

УДК 622.24.05:681.5.015

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТИРОВАНИЕМ БУРОВОГО СНАРЯДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОРЕГУЛЯТОРА NEURAL NETWORK CONTROLLER

КОВШОВ Г. Н.¹, *д.т.н., проф.*,
УЖЕЛОВСКИЙ А.В.², *ассистент*

¹ Кафедра информационно-измерительных технологий и систем, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 471629, e-mail: klabuk37@mail.ru

² Кафедра автоматики и электротехники, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 471700, e-mail: uadron@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-5228-2463

Аннотация. *Цель* - разработка и исследование нейросетевой системы управления с обратными связями по угловой скорости поворота верхней и нижней части буровой колонны. *Методика.* Для изменения направления бурения было предложено использовать усовершенствованный метод установки в заданное положение бурового снаряда путем поворота всей буровой колонны с использованием отклоняющего устройства. Причем, к колонне было предъявлено особое требование: недопустимость перерегулирования и также недопустим реверс. То есть переходный процесс должен носить экспоненциальный. *Результаты.* Разработана и исследованная имитационная модель замкнутой системы управления ориентированием положения бурового снаряда с применением Neural Network Controller. Результаты имитационного моделирования показали, что для получения желаемого переходного процесса система автоматизированного управления должна быть обучена супервизорному управлению. *Научная новизна.* Усовершенствованная система автоматизированного регулирования управления ориентированием положения бурового инструмента путем учета ее динамических параметров и использования супервизорного управления для обеспечения отработки угла в процессе поворота буровой колонны. Полученная имитационная модель дает возможность определить угол отставания бурового снаряда от верхней части буровой колонны при ориентированной установке его на забое скважины и прогнозировать для разных глубин его максимальное значение. *Практическая значимость.* Внедрение супервизорного управления, применив Neural Network Controller. Neural Network Controller даст возможность обучить замкнутую систему управления положением бурового снаряда с обратными связями по угловой скорости поворота ротора бурового станка и бурового снаряда.

Ключевые слова: нейроконтроллер, электромеханическая система, имитационное моделирование, критерий устойчивости САР, супервизорное управление

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ОРІЄНТУВАННЯ БУРОВОГО СНАРЯДУ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОРЕГУЛЯТОРА NEURAL NETWORK CONTROLLER

КОВШОВ Г. М.¹, *д.т.н., проф.*,
УЖЕЛОВСЬКИЙ А.В.², *асистент*

¹ Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій і систем, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 471629, e-mail: klabuk37@mail.ru

² Кафедра автоматики та електротехніки, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 471700, e-mail: uadron@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-5228-2463

Анотація. *Мета* - розробка та дослідження нейронмережевої системи управління із зворотними зв'язками по кутовий швидкості повороту верхньої та нижньої частини бурової колони. *Методика.* Для зміни напрямку буріння було запропоновано використовувати удосконалений метод установки в задане положення бурового снаряда шляхом повороту всієї бурової колони з використанням відхилюючого пристрою. Причому, до колони було пред'явлено особливі вимоги: неприпустимість перерегулювання і також неприпустиме реверс. Тобто перехідний процес повинен носити експонентний. *Результати.* Розроблена і досліджена імітаційна модель замкнутої системи управління орієнтуванням положення бурового снаряда із застосуванням Neural Network Controller. Результати імітаційного моделювання показали, що для отримання бажаного перехідного процесу система автоматизованого управління повинна бути навчена супервизорного управління.

Наукова новизна. Удосконалена система автоматизованого регулювання управління орієнтуванням положення бурового інструменту шляхом врахування її динамічних параметрів і використання супервізорного управління для забезпечення відпрацювання кута в процесі повороту бурильної колони. Отримана імітаційна модель дає можливість визначити кут відставання бурового снаряда від верхньої частини бурильної колони при орієнтованій установці його на вибої свердловини і прогнозувати для різних глибин його максимальне значення. **Практична значимість.** Впровадження супервізорного управління, застосувавши Neural Network Controller. Neural Network Controller дасть можливість навчити замкнуту систему керування положенням бурового снаряда із зворотними зв'язками по кутовій швидкості повороту ротора бурового верстата і бурового снаряда.

Ключові слова: нейроконтролер, електромеханічна система, імітаційне моделювання, критерій стійкості CAP, супервізорне управління.

CONTROL SYSTEM ORIENTING THE DRILL NEUROREGULATORS USING NEURAL NETWORK CONTROLLER

KOVSHOV G.N.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*
UZHELOVSKY A.V.², *assistant*

¹ Department of Information Measuring Technology and Systems, State Higher Educational Institution " Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, Tel. +38 (0562) 471629, e-mail: klabuk37@mail.ru

² Department of Automation and Electrical Engineering, State Higher Educational Institution " Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, Tel. +38 (0562) 471700, e-mail: uadron@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-5228-2463

Abstract. Purpose. The goal - development and research of the neural network control system with feedback on the angular velocity of rotation of the upper and lower part of the drill string. **Methodology.** To change the direction of drilling has been proposed to use an improved method for the positioning of the drill by rotating the entire drill string using a diverter. Moreover, the column was brought to a special requirement: the inadmissibility of overshoot and also unacceptable reverse. That is, the transition process should be exponential. **Findings.** Developed and researched simulation model of the closed position control orientation of the drill using Neural Network Controller. Simulation results showed that to produce the desired transition process automated control system should be trained supervisory control. **Originality.** Advanced computer-aided control management orientation position the drilling tool by taking into account its dynamic parameters and the use of supervisory control to ensure that the process of working out the angle of rotation of the drill string. The resulting simulation model makes it possible to determine the angle of the drill gap from the top of the drill string at-oriented setting it on the bottom of the well and forecast for different depths of its maximum value. **Practical value.** Implementation of supervisory control, using Neural Network Controller. Neural Network Controller will provide an opportunity to teach a closed system controlling the position of the drill with the feedback of the angular velocity of rotation of the rotor drilling rig and drill.

Keywords: neurocontroller, electromechanical system, simulation, stability criterion ATS supervisory control

Введение

Ориентирование бурового инструмента в процессе бурения на сегодняшний день остается как никогда актуальным, поскольку требования к точности установки направления бурения с каждым годом возрастают. Это связано в первую очередь из-за истощения нефтяных и газовых ресурсов, что влечет за собой необходимость проведения поисковых работ по добычи природных ресурсов на более глубоких месторождениях. В Украине большое количество известных месторождений нефти и газа, которого достаточно, чтобы удовлетворить потребности всех жителей и предприятий на долгие десятилетия. Однако, в настоящее время используемые буровые установки не достаточно эффективны и не дают возможности добывать нефть и газ в нужном количестве. Что приводит к необходимости их модернизации для добычи полезных ископаемых на больших глубинах. Для этого нужно разработать эффективную систему

управления установкой в заданное положение бурового снаряда, обеспечивающую высококачественное, рациональное супервізорное регулирование технологическим процессом.[6]

Нейросетевые системы управления являются альтернативой классическим методам построения систем управления нелинейными объектами. Использование искусственных нейронных сетей позволяет решать задачи управления нелинейными объектами, в то время как традиционные методы не обеспечивают решения подобных задач.

В настоящее время проводятся большие работы по применению нейронных сетей в системах управления. В [1] рассмотрены вопросы теории и методы синтеза систем управления нелинейными динамическими объектами на основе обучаемых многослойных сетей. Значительное внимание уделено фундаментальным свойствам нелинейных многослойных нейросетей и алгоритмам их обучения в реальном времени. В [2] приведены базовые функциональные структуры нейросетевых

динамических систем управления и идентификации состояния. В многочисленных публикациях, например [3, 4] показана эффективность использования нейросетевых структур для регулирования координат многомассовых электромеханических систем с отрицательным вязким трением. В работах рассматриваются вопросы синтеза современных регуляторов электромеханических систем на основе методов фазы – логики, нейронных сетей и генетических алгоритмов. В результате исследований разработана методика синтеза гибридной нейронной сети, реализующая принцип действия фазы регулятора, позволившая автоматически с помощью компьютера определить требуемые параметры регулятора. Анализ последних достижений и публикаций по синтезу нейросетевых систем управления нелинейными динамическими объектами показывает, что данное направление является перспективным.

Цель

Целью статьи является разработка и исследование нейросетевой системы управления с обратными связями по угловой скорости поворота верхней и нижней части буровой колонны.

Методика

Для изменения направления бурения было предложено использовать усовершенствованный метод установки в заданное положение бурового снаряда путем поворота всей буровой колонны с использованием отклоняющего устройства. Причем, к колонне было предъявлены особые требования: недопустимость перерегулирования и также недопустим реверс. То есть переходной процесс должен носить экспоненциальный.

В [5] указывается, что в реальных схемах необходимо учитывать влияние упругих звеньев, так как они могут существенно влиять на динамику системы и точность в установившихся режимах. Даже, если главная обратная связь выполнена по углу поворота вала двигателя, влияние упругих звеньев сказывается на величинах статической и скоростной ошибок системы.

Воспользуемся изложенным в [5] описанием движения механической системы применительно для нашего случая и представим расчетную схему управления положением отклонителя и бурового снаряда двухмассовой схемой замещения, с учетом того, что отклонитель бурового инструмента связан с ротором бурового стола буровой колонной, упругой связью жесткости C , а также учтем влияние диссипативных сил. В нашем случае диссипативной силой является вязкое трение, так как в виду большой длины буровой колонны при повороте ротора бурового станка возникает ее деформация. Силы вязкого трения являются внутренними диссипативными силами. Они пропорциональны скорости деформации элемента и направлены

противоположно скорости деформации [4]. Возникающий при этом тормозной момент вязкого трения может быть выражен формулой:

$$M_{в.т.} = \beta_{12}(\omega_1 - \omega_2), \quad (1)$$

где $M_{в.т.}$ - момент вязкого трения; ω_1, ω_2 - угловые скорости концов деформируемой буровой колонны; β_{12} - коэффициент вязкого трения.

Наличие внутреннего вязкого трения на структурной схеме (рис.1) показано включением параллельно упругой связи механическим демпфером.

Структурная схема двухмассовой механической системы в этом случае будет иметь вид, представленный на рис.1. Ее параметрами являются приведенные моменты инерции J_1, J_2 и эквивалентная приведенная жесткость безынерционной механической упругой связи C_{12} между J_1, J_2 . В нашем случае первая масса J_1 представляет собой ротор двигателя, ротор бурового станка и жестко связанные с ним элементы. На эту массу действуют момент двигателя M и момент сопротивления M_{c1} , который является суммарным моментом потерь на валу двигателя и в жестко с ним связанных элементах. К массе J_2 приложен момент сопротивления M_{c2} , представляющий собой сумму приведенного момента сопротивления движению буровой колонны и приведенных моментов потерь на трение в жестко с ней связанных элементах кинематической цепи (отклонитель, породоразрушающий инструмент и др.).

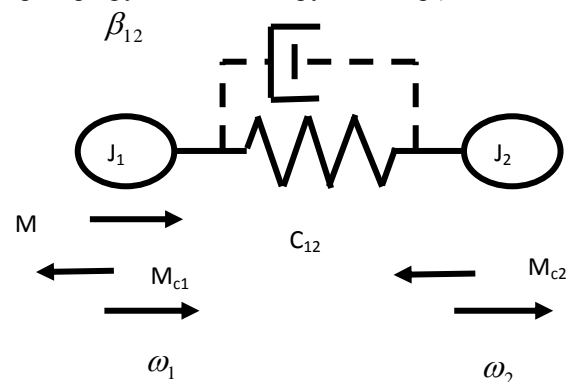


Рис.1 Обобщенная двухмассовая механическая схема электропривода. / Generalized two-mass mechanical of the electric circuit.

Коэффициент упругой жесткости буровой колонны зависит от многих факторов: материала буровых труб, длины буровой колонны, диаметра буровой колонны [5]. Из [4] известно, что максимальный допустимый крутящий момент и допустимый максимальный угол закручивания взаимосвязаны и зависят от прочности труб. Воспользуемся приведенными данными в [5], где приведены допустимые максимальные значения крутящего момента и соответствующие ему допустимые углы закручивания буровой колонны, для различной ее длины и материала труб. Для буровых труб ПК-114*8,56 максимальный допустимый крутящий момент, в зависимости от материала труб находится в пределах от 30630 Н*м до 58520 Н*м и при длине буровой колонны 4000 м среднее значение угла закручивания принимаем - $\Delta\varphi_i = 120$ рад.

В работах [5,6,7] разработана система управления ориентацией бурового снаряда, которая учитывает динамику буровой колонны и дает возможность учесть ее угол рассогласования верхней и нижней части с помощью PID – законов регулирования. Однако исследования показали, что для управления системы такого вида необходимо внедрить супервизорное управление, применив Neural Network Controller. Neural Network Controller даст возможность обучить замкнутую систему управления положением бурового снаряда с обратными связями по угловой скорости поворота ротора бурового станка и бурового снаряда.

Для этого система была обучена согласно эталонной экспоненты переходного процесса. Имитационная модель системы с использованием Neural Network Controller имеет вид:

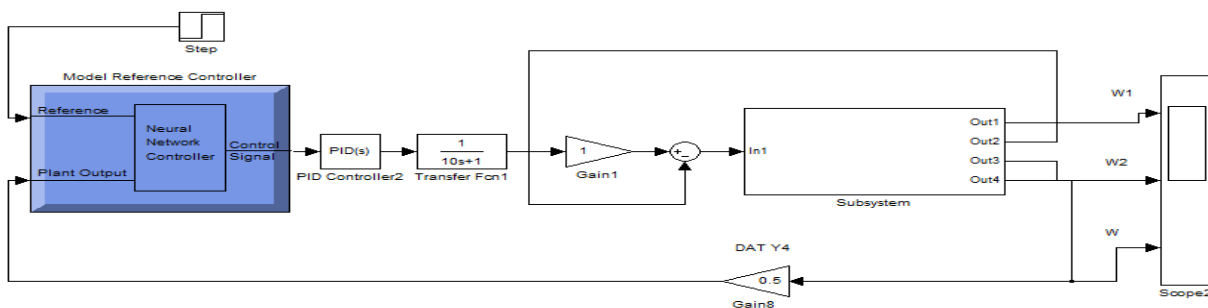


Рис. 2 Имитационная модель замкнутой системы управления ориентированием бурового снаряда с применением NEURAL NETWORK CONTROLLER. NEURAL / Simulation model of closed-loop control orientation of the drill using NEURAL NETWORK CONTROLLER. NEURAL

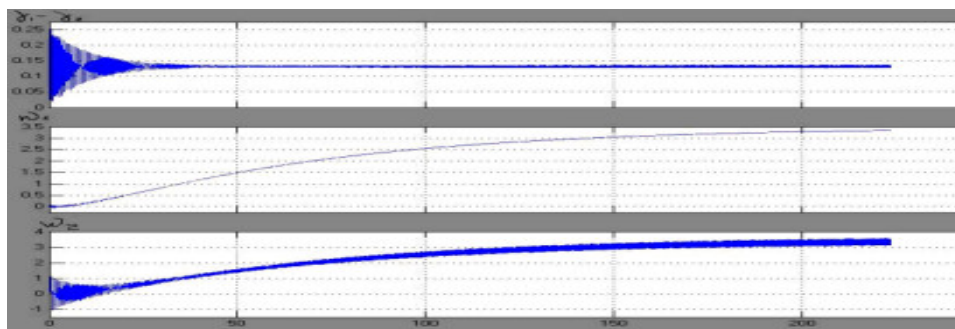


Рис. 3. Переходной процесс замкнутой системы управления ориентированием бурового снаряда с применением NEURAL NETWORK CONTROLLER. / Transients closed loop control orientation of the drill using NEURAL NETWORK CONTROLLER.

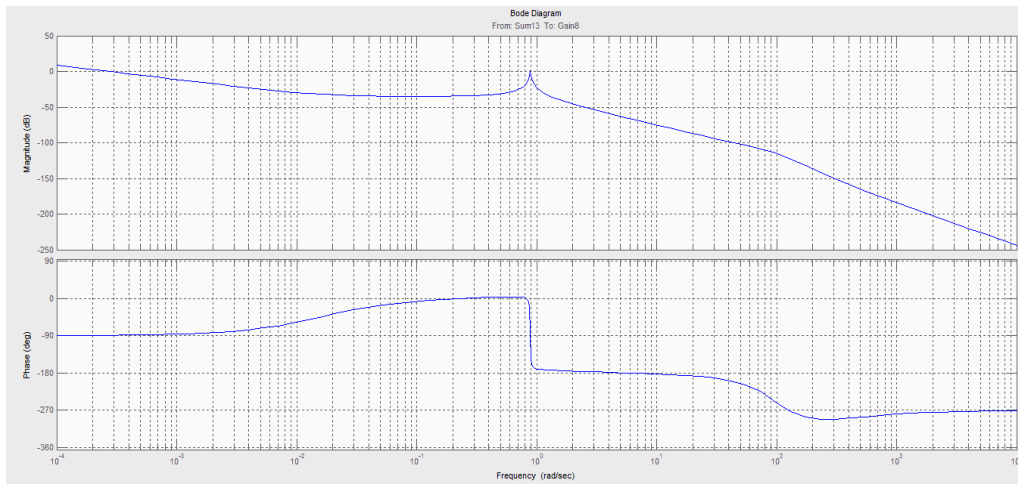


Рис. 4. ЛАЧХ и ЛФЧХ системы управления положением бурового инструмента / LACHH and LFCHH position control system of the drilling tool

Результаты

На переходных процессах видно, что примененный нейроконтроллер с супервизорным обучением дал возможность получить удовлетворительные переходные процессы при реализации поставленных задач. Переходные процессы носят экспоненциальный характер и не имеют перерегулирование, что в свою очередь дает возможность оператору, для корректировки траектории скважины, выполнить поворот буровой колонны с высокой точностью.

Научная новизна и практическая значимость

Усовершенствованная система автоматизированного регулирования управления ориентированием положения бурового инструмента путем учета ее динамических параметров и использования супервизорного управления для обеспечения отработки угла в процессе поворота буровой колонны. Полученная имитационная модель дает возможность определить угол отставания бурового снаряда от верхней части буровой колонны при ориентированной установке его на забое скважины и прогнозировать для разных глубин его максимальное значение. **Практическая значимость.** Внедрение супервизорного управления, применив Neural Network Controller. Neural Network Controller даст возможность обучить замкнутую систему управления положением бурового инструмента с обратными связями по угловой скорости поворота ротора бурового станка и бурового инструмента.

Выводы

1. Разработана и исследованная имитационная модель замкнутой системы управления ориентированием положения бурового инструмента с применением NEURAL NETWORK CONTROLLER. Результаты имитационного моделирования показали, что для получения желаемого переходного процесса система автоматизированного управления должна быть обучена супервизорному управлению.
2. Полученная имитационная модель дает возможность определить угол отставания бурового инструмента от верхней части буровой колонны при ориентированной установке его на забое скважины и прогнозировать для разных глубин его максимальное значение.
3. Установлена величина влияния динамических параметров буровой колонны в электромеханической системе. Проведенные исследования, по Логарифмическому критерию, на устойчивость работы системы управления подтверждают ее работоспособность. Система устойчива при коэффициентах обратной связи 0,05; 0,5; 1. Запас по фазе при $K_{\text{вз}} = 0,05$ равен 90° , а по амплитуде – 52 дБ; запас по фазе при $K_{\text{вз}} = 0,5$ равен 115° , а по амплитуде – 38 дБ, запас по фазе при $K_{\text{вз}} = 1$ составляет 126° , а по амплитуде – 24 дБ. Полученные зависимости подтверждают неустойчивость работы электромеханической системы при значении коэффициента обратной связи $K_{\text{вз}} = 50$ и работе на грани устойчивости при $K_{\text{вз}} = 5$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Терехов, Д. В. Нейросетевые системы управления / В. А. Терехов, Д. В. Ефимов, И. Ю. Тюкин. – Москва: Транспорт, 2002. – 480 с.

Terekhov V.A., Efimov D.V., Tyukin I.Yu. *Neurosetevye sistemy upravleniya* [Neural network management system], Moscow, Transport, Publ., 2002. 480 p.

2. Бодянский, Е. В. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения. / Е. В. Бодянский, О. Г. Руденко. – Харьков: Телетех, 2004. – 264 с.

Bodyanskiy E.V., Rudenko O.G. *Iskusstvennye neyronnye seti: arkhitektury, obuchenie, primeneniya*. [Artificial neural networks: architecture, education, application]. Kharkov, Teletekh, Publ., 2004. 264 p.

3. Клепиков, В. Б. Синтез двухмассовой электромеханической системы с отрицательным вязким трением при регулировании по полному и неполному вектору состояния / В. Б. Клепиков, И. С. Полянская // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". - Харків: Національний технічний університет – 2001. – Вип.10. – С. 36-40.

Klepikov V.B., Polyanskaya I.S. Sintez dvukhmassovoy elektromekhanicheskoy sistemy s otritsatelnyim vyazkim treniem pri regulirovaniy po polnomu i nepolnomu vektoru sostoyaniya [Synthesis of two-mass electromechanical system with a negative viscous friction in the regulation of full and part state vector], *Visnyk Natsionalnogo tehničnogo universitetu "Harkivskiy politekhnichniy institut", Natsionalnyy tekhnichnyy universitet*, [Bulletin of the National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute], 2001, issue 10, pp. 36-40.

4. Клепиков, В. Б. Синтез гибридной нейронной сети для двухмассовой ЭМС при срывных фрикционных автоколебаниях / В.Б. Клепиков, П. Л. Моисеенко, Ю. А. Цепковский // Вестник Национального технического университета" : Сборник научных трудов "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика". – Харьков, 2003. – Вып.10 – С. 512-514.

Klepikov V.B., Moiseenko P.L., Tsepkovskiy Yu.A. Sintez gibridnoy neyronnoy seti dlya dvukhmassovoy EMS pri sryivnykh friktsionnykh avtokolebaniyakh [Synthesis of hybrid neural network for two-mass EMC in blasting frictional self-oscillations] / *Vestnyk Natsionalnogo tehničeskogo universiteta": Sbornik nauchnykh trudov "Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda*. [Journal of the National Technical University, the Scientific collections of Labor Problems avtomatizirovannoho electric engine. Theory and practice], Kharkov, 2003, issue10, pp. 512-514.

5. Кузнецов, Б. И. Разработка нейросетевой системы наведения и стабилизации вооружения легкобронированных машин. / Б. И. Кузнецов, Т. Е. Василец, А. А. Варфоломеев // Сборник научных трудов Харьковского университета Воздушных сил. Электротехника и электромеханика. – Харьков, 2008. – №2. – С. 31-34.

Kuznetsov B. I., Vasilets T. E., Varfolomeev A.A. Razrabotka neyrosetevoj sistemy navedeniya i stabilizatsii vooruzheniya legkobronirovannykh mashin. [Development of neural network guidance and stabilization of the arms lightly armored vehicles.] / *Sbornik nauchnykh trudov Kharkovskogo universiteta Vozdushnykh sil. Elektrotehnika i elektromekhanika*. [Collections of the Scientific Labor of Kharkiv Air Force University.], 2008. issue 2, pp. 31-34.

6. Кузнецов, Б. И. Побудова нейромережевої системи курування нелінійною електромеханічною системою з використанням нейроконтролера з передбаченням. / Б. И. Кузнецов, Т. Е. Василец, А. А. Варфоломеев // Вісник Харківського політехнічного університету. Електроінформ. – Харків, "Екоінформ" –2008. – №1.–С. 6-10.

Kuznetsov B.I., Vasylets T.Ye. Varfolomeev A.A. Pobudova neiromerezhivoi systemy keruvannya nelineynoiu elektromekhanichnoiu systemoiu z vykorystanniam neirokontrolera z peredbachenniam. [Construction of neural network control system of nonlinear electromechanical systems using predictive neurocontroller] / *Visnyk Kharkovskogo Politekhnicheskogo universiteta*. [Bulletin of the Kharkiv

Polytechnic University], *Elektroinform*. – : "Ekoinform" , 2008, issue 1, pp. 6-10

7. Синтез и исследование нейросетевой системы управления нелинейным динамическим объектом. / Б. И. Кузнецов, Т. Е. Василец, В. В. Коломиец, А. Е. Машнев, А. А. Варфоломеев // Машиностроение и техносфера XXI века: Сборник трудов Донецкого национального технического университета, – Донецк: 2008. Вип. 2. – С. 165-169.

Kuznetsov B.I., Vasilets T.E., Kolomiets V.V., Mashnev A.E., Varfolomeev A.A. Sintez i issledovanie neyrosetevoj sistemy upravleniya nelineynym dinamicheskim ob'ektom. [Synthesis and study of the neural network control system of nonlinear dynamic object], *Mashinostroenie i tekhnosfera XXI veka: Sbornik trudov Donetskogo natsionalnogo univerciteta*, [Labor collections of the National Technical University of Donetsk], 2008, issue 2, pp. 165-169.

8. Ковшов Г. Н. Разработка и исследование имитационной модели управления электроприводом ротора бурового станка, учитывающая влияние динамических параметров бурильной колонны при пространственном ориентировании бурового снаряда в скважине./ Г. Н. Ковшов, А. В. Ужеловский // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2014. – Вип. 44. – С. 25-30.

Kovshov G.N., Uzhelovskiy A.V. Razrabotka i issledovanie imitatsionnoy modeli upravleniya elektroprivodom rotora burovogo stanka, uchityvayushchaya vliyaniye dinamicheskikh parametrov burilnoy kolonny pri prostranstvennom orientirovaniy burovogo snaryada v skvazhine. [Development and research of simulation model of motor control rotor drilling rig, which takes into account the effect of the dynamic parameters of the drill string in the spatial orientation of the drill in the hole] / *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho hirnychoho universytetu. – Dnipropetrovsk: Natsionalnyi hirnychiy universytet*, [Proceedings of the National Mining University], 2014, issue 44, pp. 25-30.

9. Кузнецов, Б. И. Система управления нелинейным динамическим объектом с нейрорегулятором. Электротехника и Электромеханика. 2009, Вип. 2 С. 39-42.

Kuznetsov B.I. Sistema upravleniya nelineynym dinamicheskim ob'ektom s neyroregulyatorom. [The control system of nonlinear dynamic object with Nero regulator] *Elektrotehnika i Elektromehanika - Electrical engineering and Electromechanics*, 2009, issue 2, pp. 39-42.

10. Омату С. Нейроуправление и его приложения, пер. с англ. / С. Омату. – Москва: «Радиотехника», 2000. – 272 с.

Omatu, S. *Neyroupravlenie i ego prilozheniya*. [Neurocontrol and applications first, from English]. Moscow, *Radiotekhnika* Publ., 2000. 272 p.

11. Різник, А. М. Динамічні рекурентні нейронні мережі / А.М. Різник // Математичні Машини і Системи. – 2009. – № 2. – С. 3-26.

Riznyk A. M. Dynamichni rekurentni neironni merezhi/ [Dynamic Recurrent Neural Networks], *Matematychni Mashyny i Systemy*. 2009, issue 2, pp. 3-26.

12. Стюарт Р. Искусственный интеллект: современный подход, 2-е изд.: пер. с англ. / Р. Стюарт. – Москва: Издательский дом "Вильямс", 2006. – 548 с.

Styuart R. *Iskusstvennyy intellekt: sovremennyy podkhod*, [Artificial Intelligence: Modern approach]. Moscow, Publishing house "Williams", 2006. 548 p.