

УДК 665.6/.7

А.Г. Шумихин¹, А.О. Колыхматов²¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия²ООО «Промышленная кибернетика», Пермь, Россия

ИДЕНТИФИКАЦИЯ БЛОКА ПОДОГРЕВА НЕФТИ УСТАНОВКИ АТМОСФЕРНО-ВАКУУМНОЙ ТРУБЧАТКИ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

В статье представлены результаты идентификации каналов блока подогрева сырой нефти установки атмосферно-вакуумной трубчатки (АВТ) нефтеперерабатывающего предприятия, представляющего собой систему теплообменников, с применением динамической нейронной сети (НС). Обученная НС-модель позволяет моделировать динамику технологического объекта (тренды изменения технологических параметров) и идентифицировать его с применением методов активного эксперимента на НС передаточными функциями.

Одним из блоков установки АВТ является система теплообменных аппаратов, предназначенная для подогрева сырой нефти за счёт рекуперации тепла обращающихся на установке продуктов. В условиях изменяющихся расходов сырой нефти и греющих агентов, подаваемых в систему теплообменников с определенной технологической топологией их соединения, с целью повышения степени рекуперации тепла греющих агентов существуют задачи оптимизации топологии технологической схемы блока теплообменных аппаратов и распределения сырой нефти, поступающей тремя потоками.

Для случая заданной структуры технологической схемы процесса и стабильной подачи общего потока нефти и греющих агентов задача решается методами статической оптимизации, целевой функцией в которой является теплосодержание потока подогретой нефти на выходе блока теплообмена. Тогда задача управления будет заключаться в стабилизации системами автоматического регулирования расходов потоков нефти на рассчитанных оптимальных значениях.

Однако, например, при изменяющихся во времени расходах нерегулируемых потоков греющих агентов или при изменении расхода общего потока сырой нефти задача оптимизации должна решаться как динамическая с алгоритмами оптимального управления, которые предполагают наличие математических моделей динамики управляемого объекта.

Ключевые слова: нефтепереработка, установка АВТ, система теплообмена, управление, моделирование, идентификация, нейронная сеть.

A.G. Shumikhin¹, A.O. Kolykhmatov²

¹Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

²«Industrial cybernetics» LLC, Perm, Russian Federation

IDENTIFICATION OF ADU\VDU'S OIL HEATING BLOCK AS A CONTROL OBJECT WITH USING THE DYNAMIC NEURAL NETWORK

The article presents the results of channel identification of ADU\VDU's crude oil heating block of refinery, which is a system of heat exchangers, with using the dynamic neural network. Trained neural network model can simulate the dynamics of a technological object and identify it by the transfer functions.

One of the blocks of ADU\VDU is the system of heat exchangers designed to heat the crude oil by recuperating the heat of the unit's products. In conditions of changing the flow rate of crude oil and heating agent, supplied to the system of heat exchangers with specific technological topology of their connection, in order to increase the heat recovery rate of heating agents, there are problems of optimizing the topology of the technological scheme of the heat exchangers block and the distribution of crude oil coming in three streams.

In the case of a given process flow diagram structure and a stable supply of the total oil flow and heating agents, the problem is solved by static optimization methods. Wherein the target function is the flow enthalpy of heated oil at the output of heat exchangers block. Then the control task will be in stabilization by systems of automatic regulation of oil flow rates at the calculated optimal values.

However, for example, with variable flow rates of unregulated flows of heating agents or, with a change in the total crude oil flow rate, the optimization problem must be solved as a dynamic system with optimal control algorithms that assume the existence of mathematical models of the dynamics of the controlled object.

Keywords: oil refining, ADU\VDU, heat exchange system, control, modeling, identification, neural network.

В работах [1, 2] представлен пример статической оптимизации блока подогрева сырой нефти. Решена задача статической оптимизации блока подогрева установки АВТ с актуализацией решения в компьютерно-тренажерном комплексе на нефтеперерабатывающем предприятии с целью оптимизации распределения потоков сырой нефти, поступающей на установку. Для решения задачи статической оптимизации использованы два метода: «метод сканирования» и «метод Бокса». Анализ результатов проведенного вычислительного эксперимента показывает, что оба метода дают одинаковый результат – увеличение температуры нефти на выходе из системы теплообменников блока подогрева. Это позволяет сократить расход топливного газа на установку, т.е. снизить затраты на производство [3].

Применение методов динамической оптимизации позволяет решить задачу оптимального управления распределением потоков нефти

при неустановившихся режимах эксплуатации, в частности, при переходе с одного режима функционирования установки АВТ на другой. Для решения этой задачи необходима динамическая математическая модель объекта управления [4, 5, 6, 7]. Для идентификации объекта почти во всех известных способах необходимо задавать тестовые, испытательные воздействия и исследовать выходной сигнал объекта. Во многих случаях нарушение нормального функционирования объекта тестовым сигналом недопустимо [8, 9]. Для этого в работе [10, 11] представлен пример идентификации каналов «вход-выход» с запаздыванием объекта при случайных помехах на входе на основе применения нейронных сетей. Обученная на примерах режимов функционирования технологического объекта модель в виде динамической нейронной сети имитирует его поведение и позволяет получить в вычислительном эксперименте отклик объекта, в том числе и на периодические испытательные воздействия. Значения параметров передаточной функции канала могут быть определены при этом с использованием полученной экспериментальной комплексной частотной характеристики.

Объектом исследования является блок теплообмена установки АВТ нефтеперерабатывающего предприятия. Блок теплообмена включает в себя 3 регулируемых потока сырой нефти, 8 потоков теплоносителей, включающих 2 регулируемых потока мазута, и 28 теплообменников, связанных между собой как последовательно, так и параллельно. Структурная схема блока теплообмена показана на рис. 1.

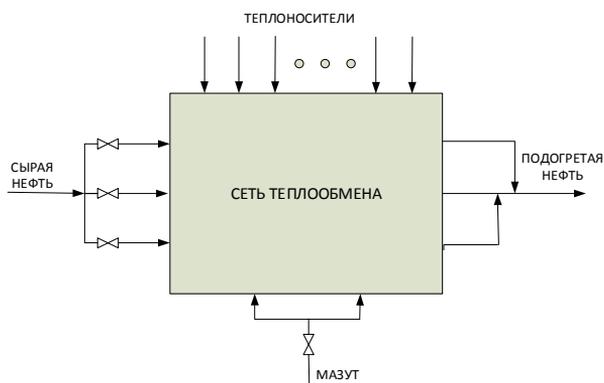


Рис. 1. Структурная схема блока теплообмена

Для идентификации объекта была построена динамическая нейронная сеть [12, 13, 14, 15, 16, 17]. Использована модель нелинейной авторегрессии с внешними входами [18, 19]. Нейронная сеть имеет

16 внешних входов и 3 выхода. Количество нейронов в скрытом слое – 7. Выходами нейронной сети являются температуры потоков сырой нефти на выходе из блока теплообмена. Коэффициент корреляции между данными, «выгруженными» из АСУ реальной установки, и данными, полученными на обученной нейронной сети, позволяет оценить точность прогнозирования температуры потоков на выходе блока теплообмена. Значение коэффициента корреляции лежит в диапазоне 0,94–0,96.

Для оценки точности полученной НС проведен вычислительный эксперимент. Для этого из АСУ ТП взята новая выборка данных и подана на вход НС. Результат расчетов сравним с данными из взятых выборок. На рис. 2 представлены результаты эксперимента по тестированию НС.

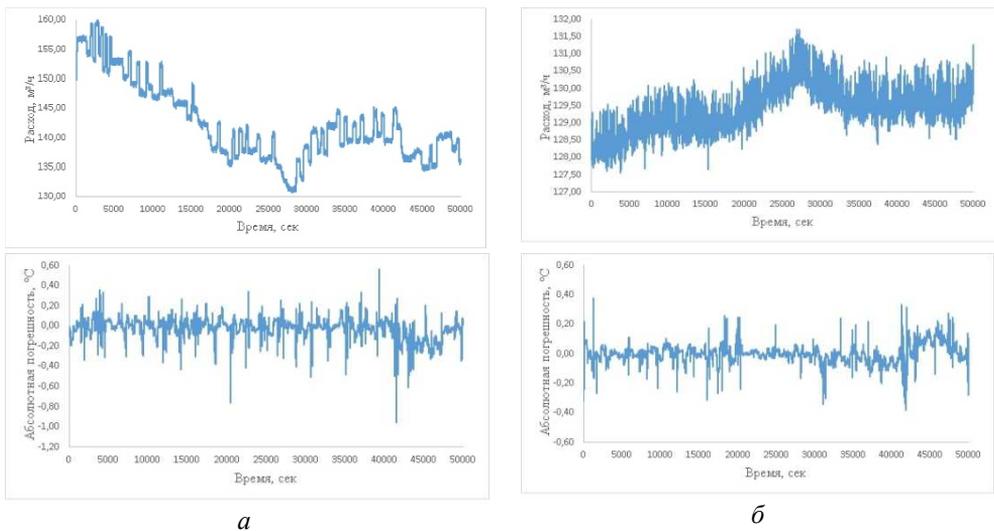


Рис. 2. Результаты тестирования НС: *а* – расход 1-го потока нефти, и абсолютная погрешность температуры 1 потока на выходе; *б* – расход 2-го потока нефти, и абсолютная погрешность температуры 2-го потока на выходе

С аналогичной точностью (см. рис. 2) получены результаты и по другим каналам вход-выход объекта управления.

С целью идентификации объекта на обученной нейронной сети проведен эксперимент по определению частотных характеристик каналов «вход-выход» [20, 21]. Входной синусоидальный сигнал реализован в диапазоне частот ω , равном 0,003–0,08 с^{-1} , с шагом 0,005.

В качестве примера на рис. 3 и 4 приведены результаты $W^{tent}(j\omega_v) = \text{Re}^{tent}(\omega_v) + j\text{Im}^{tent}(\omega_v)$ для каналов: расход 1-го потока нефти – температура на выходе 1-го потока нефти и расход 2-го потока нефти – температура на выходе 2-го потока нефти.

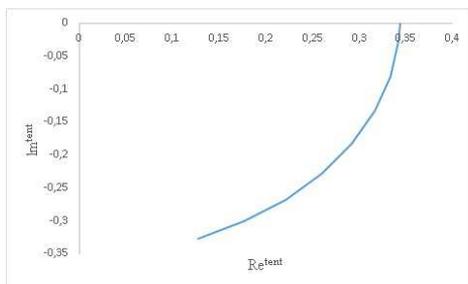


Рис. 3. Экспериментальная КЧХ по каналу: расход 1-го потока нефти – температура на выходе 1-го потока нефти

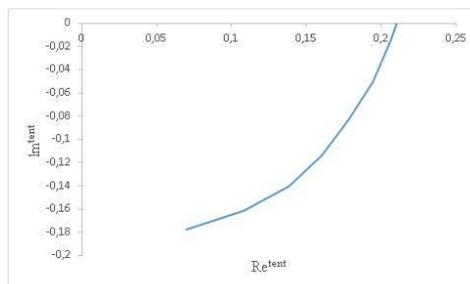


Рис. 4. Экспериментальная КЧХ по каналу: расход 2-го потока нефти – температура на выходе 2-го потока нефти

Составлено выражение для аппроксимирующей комплексной частотной характеристики (КЧХ) второго порядка по каналам «вход-выход»:

$$W^{Ap}(j\omega_v) = \frac{\kappa_{ob}}{(T_1 j\omega_v + 1)(T_2 j\omega_v + 1)} e^{-j\omega_v \tau}, \quad (1)$$

приведенное к виду:

$$W^{Ap}(j\omega_v) = \text{Re}^{Ap}(\omega_v) + j \text{Im}^{Ap}(\omega_v), v = \overline{1, N},$$

где N – число экспериментальных точек КЧХ.

Задача оценки параметров модели каждого канала по результатам эксперимента с нейронной сетью во всей области исследованных частот решена в соответствии с методикой, приведенной в работе [3], как оптимизационная, с минимизацией отклонения аппроксимирующей КЧХ канала от экспериментальной. Задача сформулирована в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\text{Re}^{tent}(j\omega_v) - \text{Re}^{Ap}(j\omega_v) \right)^2 + \left(\text{Im}^{tent}(j\omega_v) - \text{Im}^{Ap}(j\omega_v) \right)^2 \rightarrow \\ \min_{\kappa_{ob}, T_1, T_2, \tau} \left| \omega_v \in [0,003; 0,08], v = \overline{1, N} \right. \end{array} \right\} \quad (2)$$

Решение задачи минимизации (2) с квадратичной функцией ошибки для каждого из каналов передачи дает для них значение искоемых коэффициентов $\kappa_{ob}, T_1, T_2, \tau$. Решение получено с использованием программной среды компьютерной математики.

Полученная передаточная функция по каналу: расход 1-го потока нефти – температура на выходе 1-го потока нефти имеет вид:

$$W_1(s) = \frac{y_1(s)}{u_1(s)} = \frac{0,34}{254s^2 + 34,4s + 1} e^{-8,9s}. \quad (3)$$

Функция содержит запаздывание, что затрудняет её непосредственное использование в классических алгоритмах оптимизации динамических процессов. С целью исключения из выражения для $W_1(s)$ чистого запаздывания τ передаточная функция $e^{-8,9s}$ аппроксимирована разложением её в ряд Паде 3-го порядка. В результате получена передаточная функция, аппроксимирующая функцию (3), вида:

$$W_{1P}(s) = \frac{-0,34s^3 + 0,4584s^2 - 0,2575s + 0,05787}{254s^5 + 376,9s^4 + 239,8s^3 + 70,64s^2 + 6,613s + 0,1702}. \quad (4)$$

Аналогично получена передаточная функция канала расхода 2-го потока нефти – температура на выходе 2-го потока нефти, имеющая вид:

$$W_2(s) = \frac{y_2(s)}{u_2(s)} = \frac{0,2197}{6,794s^2 + 15,69s + 1} e^{-14,8s}, \quad (5)$$

и её аппроксимация с разложением $e^{-14,8s}$ в ряд Паде 5-го порядка:

$$W_{2P}(s) = \frac{-0,2197s^5 + 0,4394s^4 - 0,4101s^3 + 0,2187s^2 - 0,06562s + 0,008749}{7s^7 + 30s^6 + 46,07s^5 + 38,84s^4 + 19,89s^3 + 66,053s^2 + 0,9358s + 0,03982}. \quad (6)$$

При синтезе алгоритма оптимального распределения потока сырой нефти в системе теплообмена полученные модели целесообразно представить в общем виде в форме уравнений пространства состояний:

$$\dot{\vec{x}} = A\vec{x} + B\vec{u}, \quad \vec{y} = C\vec{x} + D\vec{u}. \quad (7)$$

Ниже в матричной форме представлены коэффициенты системы (7), соответствующие коэффициентам передаточной функции (4):

$$A_1 = \begin{bmatrix} -1,49 & -0,94 & -0,278 & -0,104 & -0,43 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,25 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,0625 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$B_1 = [0,125 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0],$$

$$C_1 = [00 \quad -0,0107 \quad 0,0145 \quad -0,0325 \quad 0,1169],$$

$$D_1 = 0$$

и передаточной функции (6):

$$A_2 = \begin{bmatrix} -4,29 & -1,64 & -0,6936 & -0,355 & -0,216 & -0,133 & -0,09 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,25 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0625 & 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$B_2 = [0,25 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0],$$

$$C_2 = [0 \ -0,0314 \ 0,0314 \ -0,0293 \ 0,0314 \ -0,0377 \ 0,0800],$$

$$D_2 = 0.$$

На рис. 5 и 6 представлены графики переходных характеристик исследуемых каналов «вход-выход» объекта для моделей (3)–(9).

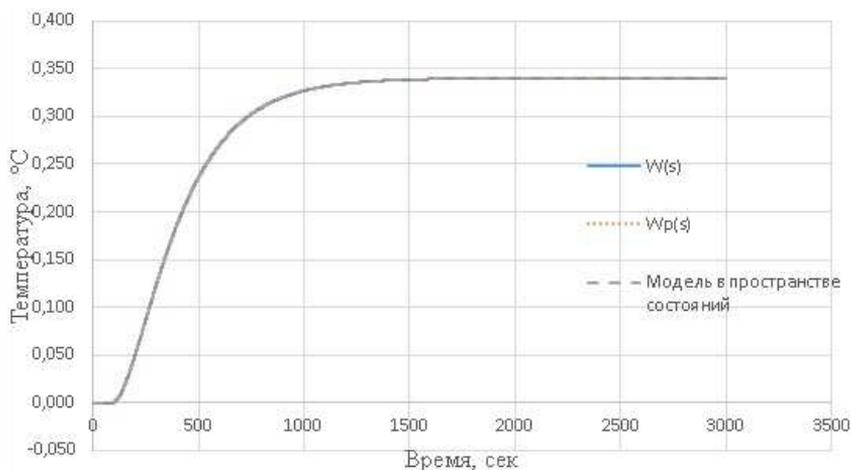


Рис. 5. Пример переходных характеристик, полученных для 1-го потока нефти с помощью передаточных функций (3), (4), и системы уравнений (7) с коэффициентами (8)

Из графиков следует, что все модели практически одинаково эмулируют реакцию каналов передачи на ступенчатое возмущение.

Таким образом, в работе представлены результаты исследования по определению динамических характеристик сети теплообмена на основе применения НС в качестве инструмента для решения задачи идентификации. Получены передаточные функции по каналам расхо-

дов 1-го и 2-го потоков нефти, поступающей в блок теплообмена, и температура подогретой нефти, затем они преобразованы для целей оптимизации управления в форму уравнений пространства состояний. Исследована применимость нейронной сети для решения задачи идентификации моделей процессов блока теплообмена.

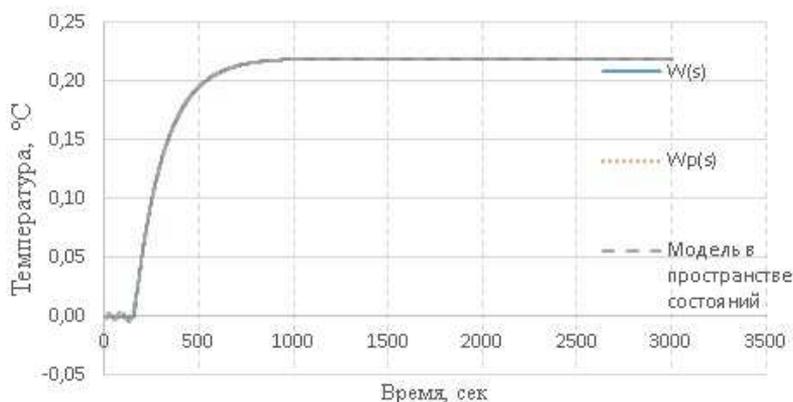


Рис. 6. Пример переходных характеристик, полученных для 2-го потока нефти с помощью передаточных функций (5), (6), и системы уравнений (7) с коэффициентами (9)

В автоматизированной системе управления установки АВТ имеется возможность обновления по исследуемой методике параметров передаточных функций с минимальным периодом дискретности, равным 60 с. Это позволяет путем адаптации моделей оперативно компенсировать и неконтролируемые возмущения в системе, влияющие на значения параметров передаточных функций.

Результаты исследования, предоставленные в данной работе, предназначены для решения задачи синтеза алгоритмов управления потоками сырой нефти. Разработка позволит повысить эффективность работы установки АВТ за счет увеличения степени рекуперации тепла отходящих с установки потоков обрабатываемых продуктов, что, в свою очередь, позволяет снизить расход природного газа.

Библиографический список

1. Колыхматов А.О., Шумихин А.Г. Алгоритм оптимизации в задаче управления блоком подогрева сырой нефти на установке АВТ нефтеперерабатывающего предприятия с его актуализацией в компьютерно-тренажерном комплексе // Вестник Пермского национального

исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2015. – № 3. – С. 39–48.

2. Колыхматов А.О., Шумихин А.Г. Оптимизация блока подогрева сырой нефти на установке АВТ при выводе некоторых теплообменников на ремонт // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2016. – № 3. – С. 20–27.

3. Kansha Y., Kishimoto A., Tsutsumi A. Application of the Self-Heat Recuperation Technology to Crude Oil Distillation // Applied Thermal Engineering. – 2012. – Vol. 43. – P. 153–157.

4. Кафаров В.В., Макаров В.В. Гибкие автоматизированные производственные системы в химической промышленности: учебник для вузов. – М.: Химия, 1990.

5. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1981.

6. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии: учеб. для вузов. – М.: Химия, 1985.

7. Гартман Т.Н., Клушин Д.В. Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов: учеб. пособие для вузов. – М.: Академкнига, 2006.

8. Бояринов А.И., Кафаров В.В. Методы оптимизации в химической технологии: учеб. пособие для вузов. – М.: Химия, 1969.

9. Кафаров В.В., Мешалкин В.П. Анализ и синтез химико-технологических систем: учебник для вузов. – М.: Химия, 1991.

10. Шумихин А.Г., Бояршинова А.С. Идентификация сложного объекта управления по частотным характеристикам, полученным экспериментально на его нейросетевой динамической модели // Автоматика и телемеханика. – 2015. – № 4. – С. 125–134.

11. Шумихин А.Г., Бояршинова А.С. Параметрическая идентификация управляемого объекта в режиме его эксплуатации с применением технологии нейронных сетей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2016. – № 19. – С. 102–110.

12. Liao L.C.-K., Yangb T.C.-K., Tsaib M.T. Expert System of a Crude Oil Distillation Unit for Process Optimization Using Neural Networks // Expert Systems with Applications. – 2004. – Vol. 26, № 2. – P. 247–255.

13. Автоматизация синтеза и обучение интеллектуальных систем управления / И.М. Макаров, В.М. Лохин, С.В. Манько [и др.]; под ред. И.М. Макарова и В.М. Лохина. – М.: Наука, 2009.
14. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечёткая логика и искусственные нейронные сети. – М.: Физматлит, 2001.
15. Иваненко Б.П., Проказов С.А., Парфенов А.Н. Нейросетевое моделирование процессов добычи нефти // Нефтяное хозяйство. – 2003. – № 12. – С. 46–49.
16. Torgashov A. Nonlinear Process Model-Based Self-Optimizing Control of Complex Crude Distillation Column // European Symposium on Computer Aided Process Engineering–11. – 2001. – Vol. 9. – P. 793–798.
17. Popoola L., Babagana G., Susu A. A Review of an Expert System Design for Crude Oil Distillation Column Using the Neural Networks Model and Process Optimization and Control Using Genetic Algorithm Framework // Advances in Chemical Engineering and Science. – 2013. – Vol. 3. – № 2. – P. 164–170.
18. Siefelmann H.T., Horne B.G., Giles C.L. Computational capabilities of recurrent NARX neural networks // IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics. – 1997. – Vol. 27. – № 2. – P. 208–215.
19. Junior J.M.P., Barreto G.A. Long-term series prediction with the NARX network: an empirical evaluation // Neurocomputing Advances in Neural Information processing (ICONIP2006). – 2008. – Vol. 71. – № 16–18. – P. 3335–3343.
20. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния: пер. с англ. – М.: Мир, 1975.
21. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учебник для вузов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007.

References

1. Kolykhatov A.O., Shumikhin A.G. Algoritm optimizatsii v zadache upravleniia blokom podogreva syroi nefiti na ustanovke AVT neftepererabatyvaiushchego predpriatiia s ego aktualizatsiei v komp'iuterno-trenazhernom komplekse [The optimization algorithm in the problem of heating unit of crude oil on the ADU/VDU oil refinery with its actualization in a computer-training complex]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaiia tekhnologiia i biotekhnologiia*, 2015, no. 3, pp. 39-48.

2. Kolykhmatov A.O., Shumikhin A.G. Optimizatsiia bloka podogreva syroi nefi na ustanovke avt pri vyvode nekotorykh teploobmennikov na remont [Optimization of crude oil preheating unit at the ADU/VDU in output some heat exchangers to repair]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaiia tekhnologiia i biotekhnologiia*, 2016, no. 3, pp. 20-27.

3. Kansha Y., Kishimoto A., Tsutsumi A. Application of the Self-Heat Recuperation Technology to Crude Oil Distillation. *Applied Thermal Engineering*, 2012, vol. 43, pp. 153-157.

4. Kafarov V.V., Makarov V.V. *Gibkie avtomatizirovannye proizvodstvennye sistemy v khimicheskoi promyshlennosti: uchebnik dlia vuzov* [Flexible automated production systems in the chemical industry: a textbook for universities]. Moscow: Khimiia, 1990.

5. Gel'perin N.I. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii* [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. Moscow: Khimiia, 1981.

6. Kafarov V.V. *Metody kibernetiki v khimii i khimicheskoi tekhnologii: uchebnik dlia vuzov* [Methods of Cybernetics in Chemistry and Chemical Technology: a textbook for universities]. Moscow: Khimiia, 1985.

7. Gartman T.N., Klushin D.V. *Osnovy komp'iuternogo modelirovaniia khimikotekhnologicheskikh protsessov: uchebnoe posobie dlia vuzov* [Fundamentals of computer modeling of chemical and technological processes: a textbook for universities]. Moscow: Akademkniga, 2006.

8. Boiarinov A.I., Kafarov V.V. *Metody optimizatsii v khimicheskoi tekhnologii: uchebnoe posobie dlia vuzov* [Methods of optimization in chemical technology: a textbook for high schools]. Moscow: Khimiia, 1969.

9. Kafarov V.V., Meshalkin V.P. *Analiz i sintez khimiko-tekhnologicheskikh sistem: uchebnik dlia vuzov* [Analysis and synthesis of chemical-technological systems: a textbook for universities]. Moscow: Khimiia, 1991.

10. Shumikhin A.G., Boiarshinova A.S. Identifikatsiia slozhnogo ob"ekta upravleniia po chastotnym kharakteristikam poluchennym eksperimental'no na ego neurosetevoi dinamicheskoi modeli [Identification of a complex control object with frequency characteristics obtained experimentally with its dynamic neural network model]. *Avtomatika i telemekhanika*, 2015, no. 4, pp. 125-134.

11. Shumikhin AG, Boiarshinova A.S. Parametricheskaia identifikatsiia upravliaemogo ob"ekta v rezhime ego ekspluatatsii s primeneniem tekhnologii neironnykh setei [Control object parametric identification within execution mode with neural network technology]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika informatsionnye tekhnologii sistemy upravleniia*, 2016, no. 19, pp. 102-110.

12. Liao L.C.-K., Yangb T.C.-K., Tsaib M.T. Expert System of a Crude Oil Distillation Unit for Process Optimization Using Neural Networks. *Expert Systems with Applications*, 2004, vol. 26, no. 2, pp. 247-255.

13. Makarov I.M., Lokhin V.M., Man'ko S.V. [et al.]. Avtomatizatsiia sinteza i obuchenie intellektual'nykh sistem upravleniia [Automation of synthesis and training of intelligent control systems]. Eds. I.M. Makarov, V.M. Lokhin. Moscow: Nauka, 2009.

14. Kruglov V.V., Dli M.I., Golunov R.Iu. Nechetkaia logika i iskusstvennye neironnye seti [Fuzzy logic and artificial neural networks]. Moscow: Fizmatlit, 2001.

15. Ivanenko B.P., Prokazov S.A., Parfenov A.N. Neurosetevoe modelirovanie protsessov dobychi nefiti [Simulation of the oil production processes using neural networks]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2003, no. 12, pp. 46-49.

16. Torgashov A. Nonlinear Process Model-Based Self-Optimizing Control of Complex Crude Distillation Column. *European Symposium on Computer Aided Process Engineering-11*, 2001, vol. 9, pp. 793-798.

17. Popoola L., Babagana G., Susu A. A Review of an Expert System Design for Crude Oil Distillation Column Using the Neural Networks Model and Process Optimization and Control Using Genetic Algorithm Framework. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 2013, vol. 3, no. 2, pp. 164-170.

18. Siefelmann H.T., Horne B.G., Giles C.L. Computational capabilities of recurrent NARX neural networks. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, 1997, vol. 27, no. 2, pp. 208-215.

19. Junior J.M.P., Barreto G.A. Long-term series prediction with the NARX network: an empirical evaluation. *Neurocomputing Advances in Neural Information processing (ICONIP2006)*, 2008, vol. 71, no. 16-18, pp. 3335-3343.

20. Eikkhoff P. Osnovy identifikatsii sistem upravleniia. Otsenivanie parametrov i sostoiianiia [Fundamentals of identification of control systems. Estimation of parameters and states]. Moscow: Mir, 1975.

21. Rotach V.Ia. Teoriia avtomaticheskogo upravleniia: uchebnik dlia vuzov [Theory of automatic control: a textbook for universities]. Moscow: Izdatel'skii dom Moskovskogo energeticheskogo instituta, 2007.

Сведения об авторах

Шумихин Александр Георгиевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: atp@pstu.ru).

Колыхматов Аркадий Олегович (Пермь, Россия) – руководитель группы системных разработок ООО «Промышленная кибернетика» (614000, Пермь, ул. Луначарского, 85, e-mail: kolykhmatovao@gmail.com).

About the authors

Shumikhin Aleksandr Georgievich (Perm, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Automation Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: atp@pstu.ru).

Kolykhmatov Arkadii Olegovich (Perm, Russian Federation) is a Head of Software System Development Group “Industrial cybernetics” LLC (614000, Perm, 85, Lunacharskogo str., e-mail: kolykhmatovao@gmail.com).

Получено 25.04.2018