

УДК 62-503.51

А.Г. Шумихин, А.С. БояршиноваПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ УПРАВЛЯЕМОГО
ОБЪЕКТА В РЕЖИМЕ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

Приведены результаты исследований метода параметрической идентификации объекта в составе системы управления. Предполагается невозможность проведения активного эксперимента с целью идентификации каналов технологического объекта непосредственно на действующем объекте из соображений безопасности. Ставится задача идентифицировать определенные каналы технологического объекта, не вмешиваясь в технологический процесс и не влияя на работу системы регулирования. Приведенный метод параметрической идентификации управляемого объекта основан на аппроксимации его поведения динамической нейронной сетью. Нейронная сеть обучается на примерах функционирования объекта с системой управления. Далее строится модель управляемого объекта, представленная динамической нейронной сетью и моделью регулятора с известной функцией регулирования. Модель эмулирует поведение управляемого объекта и используется для проведения на ней опытов активного вычислительного эксперимента, позволяющего идентифицировать каналы передачи объекта. Например, модель позволяет получить отклик управляемого объекта на испытательное воздействие, в том числе и на периодическое испытательное воздействие. По полученной комплексной частотной характеристике с применением метода наименьших квадратов находят значения параметров передаточной функции исследуемого канала объекта. Найденные параметры передаточных функций каналов контролируемых возмущающих воздействий могут быть использованы для синтеза алгоритмов их компенсации в автоматических системах управления. Рассматриваемые объекты относятся к классу технологических процессов с непрерывным характером производства химической, металлургической, горно-обогатительной, целлюлозно-бумажной и других отраслей промышленности. Для иллюстрации изложенного подхода к параметрической идентификации приведены результаты исследований на «прозрачном» имитационном объекте с системой управления.

Ключевые слова: объект с системой управления, идентификация, нейронная сеть, моделирование, комплексная частотная характеристика, передаточная функция.

A.G. Shumikhin, A.S. Boyarshinova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**CONTROL OBJECT PARAMETRIC IDENTIFICATION WITHIN
EXECUTION MODE WITH NEURAL NETWORK TECHNOLOGY**

We solve the identification problem for control objects. We suppose that it is impossible to perform an active experiment in order to find transfer functions of objects channels due to safety restrictions. Our method is based on dynamic neural network modeling. Neural network is trained on the

data of control object operating. Control object model is represented with a dynamic neural network and regulator model. Regulator function is known. The resulting model simulate the behavior of the system and lets us find the system's output, including outputs for periodic test influences. By the resulting complex frequency response we find the parameters of the channel's transfer function. The resulting parameters of transfer functions of these channels with controlled disturbances can be used to tune the algorithms of compensating for them in automated control systems. Observed objects represent technological processes with continuous production in chemical, metal processing, mining, paper, and other industries. We show an example of channel identification for "transparent" imitational control object.

Keywords: object with control system, identification, neural network, modeling, complex frequency response, transfer function.

Введение. Непрерывные технологические объекты подвержены влиянию множества различным образом взаимосвязанных величин, обладают запаздыванием в каналах связи технологических переменных и трудно поддаются аналитическому описанию. К такого рода технологическим объектам относятся, в частности, объекты крупных нефтеперерабатывающих производств, отличающиеся высоким уровнем автоматизации на базе современных распределенных систем управления. В состав специализированного программного обеспечения систем управления такими объектами включаются приложения, позволяющие реализовать управляющие функции, повышающие качество процессов управления, например, функцию компенсации разомкнуто-замкнутыми системами регулирования контролируемых возмущений, для настройки которых требуется идентификация соответствующих каналов передачи «вход-выход», например в линейном приближении, передаточными функциями.

Часто проведение активного эксперимента с целью получения передаточных функций каналов подобных объектов невозможно из соображений безопасности [1]. Зачастую необходимо идентифицировать определенные каналы технологического объекта, не вмешиваясь в технологический процесс и не влияя на работу системы регулирования, что существенно осложняет задачу идентификации. Однако по результатам пассивного эксперимента на технологическом объекте, описываемом двумя и более каналами, не всегда можно получить адекватную модель объекта. Получить достаточно точное математическое описание объекта управления аналитически для сложных технологических объектов с большим количеством взаимосвязанных переменных, управляющих и возмущающих сигналов практически невозможно или связано с большими материальными и временными затратами [2–4]. Поэтому разработка простого способа моделирования подобных систем с достаточной точностью остается актуальной задачей.

Одним из эффективных способов является использование методов постобработки измерений, например, с применением нейронных сетей в качестве инструмента для идентификации взаимосвязей технологических переменных автоматизированных объектов [5–9]. Класс нейронных сетей, имеющих в своем составе элементы в виде обратных связей, называется рекуррентными сетями и позволяет моделировать поведение динамических объектов [10]. Временные задержки входных сигналов и сигналов обратных связей позволяют моделировать поведение инерционных объектов с чистым запаздыванием, каковыми обычно являются управляемые объекты перерабатывающих отраслей промышленности. Подобные нейронные сети позволяют моделировать поведение системы управления, состоящей из технологического объекта и регулятора.

Модель системы управления состоит из динамической нейронной сети, аппроксимирующей поведение технологического объекта, и модели системы регулирования, позволяющей вычислять значение управляющих воздействий, что необходимо для адекватной работы нейронной сети (рис. 1).

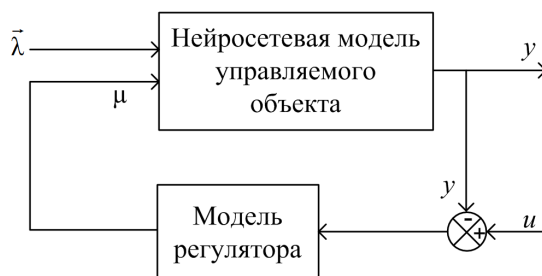


Рис. 1. Структура нейросетевой модели управляемого технологического объекта

Подобная нейросетевая модель позволяет проводить на ней опыты активного вычислительного эксперимента, которые невозможны на реальной системе управления в режиме ее эксплуатации, и получить необходимые данные для идентификации каналов объекта передаточными функциями. Например, подавая на соответствующие входы нейросетевой модели периодические испытательные воздействия, можно получить частотные характеристики моделируемой системы. Проводится ряд экспериментов. В каждом эксперименте на входе идентифицируемого канала нейросетевой модели системы при застabilизированных остальных входах реализуется периодическое испытательное воздействие. Отклик

модели на такое воздействие соответствует определенному значению частоты испытательного воздействия. Зная частоту, амплитуду и сдвиг по фазе испытательного и выходного сигналов, можно найти значение комплексной частотной характеристики (КЧХ), соответствующее данной частоте. Таким образом, проведя вычислительный эксперимент на некотором диапазоне частот, можно построить экспериментальную КЧХ.

В общем случае передаточную функцию канала «возмущающее воздействие – управляемая величина» системы управления можно представить в виде

$$W_{y\lambda}^{sys}(s) = \frac{W_{y\lambda}(s)}{1 + W_{y\mu}(s)W_r(s)},$$

где $W_{y\mu}(s)$ – передаточная функция объекта по каналу «управляющее воздействие – управляемая величина»; $W_r(s)$ – передаточная функция регулятора; $W_{y\lambda}(s)$ – передаточная функция по каналу «возмущающее воздействие – управляемая величина»;

Выбрав определенную структуру передаточной функции по управляющему, возмущающему каналу объекта и определенную структуру регулятора, можно получить соответствующее выражение для КЧХ, аппроксимирующей экспериментальную.

$$W_{y\lambda}^{sys}(j\omega_v) = \text{Re}_{y\lambda}^{sys}(\omega_v) + j\text{Im}_{y\lambda}^{sys}(\omega_v).$$

В результате преобразований аппроксимирующая КЧХ будет состоять из выражений, аппроксимирующих действительную и мнимую части частотной характеристики, включающих в себя параметры передаточных функций технологического объекта.

Решение задачи нелинейного программирования для всего спектра исследованных частот дает оценки по методу наименьших квадратов параметров передаточных функций:

$$\left. \begin{aligned} & \left\{ \Phi(\overrightarrow{b_{y\lambda}}, \overrightarrow{a_{y\lambda}}, k_{y\lambda}, \tau_{y\lambda}, \overrightarrow{b_{y\mu}}, \overrightarrow{a_{y\mu}}, k_{y\mu}, \tau_{y\mu}) = \right. \\ & = \sum_{v=1}^N (\text{Re}_{y\lambda}^E(\omega_v) - \text{Re}_{y\lambda}^{sys}(\omega_v))^2 + \sum_{v=1}^N (\text{Im}_{y\lambda}^E(\omega_v) - \text{Im}_{y\lambda}^{sys}(\omega_v))^2 \rightarrow \\ & \left. \rightarrow \overrightarrow{b_{y\lambda}^0}, \overrightarrow{a_{y\lambda}^0}, k_{y\lambda}^0, \tau_{y\lambda}^0, \overrightarrow{b_{y\mu}^0}, \overrightarrow{a_{y\mu}^0}, k_{y\mu}^0, \tau_{y\mu}^0, \right\} \end{aligned}$$

где $\vec{b}_{y\lambda}^0, \vec{a}_{y\lambda}^0, k_{y\lambda}^0, \tau_{y\lambda}^0, \vec{b}_{y\mu}^0, \vec{a}_{y\mu}^0, k_{y\mu}^0, \tau_{y\mu}^0$ – оценки параметров передаточных функций.

Вычислительный эксперимент. Для иллюстрации изложенного подхода к идентификации исследована простая имитационная модель системы управления, состоящая из объекта и регулятора (рис. 2).

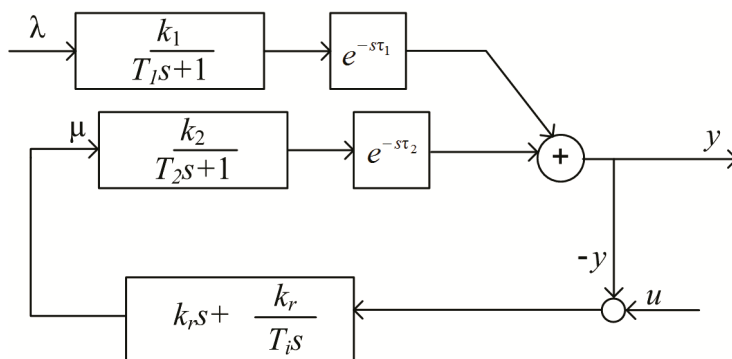


Рис. 2. Структурная схема имитационной системы управления

Объект имеет два входа и один выход и обладает различным транспортным запаздыванием по каналам передачи. Один из входов является управляющим воздействием μ , второй является контролируемым возмущением λ . Выходная управляемая величина y изменяется в результате управляющего воздействия μ , вырабатываемого регулятором, работающим по пропорционально-интегральному закону регулирования, на основании отклонения управляемой величины от задания.

По данным, полученным в результате вычислительного эксперимента, построена нейронная сеть, аппроксимирующая поведение управляемого объекта. По известным алгоритмам регулирования построена модель регулятора. Создана нейросетевая модель системы управления, состоящая из обученной нейронной сети и модели регулятора с известной функцией регулирования.

На нейросетевой модели системы управления проведён эксперимент по определению частотных характеристик первого канала передачи. Входной незашумленный синусоидальный сигнал реализован на различных частотах. Получен фрагмент КЧХ для исследуемого диапазона частот (рис. 3).

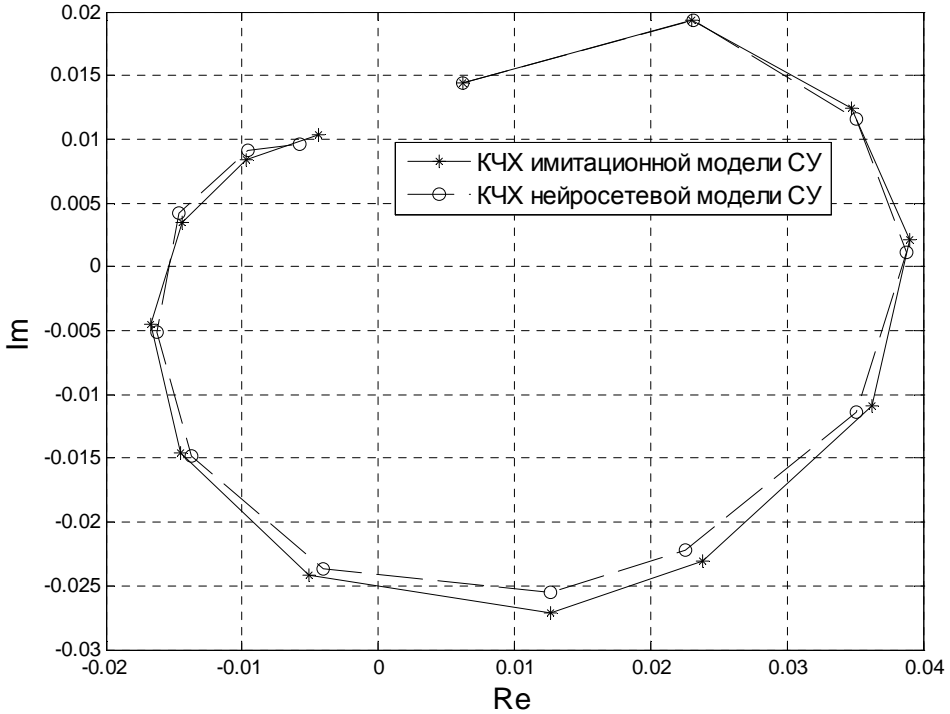


Рис. 3. КЧХ, построенная непосредственно на имитационной модели системы управления и экспериментально по результатам опытов на нейросетевой модели системы управления

Для оценки параметров модели по результатам эксперимента с нейронной сетью на всей области исследованных частот составлено выражение для аппроксимирующей КЧХ первого канала «вход-выход»:

$$W_{y\lambda}^{sys}(j\omega_v) = \frac{\frac{k_1}{T_1 s + 1} e^{-j\omega_v \tau_1}}{1 + \frac{k_2}{T_2 j\omega_v + 1} e^{-j\omega_v \tau_2} \left(k_r + \frac{k_r}{T_i j\omega_v} \right)} = \text{Re}_{y\lambda}^{sys}(\omega_v) + j\text{Im}_{y\lambda}^{sys}(\omega_v).$$

Получено выражение функции ошибки, минимизация которой дает оценки параметров модели. Решение получено методом последовательного квадратичного программирования. В задаче квадратичного программирования на оптимизирующие переменные $[k_1; T_1; \tau_1; k_2; T_2; \tau_2]$ накладываются ограничения в виде нижних $[0,3; 10; 1; 1; 5; 0,1]$ и верхних $[1; 100; 10; 2; 50; 5]$ граничных значений. Вектор-строка

стартовых значений переменных следующая: [0,3; 10; 1; 1; 5; 0,1]. Найденные при решении значения оценок параметров модели ($k_1 = 0,47$; $T_1 = 69,6$; $\tau_1 = 3,9$; $k_2 = 1,39$; $T_2 = 13,9$; $\tau_2 = 1,3$) близки к заданным значениям параметров исходной имитационной модели ($k_1 = 0,5$; $T_1 = 70$; $\tau_1 = 4$; $k_2 = 1,5$; $T_2 = 15$; $\tau_2 = 1$).

Выводы

Проведено исследование метода параметрической идентификации каналов объекта с системой управления с применением технологии нейронных сетей. Исследования с «прозрачными» тестовыми примерами показали, что предлагаемый метод позволяет параметрически идентифицировать объект передаточной функцией.

Метод применим для идентификации объектов управления с непрерывным характером производства по данным наблюдений переменных в режимах эксплуатации.

Библиографический список

1. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. Оценка параметров и состояния. – М.: Мир, 1975. – 680 с.
2. Бояринов А.И., Кафаров В.В. Методы оптимизации в химической технологии. – М.: Химия, 1975. – 564 с.
3. Гартман Т.Н., Клушин Д.В. Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов: учеб. пособие для вузов. – М.: Академкнига, 2006. – 416 с.
4. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. – М.: Наука, 1976. – 394 с.
5. Сараев П.В. Численные методы интервального анализа в обучении нейронных сетей // Автоматика и телемеханика. – 2012. – № 11. – С. 129–143.
6. Габитов Р.Ф. Многомерное модельно-предикторное управление прокалкой катализаторов крекинга, основанное на алгоритме с интервальной неопределенностью: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2012. – 19 с.
7. 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.

8. Шумихин А.Г., Бояршинова А.С., Орехов М.С. Применение нейросетевых моделей при автоматизированном управлении сложными химико-технологическими системами // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3/2. – С. 9–12.

9. Идрисов И.И. Алгоритмы адаптации и обеспечения отказоустойчивости систем управления газотурбинными двигателями на основе нейросетевых технологий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2009. – 19 с.

10. Аведьян Э.Д. Алгоритмы настройки многослойных нейронных сетей // Автоматика и телемеханика. – 1995. – № 4. – С. 106–118.

References

1. Eikkhoff P. *Osnovy identifikatsii sistem upravleniia. Otsenivanie parametrov i sostoianiia* [Control system identification basics. Parameters and state estimation]. Moscow: Mir, 1975. 680 p.

2. Boiarinov A.I., Kafarov V.V. *Metody optimizatsii v khimicheskoi tekhnologii* [Methods of chemical technology optimization]. Moscow: Khimiia, 1975. 564 p.

3. Gartman T.N., Klushin D.V. *Osnovy komp'iuternogo modelirovaniia khimiko-tekhnologicheskikh protsessov* [Chemical processes computer modeling basics]. Moscow: Akademkniga, 2006. 416 p.

4. Kafarov V.V., Dorokhov I.N. *Sistemnyi analiz protsessov khimicheskoi tekhnologii* [Chemical technology processes system analysis]. Moscow: Nauka, 1976. 394 p.

5. Saraev P.V. *Chislennye metody interval'nogo analiza v obuchenii neironnykh setei* [Numerical methods of interval analysis in learning neural network]. *Avtomatika i telemekhanika*, 2012, no. 11, pp. 129-143.

6. Gabitov R.F. *Mnogomernoe model'no-prediktornoe upravlenie prokalkoi katalizatorov krekinga, osnovannoe na algoritme s interval'noi neopredelennost'iu* [Multivariate model-predictive control calcinations cracking catalysts based on an algorithm with interval uncertainty]. Abstract thesis of the candidate of technical sciences. Ufa, 2012. 19 p.

7. Shumikhin A.G., Boiarshinova A.S. *Identifikatsiia slozhnogo ob"ekta upravleniia po chastotnym kharakteristikam, poluchennym eksperimental'no na ego neurosetevoi dinamicheskoi modeli* [Application of neural network models for automated management of complex chemical-engineering system]. *Avtomatika i telemekhanika*, 2015, no. 4, pp. 125-134.

8. Shumikhin A.G., Boiarshinova A.S., Orekhov M.S. Primenenie neirosetevykh modelei pri avtomatizirovannom upravlenii slozhny-mi khimiko-tekhnologicheskimi sistemami [Application of neural network models for automated management of complex chemical-engineering system]. *Polzunovskij vestnik*, 2012, no. 3/2, pp. 9-12.

9. Idrisov I.I. Algoritmy adaptatsii i obespecheniia otkazoustoichivosti sistem upravleniia gazoturbinnymi dvigateliami na os-nove neirosetevykh tekhnologii [Control systems adaptation and fault tolerance algorithms for gas turbine engines based on neural network technologies]. Abstract thesis of the candidate of technical sciences. Ufa, 2009. 19 p.

10. Aved'ian E.D. Algoritmy nastroiки mnogosloynnykh neiron-nykh setei [Learning Algorithms for Multilayer Neural Networks]. *Avtomatika i telemekhanika*, 1995, no. 4, pp. 106-118.

Сведения об авторах

Шумихин Александр Георгиевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: shumichin@gmail.com).

Бояршинова Анна Сергеевна (Пермь, Россия) – аспирантка кафедры автоматизации технологических процессов Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: boyarshinovaann@gmail.com).

About the authors

Shumixin Aleksandr Georgievich (Perm, Russian Federation) is a Doctor of Technical Science, Professor, head of department of automation of technological processes and production Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: shumichin@gmail.com).

Boyarshinova Anna Sergeevna (Perm, Russian Federation) is a Post-graduate Student department of automation technological processes Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: boyarshinovaann@gmail.com).

Получено 14.07.2016