигателя [13]. Эти изменения в УЭЦН усугубляются при повышенных температурах внутри скважин – более 120 °С [14]. Таким образом, можно утверждать, что отсутствие адекватного мониторинга в режиме реального времени параметров асинхронного электродвигателя снижает эффективность работы ИСУ УЭЦН.

Соответственно целью данной работы является разработка математического и программно-алгоритмического обеспечения (МПАО),

позволяющего проводить мониторинг параметров асинхронных электродвигателей в режиме реального времени.

Данное МПАО позволяет:

1. Усовершенствовать ИСУ УЭЦН, что приведет к улучшению эффективности эксплуатации, снижению электропотребления двигателя, а соответственно уменьшению удельных затрат на добычу единицы нефтепродукта.

2. Увеличить наработку на отказ ПЭД за счет непрерывного контроля, диагностики и управления электродвигателем, в следствие чего увеличится межремонтный период УЭЦН, что приведет к уменьшению эксплуатационных затрат на спускоподъемные операции [15].

Разработка МПАО, позволяющего проводить мониторинг параметров ПЭД в режиме реального времени целесообразно проводить в несколько этапов:

1. Разработка и проверка работоспособности МПАО на лабораторном стенде с асинхронным электродвигателем типового конструктивного исполнения.

2. Разработка и проверка работоспособности МПАО на лабораторном стенде с погружным асинхронным электродвигателем.

3. Проверка работоспособности МПАО на погружном асинхронном электродвигателе в условиях эксплуатирующейся нефтяной скважины.

В настоящее время полностью закончен первый этап и его результаты представлены в данной работе.

### **Разработка и проверка работоспособности математического и программно-алгоритмического обеспечения для тестирования параметров асинхронных электродвигателей**

Основой МПАО является принцип динамической идентификации переменных состояния и параметров асинхронных двигателей с помощью алгебраических методов [16, 17] и дискретных моделей [18-20]. На рис. 1 приведена структурная схема МПАО, более подробная информация о данной схеме и работе МПАО представлена в [21, 22].

Проверка работоспособности разработанного математического и программно-алгоритмического обеспечения, позволяющий проводить мониторинг параметров асинхронных электродвигателей в режиме реального времени была проведена на лабораторной экспериментальной установке с электродвигателями мощностью 0,1 кВт в Национальном исследовательском Томском политехническом университете. Были получены переходные характеристики напряжений и токов статора, скорости вращения вала асинхронного двигателя. Стоит отметить, что данный двигатель не являлся серийным, соответственно невозможно определить точность полученных оценок параметров двигателя по справочным данным. Поэтому для оценки точности и работоспособности МПАО сравним графики переходных процессов результирующего вектора токов статора  $I_1(t)$  и  $\hat{I}_1(t)$  (рис. 2), угловых скоростей  $\omega(t)$  и  $\hat{\omega}(t)$  (рис. 3) асинхронного двигателя, снятых соответственно с датчиков и

настраиваемой модели с идентифицированными параметрами. К оцениваемым параметрам асинхронного электродвигателя относятся: активное сопротивление статора  $\hat{R}'_1$ , приведенное к статору активное сопротивление ротора  $\hat{R}'_2$ , эквивалентная индуктивность обмотки статора  $\hat{L}'_1$ , эквивалентная индуктивность обмотки ротора  $\hat{L}'_2$  и индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре электродвигателя  $\hat{L}_m$ .

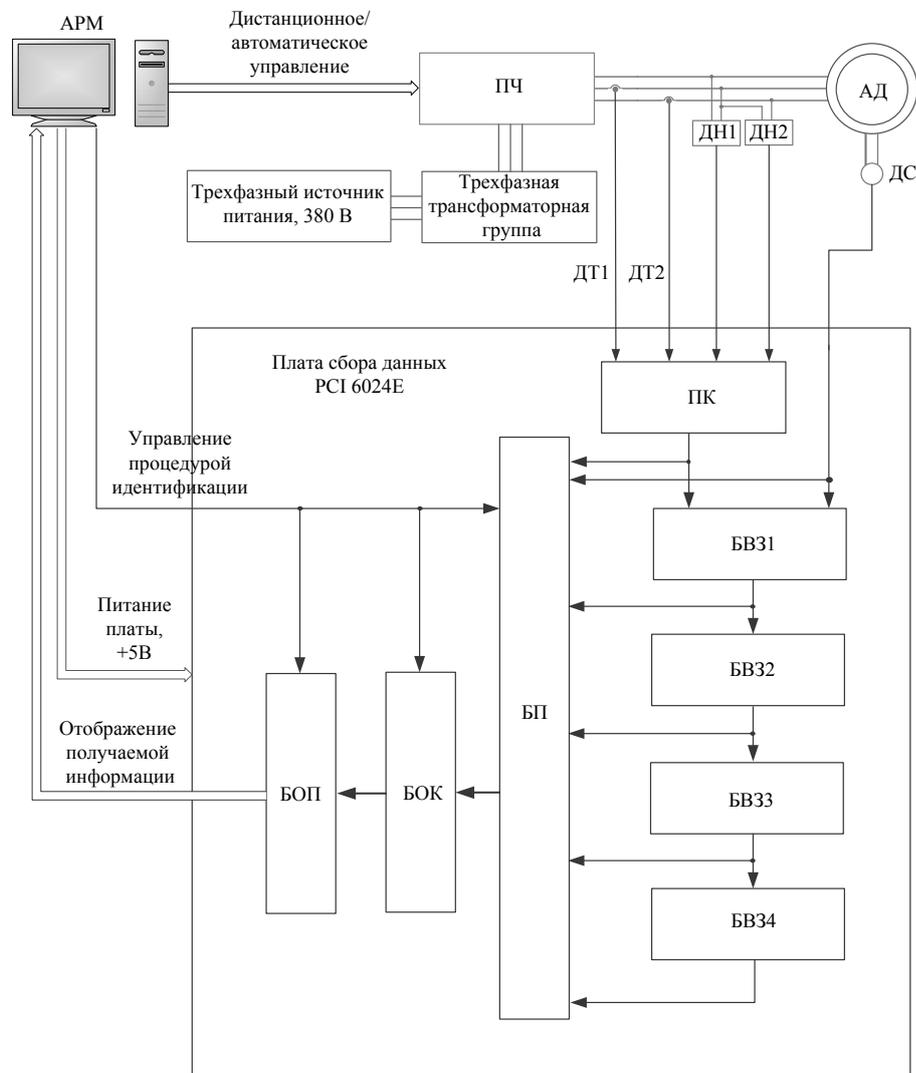


Рис. 1. Функциональная схема компьютеризированного испытательного стенда для тестирования параметров асинхронных электродвигателей:

АРМ – автоматизированное рабочее место; ПЧ – преобразователь частоты;  
 ДТ – датчик тока; ДН – датчик напряжения; ДС – датчик скорости;  
 АД – асинхронный двигатель; ПК – преобразователь координат; БВ31 – первый блок временной задержки; БВ32 – второй блок временной задержки;  
 БВ33 – третий блок временной задержки; БВ34 – четвертый блок временной задержки; БП – блок памяти; БОК – блок определения коэффициентов;  
 БОП – блок определения параметров

Параметры асинхронного двигателя, определенные с помощью МПАО, сведены в табл. 1.

Таблица 1.

## Результаты идентификации параметров

Оценка	$\hat{R}_1$ , Ом	$\hat{R}'_2$ , Ом	$\hat{L}_1$ , Гн	$\hat{L}_2$ , Гн	$\hat{L}_m$ , Гн
Значение	65,314	51,436	1,066	0,834	0,924

Необходимо отметить, что в качестве датчика угловой скорости может выступать как реальный датчик, так и наблюдатель, при этом погрешность оценивания скорости внесет вклад в общую погрешность получаемых оценок параметров тестируемого асинхронного электродвигателя. Для накопления априорной информации, необходимой для запуска метода оценивания параметров должно пройти время  $t_{\text{наи}}$ , которое включает продолжительность процесса первичной обработки данных, поступаемых с датчиков с учетом временных задержек, продолжительность передачи данных на блок памяти и временные затраты на формирование решения. Длительность накопления априорной информации зависит от частоты разрешения платы сбора данных [23] и шага дискретизации [24-26]. При проведении экспериментальных исследований шаг дискретизации был равен  $2 \cdot 10^{-4}$ .

Относительная интегральная погрешность оценивания угловой скорости  $\delta_\omega$  находится как интеграл модулей невязок  $\omega(t)$  и  $\hat{\omega}(t)$  следующим образом:

$$\delta_\omega = \frac{\int_0^{e_s} |\omega(t) - \hat{\omega}_{\text{PC}}(t, R_1, R'_2, L_1, L_2, L_m)| dt}{\int_0^{e_s} |\omega(t)| dt} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Относительная интегральная погрешность оценивания результирующего вектора тока статора  $\delta_I$  находится как интеграл модулей невязок  $I_1(t)$  и  $\hat{I}_1(t)$  следующим образом:

$$\delta_I = \frac{\int_0^{e_s} |I_1(t) - \hat{I}_1(t, R_1, R'_2, L_1, L_2, L_m)| dt}{\int_0^{e_s} |I_1(t)| dt} \cdot 100\%. \quad (2)$$

Характеристики двигателя, построенные на модели двигателя с использованием параметров, полученных с помощью МПАО, имеют относительные интегральные погрешности оценивания, вычисленные с помощью (1) и (2), не более 4%. Соответственно математическое и программно-алгоритмическое обеспечение является работоспособным и позволяет проводить мониторинг параметров асинхронных электродвигателей в режиме реального времени. Однако данное обеспечение необходимо апробировать на установках с электродвигателями мощностью свыше 0,1 кВт и с погружными электродвигателями, что является предметом дальнейших исследований.

В представленной работе показаны результаты разработки и проверки МПАО на лабораторном стенде с асинхронным электродвигателем типового конструктивного исполнения, что являлось первым этапом разработки МПАО, позволяющего проводить мониторинг параметров ПЭД в режиме реального

времени. Разработанный МПАО реализуется в графических средах, используемых в системах сбора и обработки данных, а также для управления техническими объектами и технологическими процессами, такими как LabView и Simulink Matlab.

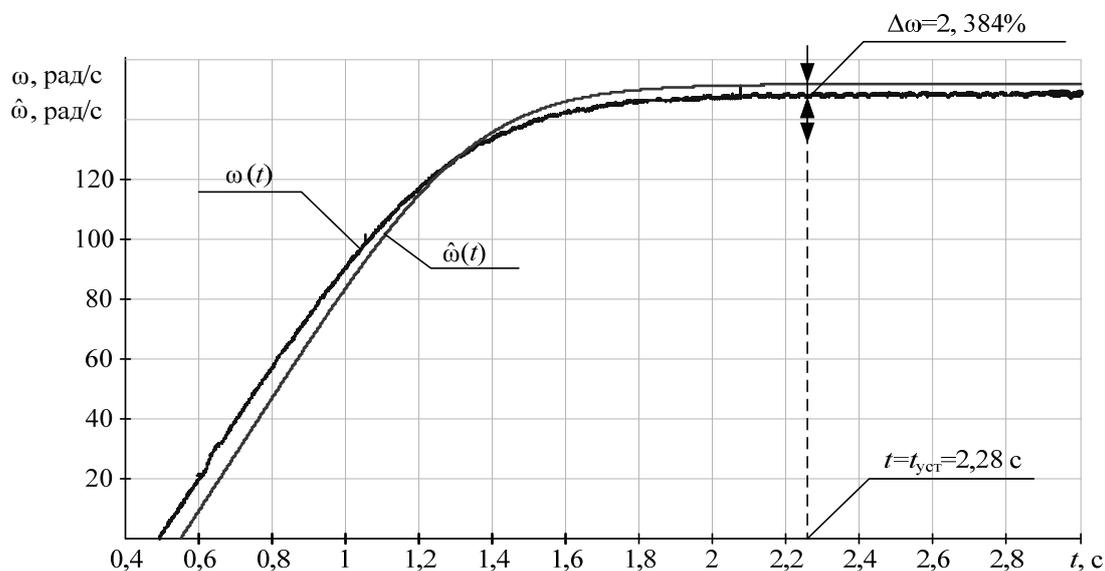


Рис. 2. Графики скоростей вала асинхронного двигателя, снятого с датчика  $\omega(t)$  и построенного с помощью математической модели с учетом оцененных параметров  $\hat{\omega}(t)$

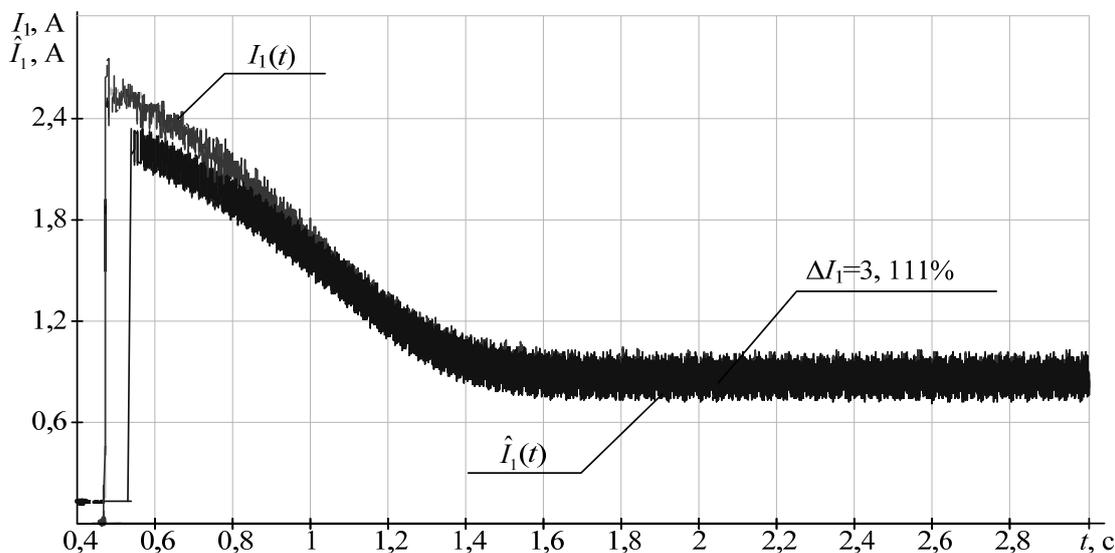


Рис. 3. Графики результирующего вектора тока статора вала асинхронного двигателя, снятого с датчиков  $I_1(t)$  и построенного с помощью математической модели с учетом оцененных параметров  $\hat{I}_1(t)$

## Выводы

1. Разработан математическое и программно-алгоритмическое обеспечение, позволяющее проводить мониторинг параметров асинхронных электродвигателей типового конструктивного исполнения в режиме реального времени.

2. Апробирование разработанного математического и программно-алгоритмического обеспечения на экспериментальной установке показало, что значения относительных интегральных погрешностей скорости и модуля вектора тока статора не более 4%, что является допустимым в инженерной практике.

3. Успешная реализация первого этапа цикла работ, направленных на разработки МПАО, позволяющего проводить мониторинг параметров ПЭД в режиме реального времени позволила разработчикам получить знания, умения и навыки, которые представляют ценность для работ на втором этапе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зуев А. Нефти становятся меньше, бурить придется больше // RU-Energy group. 2013. [Электронный ресурс]. – режим доступа: [http://www.ru-energy.com/press\\_room/media\\_about/328/7506/](http://www.ru-energy.com/press_room/media_about/328/7506/) (дата обращения: 18.06.2015)

2. Ивановский В.Н. Анализ современного состояния и перспектив развития скважных насосных установок для добычи нефти // Территория Нефтегаз. – ноябрь, 2007. – №11. – С. 36- 47.

3. Разработка месторождения «Приразломное». [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://shelf-neft.gazprom.ru/d/blockonthemainpage/04/4/prezentatsiya-proekta-prirazlomnoe.pdf> (дата обращения: 18.06.2015)

4. Моисеева Е.В. Состояние и перспективы развития нефтесервисного рынка России 2014 // Нефтегазовая Вертикаль. – 2014. – №22. – С. 64-72

5. Лопатин Р.Р. Модели и алгоритмы частотно-регулируемого процесса расклинивания электроцентробежного насоса при добыче нефти в осложненных условиях: дис. ... канд. тех. наук. – Томск, 2011 – 140 с.

6. Исследования малодебитных скважин в России. [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.slb.ru/userfiles/file/Oilfield%20Review/1999/spring/1%20testing.pdf> (дата обращения: 18.06.2015)

7. Ивановский В.Н., Сабиров А.А. Скважинные насосные установки для добычи нефти – что нового? // Территория Нефтегаз. – 2010, - № 10. – С. 14-22

8. Ивановский В.Н., Дарищев В.И., Сабиров А.А. и др. Скважные насосные установки для добычи нефти. – М. ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2002 – 824 с.

9. Пат. №2119578 РФ МПК6 E21B43/00. Способ эксплуатации малодебитной скважины элеткронасосом с частотно-регулируемым приводом/В.Г. Ханжин; заявитель и патентообладатель В.Г. Ханжин. - № 97110817/03; заявл. 19.06.97; опубл. 27.09.98

10. Мельниченко В.Е. Увеличение эффективности механизированной добычи нефти // Нефтегазовая Вертикаль. – 2013, – №11. – С. 62-66.

11. Худяков Д.Л., Маркелов Д.В. Интеллектуальные станции управления УЭЦН // Нефтегазовая вертикаль. – 2011, – № 11. – С. 64-68

12. Макаров В.Г. Асинхронный электропривод электромеханических систем с оптимальными режимами работы по критерию энергосбережения: Автореф. дис. ... канд. тех. наук. – Казань, 2011. – 162 с.

13. Каширских В.Г. Динамическая идентификация асинхронных двигателей: Автореф. дис. ... доктор тех. наук. – Кемерово, 2005. – 133 с.
14. Агеев Ш.Р., Берман А.В., Джалаев А.М., Дроздов А.Н. Оборудование для добычи нефти с высоким содержанием свободного газа и опыт его эксплуатации // Сборник материалов конференции "ESP Workshop 2005". – 2010. – № 1. – С. 1–10.
15. Федотов А.В. Хомченко В.Г., Жильцов В.В. и др. Моделирование привода погружного насоса интеллектуальной скважины. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012. – 175 с.
16. Боловин Е. В. Критический экспертный анализ методов идентификации параметров асинхронных двигателей // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2015 – №. 1(58). – С. 7–27
17. Y. Koubaa. Recursive identification of induction motor parameters // Simulation modeling practice and theory. – 2004. – pp. 363–381.
18. Evgeniy V. Bolovin, Alexander S. Glazyrin, Vladimir N. Brendakov. The influence of the design method for induction motor with stationary rotor on identification of its parameters // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), – 2015 – pp. 1–7.
19. Chang Shu. Differential Quadrature and its Application in Engineering: Engineering Application. – Springer, 2000. – 340 p.
20. Burden R.L., Faires J.D. Numerical Analysis, 7th Ed. – Brooks/Cole, 2000. – 837 p.
21. Пат. №151954 РФ G01R 31/34. Устройство для определения параметров асинхронного электродвигателя Боловин Е.В., Глазырин А.С., Глазырина Т.А. и др. - № 2014128182/28; заявл. 09.07.2014; опубл. 20.04.2015, бюл. №11. – 9 с.: ил.
22. Bolovin E., Glazyrin A., Polishchuk V. Induction Motor Drive Parameters Identification Applying Difference Schemes // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – pp. 65–68.
23. Руководство пользователя плат 6023E/6024E/6025E. Многофункциональные платы ввода/вывода для компьютеров с шинами PCI, PXI и CompactPCI. Copyright 1999 National Instruments Corporation, Редакция от 01.1999. Перевод с английского, верстка: Галишников К.Ю., 2001. 116 с.
24. Dranitsya Yu.P., Dranitsya A.Yu., Alekseevskaya O.V. On a connection between continuous and discrete models of linear dynamical systems. Dynamical Systems & Differential Equations. – 2010. – № 3. – pp. 20–57.
25. Kotelnikov V.A. On the carrying capacity of the ether and wire in telecommunications. Material for the First All-Union Conference on Questions of Communication. – Moscow, Izd. Red. Upr. Svyazi RKKA, 1933. – 476 p.
26. Küpfmüller K. Utjämningsförlopp inom Telegraf- och Telefontekniken. Transients in telegraph and telephone engineering. – Teknisk Tidskrift, – 1931. – № 9. – pp. 153–160.