

Алгоритм прогнозирования технического состояния объекта с использованием моделей нечёткого логического вывода

Ю.Е. Кувайскова

Ульяновский государственный технический университет, 432027, ул. Северный Венец, 32, Ульяновск, Россия

Аннотация

Для предотвращения возможных аварийных ситуаций при функционировании объектов и обеспечения оперативных решений по управлению объектом разработан алгоритм прогнозирования его технического состояния, которое описывается набором показателей, представимых в виде системы временных рядов. С использованием адаптивного регрессионного моделирования для системы временных рядов строится адекватная математическая модель, которая используется для прогнозирования показателей объекта. Предсказанные значения показателей анализируются методами нечёткой логики, и в виде нечёткого термина выводится спрогнозированное состояние объекта.

Ключевые слова: адаптивное регрессионное моделирование; нечёткая логика; прогнозирование; система временных рядов; технический объект

1. Введение

Рассматривается объект, техническое состояние которого описывается набором показателей, представимых в виде системы временных рядов. Для предотвращения возможных аварийных ситуаций (выхода объекта из строя, его поломки и т. д.) необходимо знать, в каком техническом состоянии находится объект в данный момент, и предвидеть его будущее состояние. Если предсказанные значения контролируемых показателей объекта свидетельствуют о выходе за критические границы, следовательно, процесс нарушен: принимается соответствующее решение, связанное со снижением нагрузки на объект или его аварийной остановкой [1].

Эффективность функционирования объекта существенно зависит от точности прогнозирования набора контролируемых показателей [2]. Для повышения точности прогнозирования показателей объекта предлагается использование подхода адаптивного регрессионного моделирования [3,4]. Математические модели, получаемые согласно методике адаптивного моделирования, адекватны реальной ситуации и позволяют получать прогнозы с повышенной точностью [4].

Для описания спрогнозированного технического состояния объекта на языке качественных оценок предлагается использование моделей нечёткого логического вывода [5,6,7]. Предсказанные значения показателей объекта анализируются методами нечёткой логики, и в виде нечёткого термина выводится спрогнозированное состояние объекта.

2. Методика моделирования и прогнозирования системы временных рядов

Для построения адекватных математических моделей системы временных рядов предлагается использование методологии адаптивного регрессионного моделирования [3,4], предполагающей на каждом этапе структурно-параметрической идентификации модели проверку остатков модели на соблюдение предположений регрессионного анализа и применение методов адаптации при их нарушениях, что, в свою очередь, позволяет точнее определить структуру моделей и повысить точность прогнозирования [4].

Для моделирования системы взаимосвязанных временных рядов используется методика структурно-параметрической идентификации системы временных рядов [8], применение которой позволяет проводить совместный анализ данных и точнее их аппроксимировать.

Для исследования прогностических свойств исходных данных используются методы фрактальных и мультифрактальных анализов [9,10], позволяющих определить некоторые важные характеристики случайных процессов: регулярность, трендоустойчивость, наличие квазипериодических циклов и т. п.

Результаты проведённых фрактальных анализов позволяют выявить предварительную структуру математических моделей временных рядов. В общем случае модель временного ряда содержит несколько составляющих:

$$y(t) = f(t) + g(t) + \varphi(t) + \varepsilon(t), \quad (1)$$

где $y(t)$ – наблюдаемые значения временного ряда, $f(t)$ – функция тренда, $g(t)$ – гармоническая составляющая, $\varphi(t)$ – случайная функция с элементами регулярности, $\varepsilon(t)$ – случайная составляющая.

При выявлении сильной регулярности в динамике исследуемого процесса выделяется трендовая составляющая $f(t)$ системы временных рядов в виде парных зависимостей рядов от времени [11].

При наличии квазипериодических циклов строится гармоническая модель $g(t)$: в случае стационарности ряда – совместная гармоническая составляющая [8], в случае нестационарности процесса – авторегрессионная модель на цилиндре [12].

После идентификации регулярной составляющей ряда процесс исследуется на наличие авторегрессии и гетероскедастичности в остатках.

При наличии авторегрессии в остатках исследуемого процесса функция $\varphi(t)$ описывается моделью авторегрессии – скользящего среднего [13,14], при нарушении предположения о постоянстве дисперсии процесса (при наличии гетероскедастичности в остатках) используется подход авторегрессионной условной гетероскедастичности в остатках (autoregressive Conditionally Heteroskedastic, ARCH) и его модификации (GARCH, ARCH-N, GARCH-N, ARCH-M, GARCH-M и другие) [15,16].

При одновременном нарушении предположений о постоянстве математического ожидания и дисперсии процесса последовательно строятся модель авторегрессии – скользящего среднего и авторегрессионная модель с условной гетероскедастичностью в остатках.

Построенные адекватные комплексные математические модели системы временных рядов используются для прогнозирования состояния объекта.

Для оценки качества прогнозов, получаемых по моделям, исходная выборка данных делится на две части – обучающую и контрольную. Обучающая выборка используется для построения модели, а контрольная – для определения качества прогноза.

В качестве критерия оценки прогноза используется среднеквадратическая ошибка, вычисленная по контрольной выборке:

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (y(t_i) - \hat{y}(t_i))^2}, \quad (2)$$

где k – количество элементов контрольной выборки; $y(t_i)$ – наблюдаемые значения временного ряда на контрольном интервале; $\hat{y}(t_i)$ – прогнозы, вычисляемые по модели.

3. Алгоритм прогнозирования технического состояния объекта на основе моделей нечёткого логического вывода

Получаемые по модели прогнозы контролируемых показателей объекта анализируются методами нечёткой логики [6,7]. В качестве алгоритма нечёткого вывода предлагается применение модели Мамдани [5].

Множество контролируемых показателей объекта экспертом разделяются на классы по степени влияния на состояние объекта. Например, все показатели можно разделить на три класса: X_1 – класс важных показателей объекта, т. е. оказывающих значительное влияние на состояние объекта, X_2 – класс показателей объекта средней важности, X_3 – класс менее важных показателей объекта, т. е. оказывающих незначительное влияние на состояние объекта.

Для каждого контролируемого показателя объекта (входных переменных) и выходной переменной, характеризующей состояние объекта, экспертным путём определяются нечёткие термы и границы допустимых значений, определяющие принадлежность входных переменных к термам. Например, для входных переменных будем использовать три нечётких термина: «отлично», «хорошо» и «плохо». Терм «отлично» характеризует стабильную работу объекта, когда все регистрируемые значения показателей лежат в отрезке допустимых значений. Терм «хорошо» присваивается показателям, значения которых близки к критическим границам, но не выходят за область допустимых значений. Если регистрируемые значения показателей попадают в область критических значений, применяется терм «плохо».

Для выходной переменной определим четыре нечётких термина: «стабильная работа»; «ограниченная работоспособность» (незначительная поломка); «предаварийное состояние» (значительная поломка); «аварийное состояние» (выход из строя).

Из множества функций принадлежности для каждого нечёткого термина входных переменных экспертом задаются функции принадлежности, оптимально описывающие состояние технического объекта.

В данном алгоритме для термина «отлично» определим функцию принадлежности в виде z-подобной функции:

$$\mu_z = \begin{cases} 1, x \leq a \\ 1 - 2 \left(\frac{x-a}{b-a} \right)^2, a < x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2 \left(\frac{b-x}{b-a} \right)^2, \frac{a+b}{2} < x < b \\ 0, b \leq x \end{cases}, \quad (3)$$

для термина «плохо» – в виде s-подобной функции:

$$\mu_s = \begin{cases} 0, x \leq a \\ 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, a < x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1-2\left(\frac{b-x}{b-a}\right)^2, \frac{a+b}{2} < x < b \\ 1, b \leq x \end{cases}, \quad (4)$$

для термина «хорошо» – в виде π -подобной функции:

$$\mu_\pi = \begin{cases} 0, x \leq a \\ 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, a < x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1-2\left(\frac{b-x}{b-a}\right)^2, \frac{a+b}{2} < x < b \\ 1, b \leq x \leq c \\ 1-2\left(\frac{x-c}{d-c}\right)^2, c < x \leq \frac{c+d}{2} \\ 2\left(\frac{d-x}{d-c}\right)^2, \frac{c+d}{2} < x < d \\ 0, d \leq x \end{cases}. \quad (5)$$

На следующем этапе формируется база знаний (правил) с использованием нечётких высказываний вида « β есть α » и связок «И», «Если..., то...». Например, «Если показатели из класса X_1 принимают значения «отлично», из класса X_2 – «отлично», из класса X_3 – «отлично», то состояние объекта Y есть «стабильная работа» и т. д.

База правил строится на основе экспертных методов и знаний в области исследований. Для разных объектов исследования возможно построение своей базы знаний.

После введения адаптивной базы правил осуществляется процесс построения модели логического вывода, который включает следующие этапы.

1) Фаззификация: к чётким спрогнозированным по математическим моделям значениям показателей объекта применяются функции принадлежности (3), (4) и (5), определяются нечёткие значения входных переменных и степень истинности (μ) предпосылок каждого правила базы знаний.

2) Рассуждение: по найденным нечётким значениям входных переменных, используя базу правил, находятся нечёткие значения выходной переменной, описывающей техническое состояние объекта. Степень истинности нечётких значений выходной переменной вычисляется с использованием операции логического минимума из значений степеней истинности всех входных переменных.

3) Композиция: найденные нечёткие значения переменной выхода с использованием операции логического максимума степеней истинности объединяются в итоговое нечёткое подмножество значений выходной переменной.

4) Определение конечного результата: из полученного нечёткого множества значений переменной выхода методом центра тяжести степеней истинности определяется конечное прогнозируемое техническое состояние объекта в виде нечёткого термина: «стабильная работа», «ограниченная работоспособность», «предаварийное состояние» или «аварийное состояние».

4. Результаты эффективности разработанных алгоритмов

Эффективность разработанной методики моделирования системы временных рядов продемонстрирована на примере моделирования и прогнозирования технического состояния гидроагрегата, которое контролируется восемью датчиками, регистрирующими показания относительной и абсолютной вибрации [4,17]. В результате получена система восьми временных рядов.

Методами фрактальных анализов выявлено, что исследуемые процессы вибраций гидроагрегата являются нестационарными, обладают фрактальными свойствами, в динамике шести рядов выявлена регулярность и трендоустойчивость, два ряда оказались нетрендоустойчивыми. Используя алгоритмы адаптивного моделирования, для шести временных рядов были построены модели, содержащие тренд, авторегрессионную модель на цилиндре и ARCH-модель, для двух нетрендоустойчивых процессов построены авторегрессионные модели на цилиндре.

Для сравнения эффективности предлагаемых алгоритмов были построены математические модели системы временных рядов вибраций гидроагрегата без применения алгоритмов адаптации при нарушениях предпосылок регрессионного анализа.

Для оценки качества прогнозирования всех построенных моделей была вычислена среднеквадратическая ошибка на контрольной выборке (2). Результаты сравнения моделей по точности прогнозирования представлены в таблице 1.

Таблица 1. Среднеквадратическая ошибка моделей на контрольной выборке

Номер ряда	Адаптивное регрессионное моделирование	Моделирование без применения методов адаптации
1	2,52	3,45
2	2,22	4,69
3	1,95	2,98
4	5,13	11,47
5	3,87	4,94
6	193,93	256,89
7	2,49	5,03
8	1,36	1,92

Получено, что модели временных рядов, построенные без использования алгоритмов адаптации, проигрывают в точности прогнозирования примерно в 2 раза по сравнению с моделями, построенными с использованием подхода адаптивного моделирования.

Построенные адаптивные математические модели вибраций использованы для прогнозирования будущего состояния гидроагрегата. С помощью алгоритма прогнозирования технического состояния объекта на основе нечёткого логического вывода проведён анализ стабильности работы гидроагрегата.

Для каждого исследуемого показателя экспертным путём определена важность его влияния на состояние и стабильность работы гидроагрегата: три первых показателя вибрации были отнесены к классу X_1 (важных показателей объекта), остальные – к классу X_2 (показателей объекта средней важности); для всех исследуемых показателей вибраций гидроагрегата заданы три нечётких термина: «отлично», «хорошо» и «плохо»; определены параметры функций принадлежности (3), (4), (5) для каждого класса показателей. Для выходной переменной, характеризующей состояние агрегата, заданы четыре нечётких термина: «стабильная работа»; «ограниченная работоспособность»; «предаварийное состояние»; «аварийное состояние».

Экспертом в области исследований сформирована база правил, представленная в таблице 2.

Таблица 2. База правил

Номер правила	Класс показателей		Состояние выходной переменной
	X_1	X_2	
1	отлично	отлично	стабильная работа
2	отлично	хорошо	стабильная работа
3	отлично	плохо	предаварийное состояние
4	хорошо	отлично	стабильная работа
5	хорошо	хорошо	ограниченная работоспособность
6	хорошо	плохо	предаварийное состояние
7	плохо	отлично	аварийное состояние
8	плохо	хорошо	аварийное состояние
9	плохо	плохо	аварийное состояние

Затем проведены этапы фаззификация и рассуждение, результаты которых представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты этапов фаззификация и рассуждение

Номер наблюдения	X_1		X_2		Выходная переменная	
	Нечёткое значение	Степень истинности	Нечёткое значение	Степень истинности	Нечёткое значение	Степень истинности
1	отлично	1	хорошо	0,89	стабильная работа	0,89
2	отлично	0,99	хорошо	0,79	стабильная работа	0,79
3	отлично	1	плохо	0,91	предаварийное состояние	0,91
4	отлично	0,96	плохо	0,89	предаварийное состояние	0,89
5	отлично	0,94	хорошо	0,99	стабильная работа	0,94
6	отлично	1	хорошо	0,98	стабильная работа	0,98
7	отлично	1	хорошо	0,98	стабильная работа	0,98

Далее проведена композиция найденных нечётких значений переменной выхода и построено итоговое нечёткое подмножество значений выходной переменной, приведенной в таблице 4.

Таблица 4. Результаты этапа композиция

Номер наблюдения	Выходная переменная	
	Нечёткое значение	Степень истинности
3	предаварийное состояние	0,91
6–7	стабильная работа	0,98

Методом центра тяжести определено итоговое техническое состояние гидроагрегата в виде нечёткого термина «стабильная работа» со степенью истинности 98%.

5. Заключение

Алгоритм прогнозирования технического состояния объекта с использованием моделей нечёткого логического вывода может быть использован при эксплуатации технических объектов для принятия оперативных и эффективных решений по управлению объектом и обеспечения их надёжного и безопасного функционирования.

Достоинствами прогнозирования состояния объекта на основе нечёткого логического вывода является описание состояния объекта на естественном языке с использованием качественных оценок, кроме того, результат сопровождается значением степени истинности предположения о будущем состоянии объекта.

Однако недостаток прогнозирования технического состояния объекта на основе нечёткого логического вывода заключается в том, что база правил, типы и параметры функций принадлежности, классы и термы входных и выходных переменных постулируются человеком – экспертом, а это требует достаточно длительного и утомительного процесса подбора указанных величин. Построение окончательной модели требует зачастую агрегации знаний специалистов многих областей.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16-38-00211 мол_а.

Литература

- [1] Клячкин, В.Н. Информационно-математическая система раннего предупреждения об аварийной ситуации / В.Н. Клячкин, Ю.Е. Кувайскова, А.А. Алёшина, Ю.А. Кравцов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – № 4(4). – С. 919-923.
- [2] Клячкин, В.Н. Прогнозирование состояния объекта с использованием систем временных рядов / В.Н. Клячкин, Ю.Е. Кувайскова, Д.С. Бубырь // Радиотехника. – 2015. – № 6. – С. 45-47.
- [3] Валеев, С.Г. Регрессионное моделирование при обработке данных. 2-е изд., доп. и перераб. / С.Г. Валеев. – Казань: ФЭН, 2001. – 296 с.
- [4] Кувайскова, Ю.Е. Применение адаптивного регрессионного моделирования при описании и прогнозировании технического состояния объекта / Ю.Е. Кувайскова, А.А. Алёшина // Автоматизация процессов управления. – 2016. – № 4 (46). – С. 35-40.
- [5] Леоненков, А.В. Нечёткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
- [6] Кувайскова, Ю.Е. Анализ стабильности работы технического объекта с применением аппарата нечёткой логики / Ю.Е. Кувайскова, К.А. Федорова, Д.А. Жуков // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем. – 2016. – № 1 (10). – С. 167-171.
- [7] Кувайскова, Ю.Е. Прогнозирование состояния технического объекта на основе нечёткого логического вывода / Ю.Е. Кувайскова, К.А. Федорова // Радиоэлектронная техника. – 2016. – № 1 (9). – С. 183-188.
- [8] Кувайскова, Ю.Е. Методика структурно-параметрической идентификации системы временных рядов / Ю.Е. Кувайскова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15, № 4-4. – С. 914-918.
- [9] Павлов, А. Н. Мультифрактальный анализ сложных сигналов / А.Н. Павлов, В.С. Анищенко // Успехи физических наук. – 2007. – Т. 177. – № 8. – С. 859-876.
- [10] Кувайскова, Ю.Е. Применение фрактальных методов для анализа многомерных временных рядов / Ю.Е. Кувайскова, К.С. Фоменко // Информатика и вычислительная техника: сборник трудов VII Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, студентов и молодых ученых ИВТ-2015. – 2015. – С.327-331.
- [11] Кувайскова, Ю.Е. Трендовая модель системы временных рядов / Ю.Е. Кувайскова, Д.А. Жуков // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (70). – С. 10-13.
- [12] Крашенинников, В.Р. Прогнозирование динамики объекта с использованием авторегрессионных моделей на цилиндре / В.Р. Крашенинников, Ю.Е. Кувайскова // Радиотехника. – 2016. – № 9. – С. 36–39.
- [13] Бокс, Дж. Анализ временных рядов. Прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. – М. : Мир, 1974. – 242 с.
- [14] Валеев, С.Г. Смешанные процессы авторегрессии и скользящего среднего для обработки временных рядов / С.Г. Валеев, Ю.Е. Кувайскова // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2006. – № 4 (36). – С. 37-41.
- [15] Engle, R.F. Autoregressive Conditional Heteroskedasticity with Estimates of the Variance of U.K. Inflation / R.F. Engle // Econometrica. – 1982. – Vol.50. – P. 987-1008.
- [16] Валеев, С.Г. Использование ARCH-структур и фильтра Калмана для моделирования динамики технико-экономических показателей / С.Г. Валеев, Ю.Е. Кувайскова // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2007. – № 2 (38). – С. 29-33.
- [17] Клячкин, В.Н. Моделирование вибраций гидроагрегата на основе адаптивных динамических регрессий / В.Н. Клячкин, Ю.Е. Кувайскова, А.А. Алёшина // Автоматизация. Современные технологии. – 2014. – № 1. – С. 30-34.