УДК 622.733-52

А.А. ЖОСАН[/], канд. техн. наук, доц., Криворожский национальный университет
jaa2301@inbox.ru

НЕПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ДУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Выполнен анализ состояния проблем синтеза моделей динамических объектов управления, параметры и структура которых неизвестны. Приведен пример очень простой модели прогноза состояния динамического объекта в виде "черного ящика", параметры которого недоступны для измерения. Получен практически точный прогноз состояния динамических объектов как устойчивых так и не устойчивых.

Ключевые слова: непараметрическая модель, дуальная модель, расширенная матрица, устойчивость, динамический хаос, фрактальная структура, интервал дискретности, черный ящик.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Данная работа посвящена анализу и численной реализации дуальной непараметрической модели динамического объекта, алгоритм которой приведен в работе [1]. Анализ показывает, что методы классической теории управления динамическими объектами практически полностью построены на предположении о линейности и стационарности динамических процессов как объектов управления. Основные методы исследования таких объектов: линейная алгебра, преобразование Лапласа и Фурье, корреляционный анализ, частотные методы. Однако на практике предположение о линейности объектов не всегда оправдано. Как выход из положения применяют метод линеаризации для получения модели, порядок которой выбирается иногда интуитивно или на основе предыдущего опыта. Такой подход вполне обоснован, но полученные модели с определенной точностью могут быть использованы в ограниченной области положения объекта управления. Статистический подход, строго говоря, является линейным аппаратом, к тому же требующим подчас огромного количества данных, что приводит к известной проблеме "устаревания данных".

В этом отношении интересны высказывания таких ученых как Р. Калман, Л.С., А.Н. Колмогоров, Л.С. Понтрягин, приведенные в работе [2]. Кроме того, даже формально линейные объекты часто не стационарны и описываются линейными дифференциальными уравнениями с переменными параметрами, закон изменения которых установить проблематично. Еще сложнее проблема определения модели нелинейных нестационарных объектов.

Нелинейные характеристики часто изменяются уже в процессе их экспериментального определения. В качестве примера можно привести процессы дезинтеграции рудного материала как объектов управления. Неучет нестационарности нелинейных характеристик часто приводит к вынужденному простою или преднамеренному снижению его производительности.

При классическом подходе обычно определяют параметры модели объекта управления и их численные значения приравнивают к параметрам регуляторов. Такой подход при получении моделей называют параметрическим. К недостаткам такого подхода следует отнести: неправомерность приравнивания параметров модели и регулятора (постоянная времени объекта, например в приводе на прокатном стане, а равная ей константа в регуляторе – это число в ячейке памяти компьютера). Проблема еще в том, что полученную модель применяют во всей области допустимых состояний объекта, в то время как она получена на ограниченном его подмножестве.

Проблемы синтеза моделей динамических объектов управления не были бы столь существенными, если бы была возможность получения адекватной модели динамического процесса на основе знания физических законов. Попытки создания таких моделей часто наталкиваются на необходимость учета очень сложного взаимодействия различных факторов, в том числе распределенных во времени и пространстве, что приводит к известному "проклятию размерности". [3]. Задача синтеза регулятора осложняется недоступностью измерения возмущений (например, износа футеровки мельницы). К тому же практически полная неопределенность выбора класса математических объектов для аппроксимации вектора скорости процесса, неопределенность порядка объекта управления. По этой причине часто в качестве компонент вектора скорости испытывают функции, принадлежащие к классу полиномов, главным образом потому только, что они позволяют просто выполнять математические операции над ними и оценивать минимальную степень полинома.

До настоящего времени встречается немало работ, в которых "шлифуются" методы классической теории, основанные на предположении о линейности объектов управления и вере в возможность получения глобальной модели, на ограниченном множестве данных измерений состояния. Об этом весьма убедительно сказано в работе [2]. Остается практически не замеченным тот факт, что специалистам в области синтеза регуляторов приходится вникать в природу объекта управления. Метод уравнений Лагранжа II рода, хотя и имеет общий характер, но по существу не избавляет от указанной необходимости.

Осознание этого факта привело к развитию в последние десятилетия новых технологий управления динамическими объектами, не требующих знания природы объекта управления. Эти направления основаны на восприятии объекта управления как "черного ящика" с использованием измеренных входных и выходных данных, которые являются единственным источником доступных знаний об объекте, включая его собственное поведение и внешние возмущения, которые могут быть редуцированы к структуре объекта управления.

Одно из таких направлений это дуальный подход [4], а также непараметрические методы, позволяющие получить модели объектов, находящихся под воздействием непараметрических возмущений. Особенно необходимо подчеркнуть роль методов нелинейной динамики, основу которой заложили Пуанкаре Жюль Анри, Ляпунов А.М., Колмогоров А.Н. и тот интерес, который был стимулирован работами Лоренца Э.Н. [5]. Появились новые представления о поведении динамических систем с их аттракторами, детерминированным хаосом, фрактальной структурой поведения [6]. Дуальный подход, непараметрические методы, теория нелинейных динамических систем, в будущем, несомненно, образуют новую парадигму в области описания и управления динамическими объектами различной природы.

В связи с этим возникли проблемы разработки новых методов синтеза регуляторов, не предполагающих знание наперед порядка объекта управлении и его параметров.

Анализ исследований и публикаций. В решение перечисленных ранее проблем внесли вклад ряд ученых. В частности в развитие методов дуального управления кроме Фельдбаума [3], можно отметить работы [6-13]. Особое место занимает теорема Такенса Ф. [14] и ее развития. Кроме того, ряд вопросов нелинейной динамики развиваются в работах [15-22].

Непараметрические методы близко примыкают к дуальным методам (некоторые их практически не различают). К работам в этом направлении следует отнести [2,7,9], которые могут служить хорошим источником для популяризации на высоком уровне современных концепций теории динамических объектов. В них также приведены обширные ссылки на литературные источники.

Однако, ряд вопросов, одним из которых является приближение методов дуального управления к решению практических задач, упрощению алгоритмов управления требуют дальнейшего развития.

Постановка задачи. Актуальной проблемой является разработка новых методов получения моделей динамических моделей с неизвестными параметрами и структурой без специальных тестирующих воздействий. К ним относятся дуальные и близкие к ним непараметрические методы.

В работе поставлена задача показать пример дуальной непараметрической модели, и ее возможности прогноза переходного процесса в нелинейном динамическом объекте, параметры которого неизвестны и изменяются таким образом, что устойчивое и неустойчивое поведение может сменяться непредсказуемым образом.

Специально выбран простейший пример с целью привлечь внимание исследователей к новым технологиям аналитической динамики.

Достаточно квалифицированный исследователь, надеюсь, согласится, что ПИ и ПИД технологии уступают предложенным к рассмотрению, а нейротехнологии значительно сложнее.

Изложение материала и результаты. Рассмотрим динамический объект первого порядка дифференциальное, уравнение которого имеет вид

$$\frac{dx(t)}{dt} = -a\,(x(t),t)) \cdot x(t) + b\,(x(t),t)) \cdot U(t)\,,$$

где $U(t)$- входное воздействие на объект; $x(t)$- измеренная выходная реакция объекта; $a(x(t), t)$ и $b(x(t), t)$- нелинейные коэффициенты, недоступные для измерения.

Далее аргументы коэффициентов будем опускать. При заданном интервале дискретности Δt разностная модель объекта, полученная методом Эйлера, имеет вид

$$x[n+1] = (1 - a \cdot \Delta t) \cdot x[n] + b \cdot U[n] \cdot \Delta t, \tag{1}$$

где n - номер интервала дискретности; $U[n]$- управляющее воздействие; $x[n+1]$– дискретная выходная функция $[n+1]$-м интервале.

Решение (1) устойчиво, если $|(1-a\cdot\Delta t)| <1$. Так как недоступный для измерения коэффициент a изменяется произвольно, то при различных значениях $x[n]$ это условие не обязательно выполняется.

Единственная информация, которой можно располагать, это измеренные значения входа $U[*]$ и выхода $x[*]$, которые представляют собой ряд

$$U[n], x[n+1], U[n-1], x[n], U[n-2], x[n-1], U[n-3], x[n-2], \ldots, U[n-j], x[n-j+1], \ldots .$$

Из этого ряда сформируем расширенную матрицу

$$\begin{matrix} x[n] & x[n-1] & U[n] \\ x[n-1] & x[n-2] & U[n-2] \end{matrix} \tag{2}$$

Квадратная часть расширенной матрицы (2) состоит из измеренных выходных значений, вектор-столбец – из измеренных входных значений.

В работе [1] предложен алгоритм обработки такой матрицы, состоящий из стандартных приемов обнуления отдельных элементов и приведения строк к определенному виду.

Процесс первоначального заполнения и дальнейшей обработки матрицы разбивается на три этапа.

На первом из них на вход подается серия из двух управляющих воздействий (начальное условие равно $x[n-2]$), формируется расширенная матрица (2).

На втором этапе матрица выходов приводится к треугольному виду, используя любую процедуру, например процедуру Гаусса. Первая строка остается неизменной. Получаем

$$\begin{matrix} x[n] & x[n-1] & U[n-1] \\ 0 & x'[n-2] & U'[n-2] \end{matrix} \tag{2}$$

На третьем этапе автором предложено задавать строку состояния объекта на будущем интервале

$$x[n+1] \quad x[n] \quad U[n] \tag{3}$$

Здесь $x[n+1]$ - значение выхода на будущем интервале, $x[n]$ - прошлое значение выхода; $U[n]$ - управление, необходимое для обеспечения $x[n+1]$.

Для определения зависимости между $x[n+1]$ и $U[n]$ приведем расширенную матрицу (2) к строке (3).

Для этого первую строку (2) умножим на $x[n+1]/x[n]$.

Получим новую расширенную матрицу вида

$$\begin{matrix} x[n+1] & x''[n-1] & U''[n-1] \\ 0 & x'[n-2] & U'[n-2] \end{matrix}$$

Умножим вторую строку полученной расширенной матрицы на (x"[n]-x[n])/x'([n-2] и отнимем ее из первого. В итоге получим первую строку

$$x[n+1] \quad x[n] \quad U'''[n-1].$$

Последний элемент этой строки и есть управление, необходимое для получения заданного $x[n+1]$.

Представленный алгоритм работы регулятора имеет свойство обратимости.

Так, если в (2) крайние столбцы поменять местами, то по известному значению $U[n]$ можно без какой-либо модификации алгоритма получить значение исходной величины $x[n+1]$. Это свойство алгоритма позволяет использовать его как для вычисления управления, так и для прогнозирования исходной величины.

Замещение элементов матрицы (2) на каждом интервале дискретности новыми значениями позволяет практически непрерывно учитывать изменение параметров объекта, если они изменяются во времени или нелинейны.

После указанных преобразований для прогноза $x[n+1]$ получено выражение

$$x[n+1]=\frac{(x[n-1]\cdot U[n-1]-x[n]\cdot U[n-2])\cdot(x[n-1]\cdot U[n]-x[n]\cdot U[n-1])}{(x[n-2]\cdot x[n-1]-U[n-2]\cdot x[n])\cdot U[n-2]}$$

Результаты численных испытаний прогноза приведены ниже.

На рис. 1 показан результат прогноза состояния объекта управления с постоянными коэффициентами. При этом в соответствии с (2) a=-2=const, Δt=0,05 корень характеристического полинома $Z=1-a\cdot\Delta t$.

Объект неустойчив. Входное воздействие изменяется по закону. $U=2\cdot\sin(10\cdot n\cdot\Delta t)$. Первые два интервала – время обучения.

Как видно, прогноз состояния объекта происходит практически без ошибок.

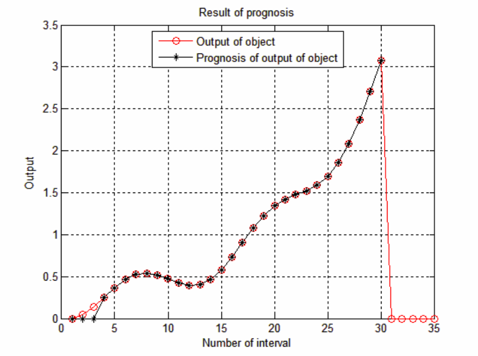

Рис. 1. Прогноз состояния неустойчивого объекта с постоянными коэффициентами, недоступными измерению. Обозначения: о – маркер выхода объекта, * - маркер выхода модели прогноза

На рис. 2 показан процесс в объекте с переменным параметром $a=20\cdot\cos(10\cdot n\ \Delta t)$, Δt=0.01 Корень полинома (2) $Z=1-a\cdot\Delta t$ изменяется в диапазоне [0.8, 1.2].

Эксперимент был усложнен подачей на вход недоступного для измерения равномерно распределенного случайного сигнала, изменяющегося в диапазоне [-5, +5].

Первые два интервала – время обучения.

Устойчивое состояние объекта сменяется неустойчивым.

Скорость роста выхода может достигать порядка 1.2^n. Тем не менее, могут быть получены вполне удовлетворительные результаты.

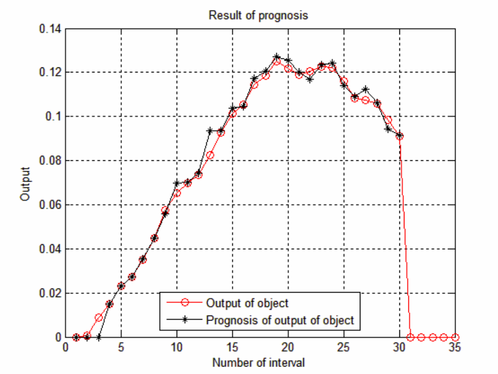

Рис. 2. Прогноз состояния неустойчивого объекта с двумя коэффициентами, недоступными измерению. Коэффициент переменными коэффициентом, коэффициент a=*var*. Обозначения: о – маркер выхода объекта, * - маркер выхода модели прогноза.

Выводы и направление дальнейших исследований. Преимуществом дуальной непараметрической модели динамического объекта является простота алгоритма реализации, высокий уровень нечувствительности к изменениям параметров, возможность на их основе создавать регуляторы, способные в определенной степени управлять неустойчивыми состояниями без каких-либо изменений алгоритма работы, измерения параметров объекта, знания физических законов функционирования.

Предложенный подход требует дальнейшего обобщения на объекты более высокого порядка, возможности изменения интервала дискретности, получения других вариантов синтеза модели.

Список литературы

1. **Жосан А.А.** Концепція моделі динамічного об'єкта керування як потоку вхідних і вихідних даних. Вісник Криворізького технічного університету. випуск 22, Кривий Ріг, 2008 (жовтень), С. 154-157.

2. **Медведев А.В.** О теории непараметрческих систем управления. Вестник Томского Государственного университета. Управление, Вычислительная Техника И Информатика , Выпуск № 1 (22) / 2013. С. 6-19. Научная библиотека КиберЛенинка. http://cyberleninka.ru/article/n/o-teorii-neparametricheskih-sistem-upravleniya.

3. **Kantz H., Schreiber T.** Nonlinear time series analysis. Cambridge University Press, Cambridge, 1997.

4. **Fel'dbaum, A.**, 'Dual control theory I-IV', Automat. Remote Control, **21,** 874-880,1033-1039 (1960); **22,** 1-12, 109-121 (1961).

5. **http://www.keldysh.ru/comma/html/ds/loren.htm.**

6. **Герасина А.В**. Структурно-параметрическая идентификация процессов дробления и измельчения руд: монография / А.В. Герасина, В.И. Корниенко. -Д: Национальный горный университет, 2013. - 101 с.

7. **Безручко Б.П., Смирнов Д.А.** Математическое моделирование и хаотические временные ряды. Саратов: ГосУНЦ «Колледж», 2005. 320 с. ISBN 5-94409-045-6.

8. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М.: Наука, 1968. 320 с.

9. **Медведев А.В.** Непараметрические системы адаптации. Новосибирск: Наука, 1983. 174 с.

10. **Куликовский Р.** Оптимальные и адаптивные процессы в системах автоматического регулирования. М.: Наука, 1967. 397 с.

11. **Анищенко В.С., Астахов В.В., Вадивасова Т.Е.** и др. Нелинейные эффекты в хаотических и стохастических системах. Москва - Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003.

12. **Малинецкий Г. Г. , Потапов А. Б.** Современные проблемы нелинейной динамики. М.: Эдиториал УРСС, 2000. 336 с.

13. **Anishchenko V.S., Pavlov A.N.** Global reconstruction in application to multichannel communication // Phys.Rev. E. 1998. V. 57. P. 2455-2457.

14. **Takens F.** Detecting strange attractors in turbulence // Lec. Notes in Math., 1981.V. 898. P. 366-381.

15. **Wittenmark, B.,** 'An active suboptimal dual controller for systems with stochastic parameters', Automat. Control Theory Appl., 3,13-19 (1975).

16. **Wittenmark, B. and C. Elevitch**, 'An adaptive control algorithm with dual features', 7th IFAC/IFORS Symp. on Identification and Systems Parameter Estimation, York, U.K., 1985, pp. 587-592.

17. **Filatov, N. and H. Unbehauen**, 'Adaptive predictive control policy for nonlinear stochastic systems', IEEE Trans. Automat. Control, 40, 1943-1949 (1995).

18. **Калман Р.Е.** Идентификация систем с шумами // Успехи математических наук. 1985. Т. 40. № 4. 244 с.

19 **Lindof, B. and J. Holst**, 'Suboptimal dual control of stochastic systems with time-varying parameters', Technical report TFMS-3152, Department of Mathematical Statistics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1997.

20. **Maitelli, A. and T. Yoneyama**, 'A two-stage dual suboptimal controller for stochastic systems using approximate moments', Automatica, 30, 1949-1954 (1994).

21 **Filatov, N., H. Unbehauen and U. Keuchel**, 'Dual pole placement controller with direct adaptation', Automatica, 33, 113-117 (1997).

22. **Chaos and Its Reconstructions** / Eds. G. Gouesbet, S. Meunier-Guttin-Cluzel, O. Menard. Nova Science Publishers, New York, 2003.

Рукопись поступила в редакцию 17.02.14

УДК 662.749:067.5

В.П. ЛЯЛЮК, д-р техн. наук, проф., В.П. СОКОЛОВА, канд. техн. наук, доц.,
Е.О. ШМЕЛЬЦЕР, ст. преподаватель, Криворожский национальный университет”
Д.Ю. ТИМОФЕЕВА, В.В. БЕРЕЗА, ЦЛУП КХП ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог»

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОГНОЗА КАЧЕСТВА ДОМЕННОГО КОКСА НА ОСНОВЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЗОЛЫ УГОЛЬНОЙ ШИХТЫ

Проанализированы различные математические модели прогноза реакционной способности (CRI) и послереакционной прочности кокса (CSR), в том числе с использованием генетических особенностей углей, химического состава их минеральной части. Предложены уравнения для расчета прогнозных показателей CSR и CRI на основе индекса основности золы шихты.

Проблема и ее связь с практическими задачами. Как известно, эффективность работы доменных печей определяется качеством металлургического кокса, в том числе его прочностью в холодном состоянии - индексами M_{25} и M_{10}. Однако отечественная и мировая практика приводит к выводу, что индексы дробимости M_{25} и истираемости M_{10} не в полной мере характеризуют свойства кокса и его поведение в процессе доменной плавки, то есть в условиях высоких температур и в среде окислителей. Эффективность функций кокса в доменном процессе в значительной степени зависит от реакционной способности кокса. Реакционная способность кокса влияет на ход доменной плавки, особенно на профиль распределения температур и газовых потоков в печи, а как следствие, на степень использования газа и удельный расход восстановителя. Кроме того, она влияет на прочность коксовой насадки в горновой зоне печи, так как газификация кокса сопровождается ослаблением его структуры. Таким образом, реакционную спо-