

УДК 519.246.8

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ АДАПТИВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕГРЕССИЙ

© 2014 Ю.Е. Кувайскова

Ульяновский государственный технический университет

Поступила в редакцию 18.06.2014

Проведено математическое моделирование состояния технического объекта, задаваемого набором взаимосвязанных параметров, на основе методологии адаптивного динамического регрессионного моделирования, с целью получения прогноза для принятия мер по предотвращению аварийной ситуации.

Ключевые слова: *аварийная ситуация, адаптивное динамическое регрессионное моделирование, прогнозирование, технический объект, временной ряд*

Задачи прогнозирования временных рядов на основе математических моделей играют важную роль при управлении техническим объектом, состояние которого описывается множеством параметров, измеряемых через определенные промежутки времени. По результатам предсказанных по моделям значений параметров исследуемого объекта можно судить о возможном нарушении процесса (аварийной ситуации), если значения прогнозируемых параметров выходят за допустимые границы. Таким образом, необходимо построение математической модели, адекватно описывающей характеристики исследуемого процесса.

Пусть состояние технического объекта характеризуется множеством зависимых друг от друга параметров, образующих систему взаимосвязанных временных рядов. При описании состояния данного объекта модели одномерных временных рядов не учитывают возможную коррелированность рассматриваемых характеристик и в некоторых случаях могут оказаться неадекватными. Для моделирования коррелированных характеристик объекта предлагается использовать методику построения адаптивных динамических регрессий системы взаимосвязанных временных рядов [2-6]. Пусть рассматриваются N параметров, характеризующие состояние технического объекта, фиксируемые в равноотстоящие моменты времени t_1, t_2, \dots, t_n и образующие систему взаимосвязанных временных рядов, которую можно представить в виде

$$y^1(t), y^2(t), \dots, y^N(t).$$

При описании данной системы предполагается представление временного ряда в виде:

$$y^i(t) = f^i(t) + g^i(t) + \psi^i(t) + \varepsilon^i(t), \quad (1)$$

при этом функция $f^i(t)$ – неслучайная (долговременная) функция тренда соответствующего ряда; $g^i(t)$ – неслучайная периодическая функция – совместная гармоническая составляющая ряда; $\psi^i(t)$ – случайная с элементами регулярности функция – векторная авторегрессия; $\varepsilon^i(t)$ – нерегулярная компонента (случайная величина, ошибка).

Затем последовательно исследуются свойства системы временных рядов на наличие соответствующих составляющих. На первом этапе проводится предварительный анализ системы временных рядов на наличие свойств регулярности и трендоустойчивости с помощью мультифрактального анализа [7]. Если обнаружена корреляция значений ряда динамики, то выделяется тренд, в качестве которого может быть использован алгебраический полином достаточно низкой степени. Оценивание параметров трендовой составляющей выполняется с помощью метода наименьших квадратов или робастными методами [8], которые позволяют значительно снизить вредное влияние больших выбросов и получить приемлемую итоговую оценку искомым параметрам. Найденные параметры трендовой составляющей проверяются на значимость, незначимые параметры исключаются из модели.

После удаления тренда анализируются свойства системы временных рядов методами спектрального анализа с целью выделения совместных гармоник. При обнаружении гармонической составляющей методом пошаговой

Кувайскова Юлия Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики и информатики. E-mail: u.kuvaiskova@mail.ru

регрессии выделяются значимые гармоники. Для ряда, представленного остатками предыдущего шага, в случае значимости корреляции, строится модель векторной авторегрессии (VAR) [9]. VAR – это такая модель, в которой несколько зависимых переменных, и зависят они от собственных лагов и от лагов других переменных. Модель VAR p -го порядка представляет собой систему уравнений, имеющих вид:

$$y_t^i = a_0^i + \sum_{j=1}^k a_{1j}^i y_{t-1}^j + \sum_{j=1}^k a_{2j}^i y_{t-2}^j + \dots + \sum_{j=1}^k a_{pj}^i y_{t-p}^j + \varepsilon_t^i \quad (2)$$

где y_t^i , $i = 1 \dots k$ - i -й временной ряд, p – порядок авторегрессии, ε_t^i - вектор серийно некоррелированных ошибок.

На каждом этапе моделирования проверяется соблюдение условий применения регрессионного анализа. В случае их нарушения проводятся соответствующие процедуры адаптации [6]. Если все предположения соблюдаются, то полученная модель используется для дальнейших исследований и прогнозирования.

На основе данной методики моделирования состояния объекта по результатам решения системы временных рядов разработана информационно-математическая система [10-12] раннего предупреждения о возможности аварийной ситуации на техническом объекте по результатам контроля множества параметров его работы.

$$y_1(t) = 0,042 \cdot t + 0,997 \cdot y_1(t-1) + 0,005 \cdot y_2(t-1) + 0,007 \cdot y_3(t-1) + 0,017 \cdot y_4(t-1) - 1,680 \cdot y_5(t-1) + 0,070 \cdot y_6(t-1)$$

$$y_2(t) = 36,275 - 0,114 \cdot y_1(t-1) + 0,751 \cdot y_2(t-1) + 0,129 \cdot y_3(t-1) + 0,250 \cdot y_4(t-1) - 1,278 \cdot y_5(t-1) - 0,066 \cdot y_6(t-1)$$

$$y_3(t) = 1,667 + 0,005 \cdot t + 0,048 \cdot y_1(t-1) + 0,025 \cdot y_2(t-1) + 0,542 \cdot y_3(t-1) - 0,439 \cdot y_4(t-1) + 2,854 \cdot y_5(t-1) + 0,045 \cdot y_6(t-1)$$

$$y_4(t) = 7,4844 + 0,0001 \cdot t + 0,017 \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{12,52} + 2,327\right) - 0,001 \cdot y_1(t-1) + 0,004 \cdot y_3(t-1) + 0,456 \cdot y_4(t-1) - 0,247 \cdot y_5(t-1) + 0,016 \cdot y_6(t-1)$$

$$y_5(t) = 0,579 - 7,080 \cdot 10^{-5} \cdot t + 0,007 \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{17,389} + 1,480\right) + 0,009 \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{10,793} - 0,058\right) + 0,001 \cdot y_2(t-1) - 0,001 \cdot y_3(t-1) - 0,007 \cdot y_4(t-1) + 0,302 \cdot y_5(t-1) + 0,002 \cdot y_6(t-1)$$

$$y_6(t) = 8,528 + 0,024 \cdot y_1(t-1) + 0,020 \cdot y_2(t-1) - 0,016 \cdot y_3(t-1) - 0,094 \cdot y_4(t-1) - 0,273 \cdot y_5(t-1) + 0,475 \cdot y_6(t-1)$$

Для каждой модели рассчитана точность аппроксимации σ (среднеквадратическое отклонение (СКО)) и точность прогнозирования

Программное обеспечение позволяет в автоматическом режиме проводить моделирование и прогнозирование множества параметров объекта, образующих систему временных рядов. Результаты моделирования системы временных рядов содержат таблицу значений временных рядов, полученных по модели; аналитические формулы модели системы временных рядов; таблицы среднеквадратических отклонений и графики исходных наблюдений и смоделированных данных. После получения модели системы временных рядов в программе существует возможность построения прогноза на период, заданный пользователем.

Разработанное программное обеспечение встраивается в систему управления объектом: на основе получаемых прогнозов принимается решение по изменению условий работы технического объекта. В случае выхода контролируемых параметров за «коридор» допустимых значений выводится сообщения о нарушениях процесса и подается соответствующий сигнал о необходимости принятия решения. Ниже приводятся результаты моделирования системы временных рядов $y_1(t), y_2(t), \dots, y_6(t)$, характеризующих состояние технического объекта по результатам 313 наблюдений. С помощью информационно-математической системы раннего предупреждения об аварийной ситуации были построены следующие комплексные модели:

σ_{Δ} (внешнее СКО) (рис. 1). СКО рассчитано по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n - p)}, \quad (3)$$

где n – количество наблюдений, p – число свободных в модели, y_i – результат i -го наблюдения, \hat{y}_i – прогнозируемое значение по модели.

Для вычисления внешнего СКО σ_{Δ} исходная выборка данных делится на две – обучающую и контрольную. По обучающей выборке строится модель, по контрольной рассчитывается внешнее СКО по формуле:

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\sum_{i=1}^k (\Delta_i - \bar{\Delta})^2 / (k - 1)}, \quad (4)$$

где $\Delta_i = y_i - \hat{y}_i$, $i = \overline{1, k}$ (k – количество элементов контрольной выборки), $\bar{\Delta} = \frac{\sum_{i=1}^k \Delta_i}{k}$, y_i – наблюдаемое значение отклика на контрольном интервале, \hat{y}_i – его прогноз – значения, вычисляемые по комплексной модели.

| СКО \ y | y1 | y2 | y3 | y4 | y5 | y6 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| внутреннее | 0,100 | 1,062 | 0,943 | 0,057 | 0,026 | 0,550 |
| внешнее | 3,381 | 8,201 | 2,499 | 0,071 | 0,051 | 1,105 |

Рис. 1. Среднеквадратические отклонения моделей системы временных рядов

По построенным моделям выполнен прогноз на 35 значений вперед. Для оценки качества прогноза использовались такие характеристика как минимальное абсолютное значение расхождения прогноза с исходными данными (Δ_{ABS}) и процентное (относительное) значение минимального расхождения ($\Delta_{\%}$), рассчитанные по формулам:

$$\Delta_{ABS} = |y_i - \hat{y}_i|, \quad (5)$$

$$\Delta_{\%} = \frac{\Delta_{ABS}}{y_i}, \quad (6)$$

где y_i – реальное значение, \hat{y}_i – прогноз.

Таблица 1. Характеристики качества моделей адаптивных динамических регрессий

| Ряд | Адаптивные динамические регрессии | | | |
|----------------|-----------------------------------|-------------------|----------------|---------------|
| | σ | σ_{Δ} | Δ_{ABS} | $\Delta_{\%}$ |
| y ₁ | 0,100 | 3,381 | 0,258 | 5,145 |
| y ₂ | 1,062 | 8,201 | 1,896 | 4,874 |
| y ₃ | 0,943 | 2,499 | 1,587 | 5,566 |
| y ₄ | 0,057 | 0,071 | 0,058 | 0,752 |
| y ₅ | 0,026 | 0,051 | 0,027 | 4,255 |
| y ₆ | 0,550 | 1,105 | 0,573 | 8,123 |

В таблице 1 представлены значения критериев качества моделей системы временных рядов (σ , σ_{Δ} , Δ_{ABS} , $\Delta_{\%}$). Из таблицы следует, что значения расхождений прогноза с исходными данными не превышают 10%, что говорит о хорошем качестве прогнозирования.

Для исследуемых характеристик процесса была выполнена проверка спрогнозированных данных на выход за предельные значения. Было выявлено, что полученные значения прогноза для всех контролируемых параметров объекта не выходят за «коридор» допустимых значений.

Выводы: полученные математические модели адаптивных динамических регрессий контролируемых параметров объекта могут быть использованы для прогнозирования состояния объекта. Результаты экспериментов подтверждают возможность использования информационно-математической системы раннего предупреждения об аварийной ситуации для моделирования и прогнозирования состояния технического объекта путем ее интегрирования в соответствующие системы управления объектом.

Работа выполнена в рамках задания Минобрнауки России №2014/232.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Бокс, Дж. Анализ временных рядов. Прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. – М.: Мир, 1974. 242 с.
2. Кувайскова, Ю.Е. Методика структурно-параметрической идентификации системы временных

- рядов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15, №4(4). С. 914-918.
3. Клячкин, В.Н. О возможности совместного описания характеристик гидроагрегата адаптивными регрессиями / В.Н. Клячкин, Ю.Е. Кувайскова, А.А. Алешина // Вектор науки ТГУ. 2013. №1(23). С. 40-41.
 4. Клячкин, В.Н. Моделирование вибраций гидроагрегата на основе адаптивных динамических регрессий / В.Н. Клячкин, Ю.Е. Кувайскова, А.А. Алешина // Автоматизация и современные технологии. 2014. №1. С. 30-34.
 5. Кувайскова, Ю.Е. Повышение эффективности системы управления техническими объектами при использовании адаптивного динамического регрессионного моделирования временных рядов / Ю.Е. Кувайскова, А.А. Алешина // Автоматизация процессов управления. 2013. №4(34). С. 77-83.
 6. Валеев, С.Г. Регрессионное моделирование при обработке наблюдений. – М.: Наука, 1991. 272 с.
 7. Валеев, С.Г. Применение мультифрактального анализа при описании временных рядов в технике и экономике / С.Г. Валеев, Ю.Е. Кувайскова, С.А. Губайдуллина // Вестник УлГТУ. 2008. №2. С. 23-27.
 8. Валеев, С.Г. Робастные методы оценивания: программное обеспечение, эффективность / С.Г. Валеев, Ю.Е. Кувайскова // Вестник УлГТУ. 2010. №1. С. 29-33.
 9. Кувайскова, Ю.Е. Применение метода векторной авторегрессии для обработки многомерных временных рядов / Ю.Е. Кувайскова, Я.М. Абдреймов // Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем: сборник научных трудов восьмой Всеросс. науч.-практ. конф. (с участием стран СНГ). 2013. С. 190-192.
 10. Клячкин, В.Н. Информационно-математическая система раннего предупреждения об аварийной ситуации / В.Н. Клячкин, Ю.Е. Кувайскова, А.А. Алешина, Ю.А. Кравцов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15, №4(4). С. 919-923.
 11. Кувайскова, Ю.Е. Информационно-математические технологии для совместной обработки системы временных рядов / Ю.Е. Кувайскова, А.А. Алешина // Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем: сборник научных трудов восьмой Всеросс. науч.-практ. конф. (с участием стран СНГ). 2013. С. 197-199.
 12. Кувайскова, Ю.Е. Программный комплекс моделирования и прогнозирования системы временных рядов / Ю.Е. Кувайскова, А.А. Алешина // Вестник УлГТУ. 2013. №2. С. 24-28.
 13. Боровиков, В.П. Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA. – М.: Горячая линия-Телеком. 2013. 288 с.

MODELING THE STATE OF AN OBJECT BASED ON ADAPTIVE DYNAMIC REGRESSIONS

© 2014 Yu.E. Kuvayskova

Ulyanovsk State Technical University

Mathematical modeling of the technical object defined by a set of interdependent parameters, based on the methodology of adaptive dynamic regression modeling, with the aim of obtaining forecast for taking measures on prevention of emergency.

Key words: *emergency, adaptive dynamic regression modelling, forecasting, technical object, system time series*