

Любимова Н. А.

КОРРЕКЦИЯ ПРОГНОЗИРУЮЩИХ ПРОЦЕДУР ПРИ КОНТРОЛЕ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЫБРОСОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Рассмотрена математическая модель прогнозирования экстремальных выбросов в случайных процессах загрязнения с коррекцией на асимметрию процессов. Описана процедура параметрического тестирования многокомпонентного процесса загрязнения при многопараметрическом контроле с учетом его экстраполированных значений, разработан алгоритм параметрического теста на значимость нарушений стационарности с учетом рисков контроля первого рода. Тест реализует процедуру проверки статистических гипотез.

Ключевые слова: экология, контроль, многокомпонентное загрязнение, модель, коррекция, экстраполяция, асимметрия процессов, качество.

1. Введение

Научно-технический прогресс и современное технологическое производство немислимы без грамотно организованных автоматизации, контроля и управления. До настоящего времени существуют разночтения в подходах и его организационных решениях. Ошибки контроля при этом сказываются негативно на его качестве, не позволяют использовать его организационно-технические резервы и приводят к серьезным материальным и моральным потерям. Это обуславливает необходимость осмысления существующих теоретических наработок, разработку новых подходов и путей его реализации.

Повышение достоверности контроля объектов с динамическими свойствами — это проблема получения избыточной информации, содержащейся в случайных, обычно нестационарных по математическому ожиданию, измерительных сигналах. Такую избыточность могут дать методы обработки сигналов, учитывающие их связность и корреляционные свойства. При высокой связности, дополнительную информацию могут дать процедуры экстраполяции сигналов, однако, такая информация может быть утрачена из-за ошибок экстраполяции, возникающих при неадекватном выборе вероятностной модели сигнала или методически неправильных процедурах его обработки. Таким образом, создание скорректированных моделей прогнозирующего контроля является весьма актуальным. Особенно, это необходимо в области экологического контроля.

2. Анализ литературных данных и постановка вопроса

Статистические процедуры прогнозирования (экстраполяции) находят широкое применение в задачах контроля надежности энергетического оборудования [1], при прогнозировании работоспособности, отказов, остаточного технического ресурса [2–4]. В основном используют регрессионные модели экстраполяции 1-го порядка (по условному математическому ожиданию [5, 6]), или более сложные модели 2-го и 3-го порядка (по одной [7] или двум [8] точкам). Однако, все перечисленные модели

базируются на симметричных законах распределения случайных сигналов и плохо работают, если нарушена их стационарность, вследствие искажений формы этих законов.

Цель статьи — показать возможность параметрической коррекции процедуры экстраполяции на несимметричность закона распределения случайного процесса и обосновать построение процедуры тестирования многомерного экстраполированного процесса при контроле его экстремальных выбросов.

3. Рассмотрение общей модели прогнозирования

Наиболее приемлемы модели экстраполяции не по математическому ожиданию (регрессии), а по одному, максимум по двум точкам [7, 8].

В этом случае достаточно знать нормированную автокорреляционную функцию $\rho(\tau)$ исследуемого процесса $x(t)$, его математическое ожидание m и дисперсию σ^2 . Известный алгоритм статистического прогноза по одной точке [7], на интервале прогнозирования Θ , формирует предсказанное значение $x(t_0 - m)$, отстоящее от предыдущего отсчета $x(t_0)$ на время Θ , как:

$$\hat{x}(t_0 + \Theta) = m + \rho(\Theta)[x(t_0) - m]. \quad (1)$$

Если $x(t_0 + \Theta)$ — действительное значение процесса в момент времени $(t_0 + \Theta)$, то ошибка прогноза равна:

$$\varepsilon(t_0 + \Theta) = x(t_0 + \Theta) - \hat{x}(t_0 + \Theta),$$

а дисперсия отклонения $\varepsilon(t_0 + \Theta)$ выражается формулой:

$$D_\varepsilon = \sigma^2[1 - \rho^2(\Theta)]. \quad (2)$$

Поскольку $\rho(\Theta)$ — фактически нормированная автокорреляционная функция процесса $x(t)$, которая уменьшается от значения $\rho(\Theta=0)=1$ до $\rho(\Theta=\infty)=0$, то дисперсия D_ε ошибки прогноза по одной точке $x(t_0)$ увеличивается от нуля (при $\Theta=0$) до σ^2 (при $\Theta=\infty$).

Если Δt — интервал дискретизации процесса $x(t)$, то удобно представить дисперсию ошибки прогноза в виде:

$$D_\varepsilon = \sigma^2 [1 - \rho^2(\Delta t)]. \quad (3)$$

Последнее выражение указывает на то, что случайность появления значимой ошибки прогноза при малом Δt обусловлена случайностью значимого отклонения $x(t_0 + \Delta t)$ от математического ожидания m в стационарном процессе $x(t)$.

4. Коррекция модели прогнозирования

Математическая модель (1) экстраполяции 2-го порядка используется, главным образом, для построения прогностических фильтров для стационарных случайных сигналов. В таких моделях каждое спрогнозированное значение $x(t_0 + \Theta)$ ближе к математическому ожиданию m , чем значение предыдущее $\hat{x}(t_0)$. Естественно, что и дисперсия D_ε отклонения $\hat{x}(t_0 + \Theta)$ от фактического значения $x(t_0 + \Theta)$ меньше, чем дисперсия σ^2 исходного процесса. Это является ограничением по применению модели прогнозирования (1) по отношению к случайным выбросам, поскольку последние попросту фильтруются.

Однако, если выбросы провоцируются нарушениями стационарности по математическому ожиданию (в интервале дискретизации Δt), то имеет смысл скорректировать спрогнозированное значение на величину априори известного параметра нестационарности Δ случайного процесса, учитывающего смещение его математического ожидания по отношению к его моде и медиане [7]:

$$\begin{cases} m_x = m, & \text{если } x(t) \in \omega_0, \\ m_x = m + \Delta, & \text{если } x(t) \in \bar{\omega}, \Delta = \text{const}, \end{cases} \quad (4)$$

где Δ — параметр смещения (параметр нестационарности по математическому ожиданию); или на величину оценки его среднего значения \bar{m}_Δ :

$$\bar{m}_\Delta = \left(\sum_{i=1}^k \bar{u}_i \cdot \hat{p}_i \right) - m. \quad (5)$$

Учет такой коррекции представлен математической моделью:

$$\hat{x}(t_0 + \Theta) = m + \Delta + \rho(\Theta)[x(t_0) - m]. \quad (6)$$

Естественно, что дисперсия ошибки прогноза возрастает, и будет определяться выражением:

$$D_{\varepsilon k} = (\sigma^2 + \Delta^2)[1 - \rho^2(\Theta)]. \quad (7)$$

Модель прогнозирования (6) имеет смещение Δ и дополнительную дисперсию ошибки прогнозирования:

$$D_\Delta = \Delta^2 [1 - \rho^2(\Theta)]. \quad (8)$$

Дополнительная дисперсия D_Δ тем меньше, чем меньше интервал прогнозирования Θ . Выражение (8) показывает, что дисперсия D_Δ максимальна и равна Δ^2 , если $\Theta = \infty$. Отсюда следует, что при малых значениях времени Θ выигрыш от коррекции (по выражению 6) не снижается из-за появления составляющей D_Δ в дисперсии ошибки прогнозирования.

Можно показать, что прогнозирование выбросов, обусловленных локальной нестационарностью, процесса загрязнения тем эффективнее, чем больше компонент учитывается при контроле. Необходимо осуществлять прогнозирование выбросов не по одной, а по всем взаимно коррелированным компонентам процесса загрязнения, используя их как составляющие общего векторного процесса:

$$\bar{x}(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t)),$$

где $(x_1(t), \dots, x_n(t))$ — случайные процессы изменения во времени компонент (x_1, \dots, x_n) .

Учет при прогнозировании составляющих вектора $\bar{x}(t)$, статистически эквивалентен увеличению объема выборки значений $x_1(t_0), \dots, x_n(t_0)$, повышая структурно-информационную избыточность и увеличивая, в конечном счете, достоверность контроля. Общая процедура такого контроля может быть построена на применении операций суммирования центрированных и нормированных значений $\hat{x}_1(t), \dots, \hat{x}_n(t)$ и тестирования полученной суммы по критерию Стьюдента [9, 10].

5. Параметрический тест на значимость нарушений стационарности

Такой тест реализует процедуру проверки статистических гипотез и включает следующие этапы:

1. Выбирается уровень значимости α (риск контроля первого рода).

2. Задается статистическая модель отклонений экстраполированных значений $\hat{x}_1(t_0), \dots, \hat{x}_n(t_0)$ вектора $\bar{x}(t)$ от своих математических ожиданий m_1, \dots, m_n как n -мерная нормально распределенная случайная величина $\bar{\Delta}$ с вектором-столбцом средних значений:

$$m = \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \dots \\ m_n \end{pmatrix},$$

и диагональной дисперсионной матрицей:

$$S = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_n^2 \end{pmatrix}.$$

Плотность распределения вектора отклонений $\bar{\Delta}$ имеет вид:

$$f(\bar{\Delta}) = (2\pi)^{-n/2} |S|^{-1/2} \exp[-0,5(\bar{\Delta} - m)S^{-1}(\bar{\Delta} - m)].$$

3. Формулируются нулевая и альтернативная гипотезы:

$$H_0 = \bar{\Delta} = 0,$$

$$H_1 = \bar{\Delta} \neq 0.$$

4. Выбирается критериальная статистика:

$$t_{n-1} = n^{1/2} \cdot \sum_{i=1}^n \left[\frac{\hat{x}_i(t_0) - m_i}{\sigma_i} \right], \quad (9)$$

в которой суммируются центрированные по математическому ожиданию и нормированные по дисперсии отклонения:

$$\dot{x}_i(t_0) \sim \text{NORM}(0,1), i = 1, \bar{n}.$$

5. Выбирается критическая область $\bar{\omega}$ для статистики t :

$$\bar{\omega} = (t_{n-1, \alpha}, \infty). \quad (10)$$

6. Принимают одно из двух решений:

$$\begin{cases} \gamma_0: \text{не отвергнуть гипотезу } H_0, \text{ если } t \notin \bar{\omega}, \\ \gamma_1: \text{отвергнуть гипотезу } H_0 \text{ (не отвергнуть гипотезу } H_1), \text{ если } t \in \bar{\omega}. \end{cases} \quad (11)$$

Такой алгоритм тестирования реализует процедуру проверки статистических гипотез и позволяет оценить значимость нарушений стационарности.

6. Выводы

В результате проделанного исследования было установлено, что:

1. Использование скорректированной, в сторону увеличения математического ожидания, модели экстраполяции 2-го порядка, снижает риск контроля 2-го порядка β , при параметрическом тестировании результатов многомерной экстраполяции.

2. Уменьшение риска контроля β повышает мощность правила принятия решений и делает применение описанной скорректированной процедуры экстраполяции статистически обоснованным и более предпочтительным по отношению к другим процедурам экстраполяции.

3. Предложенные решения могут быть использованы при экологическом мониторинге, в задачах контроля выбросов и сбросов крупных энергоемких предприятий. Это, в свою очередь, позволит максимизировать количество получаемой в ходе контроля информации, гарантировать минимизацию тех его рисков, которые определяют уровень его экономических потерь при появлении экологических нарушений.

4. Планирование контроля выбросов и сбросов должно учитывать правило принятия решений на основе разработанного критерия, обеспечивающего заданную достоверность.

Литература

- Гук, Ю. Б. Теория надежности в электроэнергетике [Текст] / Ю. Б. Гук. — Л.: Энергоиздат, 1990. — 208 с.
- Филипов, М. В. Подходы к оценке остаточного ресурса технических объектов [Текст] / М. В. Филипов, А. С. Фурсов, В. В. Клюев // Контроль. Диагностика. — 2006. — № 8(98). — С. 6–16.
- Бондаренко, В. Е. Оптимизация системы информационных показателей качества трансформаторного, для технического эксплуатационного контроля маслонаполненного энергетического оборудования [Текст] / В. Е. Бондаренко, О. В. Щутенко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2003. — № 2. — С. 46–50.
- Авдеевский, В. С. Надежность и эффективность в технике [Текст]: справочник в 10 т. / под ред. В. В. Клюева, Г. П. Пархоменко; под общ. ред. В. С. Авдеевского и др. // Т. 9. Техническая диагностика. — М.: Машиностроение, 1987. — 352 с.
- Малайчук, В. П. Обработка многомерных нестационарных случайных пространственно-временных рядов в задачах мониторинга [Текст] / В. П. Малайчук, А. В. Мозговой // Методи та прилади контролю якості. — Івано-Франківськ, 2005. — № 15. — С. 90–93.
- Щапов, П. Ф. Планирование профилактического контроля маслонаполненного энергетического оборудования для выявления процессов старения с заданной достоверностью принятия решений [Текст] / П. Ф. Щапов // Електротехніка та електромеханіка. — 2005. — № 3. — С. 65–68.
- Щапов, П. Ф. Многоканальная термометрия при прогнозировании состояний термодинамических систем [Текст] / П. Ф. Щапов // Вісник НТУ «ХПИ». Тематичний випуск: Автоматика та приладобудування. — 2003. — № 7, Т. 3. — С. 155–160.
- Пат. 60390 Украина, МПК G06G7/30. Цифровой оптимальный экстраполятор нестационарного трафика компьютерных сетей [Электронный ресурс] / Гузій М. М., Андреев О. В., Ігнатів В. О., Андреев В. І.; заявник та патентовласник Національний авіаційний університет. — № 201006549; заявл. 28.05.2010; опубл. 25.06.2011, Бюл. № 12. — Режим доступу: \www/URL: http://uapatents.com/6-60390-cifrovijj-optimalnijj-ekstrapolyator-nestacionarnogo-trafikku-kompyuternikh-merez.html.
- Вентцель, Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения [Текст] / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. — М.: Высшая школа, 2000. — 383 с.
- Поллард, Дж. Справочник по вычислительным методам статистики [Текст] / Дж. Поллард; пер. с англ. В. С. Занадворова; под ред. Е. М. Четыркина. — М.: Финансы и статистика, 1982. — 344 с.

КОРЕКЦІЯ ПРОГНОЗУЮЧИХ ПРОЦЕДУР ПРИ КОНТРОЛІ ЗАБРУДНЮЮЧИХ ВИКИДІВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Розглянута математична модель прогнозування екстремальних у випадкових процесах забруднення із корекцією на асиметрію процесів. Запропонована процедура параметричного тестування багатокomпонентного процесу забруднення при багатопараметричному контролі із урахуванням його екстрапольованих значень, розроблено алгоритм параметричного тесту на значущість порушень стаціонарності із урахуванням ризиків контролю першого роду. Тест реалізує процедуру перевірки статистичних гіпотез.

Ключові слова: екологія, контроль, багатокomпонентне забруднення, корекція, екстраполяція, асиметрія процесів, якість.

Любимова Ніна Александровна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра животноводства та безпеки життєдіяльності, Харківський національний аграрний університет ім. В. В. Докучаєва, Україна, e-mail: office@knau.kharkov.ua, n.liubimova@mail.ru.

Любимова Ніна Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра тваринництва та безпеки життєдіяльності, Харківський національний аграрний університет ім. В. В. Докучаєва, Україна.

Lyubymova Nina, Kharkiv National Agrarian University named after V. V. Dokuchaev, Ukraine, e-mail: office@knau.kharkov.ua, n.liubimova@mail.ru