УДК 681.51.015

ПРЕДИКТИВНАЯ АНАЛИТИКА В ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ НА ТРАНСПОРТЕ

Т. Н. БУШТРУК

Самарский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация

А. А. БУШТРУК

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Российская Федерация

Анализ ретроспективных данных о нештатных и режимных ситуациях на транспорте при перевозках пассажиров или грузов, регламента работы оборудования обеспечит принятие своевременных и обоснованных управленческих решений по ревизии, проверке и ремонте технических узлов и устройств, распределении технических и людских ресурсов. Принятие обоснованных, адекватных управленческих решений должно базироваться на достоверной модели временного процесса, характеризующего тот или иной технологический цикл. Модель временной последовательности с квазистационарными свойствами может быть получена в результате проведения процедуры идентификации исследуемой временной последовательности по методике и алгоритмам в [1, 2].

Как известно из [3], временной процесс формируется квазистационарной линейной системой (формирующий фильтр (ФФ)) при воздействии на ее вход стационарного гауссовского белого шума. Принимается, что на участках временного ряда с квазистационарными свойствами параметры (постоянные времени, масштабные коэффициенты) меняются незначительно. Процедура подготовки данных заключается в следующем, по мере получения реализации временной последовательности отбираются равные участки, на которых идентифицируемый процесс является квазистационарным. Математически такое разбиение на участки будет записано следующим образом:

$$y(t;\Delta t_1)=\int_0^{\infty} h(\mu_1;\Delta t_1)\,x(t-\mu_1)\,d\mu_1,\ldots,y(t;\Delta t_l)=\int_0^{\infty} h(\mu_l;\Delta t_l)\,x(t-\mu_l)\,d\mu_l,$$

где $x(t)=\sigma\delta(t)$ – белый шум с неизвестным среднеквадратическим отклонением σ; $h(\mu_i;\Delta t_i)$ – импульсная переходная характеристика квазистационарного линейного ФФ; $\delta(t)$ – дельта-функция; $\Delta t_i = t_{i+1}-t_i$, $i\ldots\overline{0,l}$. Согласно постановке задачи $\Delta t_1=\Delta t_2=\cdots=\Delta t_l$.

Дробно-рациональная передаточная функция в соответствии с обратным преобразованием Лапласа от импульсно-переходной функции (ИПХ) формирующего фильтра имеет вид

$$W_{\text{фф}}^{(i)}(S)=k^{(i)}\prod_{q=1}^{m}\left(Q_q^{(i)}S+1\right)\Big/\prod_{q=1}^{n}\left(T_q^{(i)}S+1\right),$$

где $k^{(i)}$, $Q_q^{(i)}$ и $T_q^{(i)}$ – соответственно масштабные коэффициенты и постоянные времени ФФ, которые являются кусочно-непрерывными функциями.

Необходимо определить оценки $\hat{\sigma}, k^{(i)}$, $\hat{m}$, $\hat{n}$ $\hat{Q}_q^{(i)}$ и $\hat{T}_q^{(i)}$ в процессе идентификации квазистационарного формирующего фильтра на квазистационарных участках Δt_i, где $i\ldots\overline{0,l}$.

Для процедур идентификации (определения структуры и параметров линейного фильтра) разработана измерительно-вычислительная схема получения взаимных корреляционных функций для выбранных отрезков временного ряда [1, 2, 4, 5].

$$\begin{aligned}R_{Z_2Z_1}(\tau_2-\tau_1)=\int_0^{\infty}\ldots\int_0^{\infty} h_{\text{фф}}(\theta_1;\Delta t_\alpha)\,h_{\text{фф}}(\theta_2;\Delta t_\beta)\,h_{\text{ф}2}(\mu_\alpha)\,h_{\text{ф}1}(\mu_\beta)\times\\ \times R_{xx}(\tau_2-\tau_1+\theta_2-\theta_1+\mu_\alpha-\mu_\beta)\,d\mu_\alpha d\mu_\beta d\theta_1 d\theta_2.\end{aligned}\qquad(1)$$

В выражение (1) входят ИПХ формирующего фильтра (опорная модель) временного ряда и ИПХ полосовых фильтров в структуре корреляционно-спектрального анализатора [1, 2, 4, 5]. Интегралы, входящие в (1), вычисляются на основе фильтрующего свойства дельта-функций и свойства эрмитовой симметрии для ФФ. Дальнейшее преобразование выражения дает:

$$R_{Z_2Z_1}(\tau_2-\tau_1)=\sigma^2 K_{\text{фф}}^{(\beta)}\left(\omega_0^{(2)}\right)K_{\text{фф}}^{(\alpha)}\left(\omega_0^{(2)}\right)\int_{-\infty}^{\infty}\cos(\omega_0^{(1)}\mu_\beta)d\mu_\beta\times$$

$$\times\int_{-\infty}^{\infty}e^{j\omega\left(\tau_2-\tau_1-\mu_\beta-\Psi_{\text{фф}}^{(\beta)}(\omega_0^{(2)})/\omega_0^{(2)}-\theta_1\right)}e^{-j\Psi_{\text{фф}}^{(\alpha)}(\omega)}\left\{\frac{1}{2}\delta\left(\omega-\omega_0^{(2)}\right)+\frac{1}{2}\delta\left(\omega+\omega_0^{(2)}\right)\right\}d\omega.$$

Затем к интегралам по μ_κ и μ_d также применяется теорема Бореля о свёртке. После преобразований имеем:

$$\begin{aligned}&R_{Z_2Z_1}\left(\tau_2-\tau_1\right)=\sigma^2 K_{\text{фф}}^{(\beta)}\left(\omega_0\right)K_{\text{фф}}^{(\alpha)}\left(\omega_0\right)\cos\left\{\omega_0\left(\tau_2-\tau_1\right)-\Psi_{\text{фф}}^{(\beta)}\left(\omega_0\right)+\Psi_{\text{фф}}^{(\alpha)}\left(\omega_0\right)\right\},\\&R_{Z_2Z_1}\left\{-\left(\tau_1-\tau_2\right)\right\}=\sigma^2 K_{\text{фф}}^{(c)}\left(\omega_0\right)K_{\text{фф}}^{(d)}\left(\omega_0\right)\cos\left\{-\omega_0\left(\tau_2-\tau_1\right)+\Psi_{\text{фф}}^{(c)}\left(\omega_0\right)-\Psi_{\text{фф}}^{(d)}\left(\omega_0\right)\right\}.\end{aligned}\tag{2}$$

В выражение (2) входят модули и фазы комплексного коэффициента передачи ФФ. Алгоритм параметрической идентификации моделей квазистационарных временных процессов. При представлении $w_{\text{фф}}(s)$ дробно-рациональной передаточной функцией фазовая характеристика любого участка временного процесса определяется соотношением

$$\Psi^{(i)}\left(\omega_0\right)=-\sum_{q=1}^{n}\text{arctg}\,\omega_0 T_q^{(i)}+\sum_{q=1}^{m}\text{arctg}\,\omega Q_q^{(i)}\,,\tag{3}$$

где $i\ldots\overline{0,l}$. От характеристик (3) находим частные производные

$$\frac{\partial\Psi^{(i)}\left(\omega_0\right)}{\partial\omega_0 T_q^{(i)}}=-\frac{1}{1+\omega_0^2\left\{T_q^{(i)}\right\}^2}\,,\qquad\frac{\partial\Psi^{(i)}\left(\omega_0\right)}{\partial\omega_0 Q_q^{(i)}}=\frac{1}{1+\omega_0^2\left\{Q_q^{(i)}\right\}^2}\,.$$

От производных фазовых характеристик идентифицируемого участка временного ряда записываем приращения для постоянных времени

$$\Delta T_{q\kappa_1}^{(i+i,i)}=-\lambda k_1\Delta\Psi_{nq(\kappa_1-1)}(\omega_0)\left\{1+\omega_0^2\left[T_{q(\kappa_1-1)}^{(i)}\right]^2\right\}\Big/\omega_0\,.$$

Таким образом, предложенные алгоритмы обеспечивают восстановление структуры и параметров формирующего фильтра, т. е. модели исследуемого технологического процесса. Адаптация измерительно-вычислительной системы обеспечивает достоверность полученной модели. Полученные модели можно использовать в системах управления, построения прогнозов. От оценочной передаточной функция ФФ можно получить дискретную характеристику эквивалентной импульсной системы и перейти к разностному уравнению и, используя алгоритмы [3, 6], получать прогнозные значения.

Список литературы

1 **Буштрук, Т. Н.** Методы идентификации объектов и процессов / Т. Н. Буштрук, А. Д. Буштрук. – Самара : СамГАПС, 2005. – 150 с.

2 **Буштрук, А. Д.** Корреляционно-спектральный метод идентификации квазистационарных временных процессов с разрешением противоречия между точностью и быстродействием / А. Д. Буштрук, Т. Н. Буштрук, И. И. Фазлыев // А и Т. – 2011. – № 7. – С. 147–158.

3 **Бокс, Дж.** Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Вып. 1 / Дж. Бокс, Г. Дженкинс ; пер. с англ. А. Л. Левшина; под ред. В. Ф. Писаренко. – М. : Мир, 1974. – 406 с.

4 **Буштрук, Т. Н.** Двухэтапная идентификация нелинейных объектов и процессов в адаптивных системах управления / Вестник транспорта Поволжья: – 2019. – Вып. № 1 (73). – С. 72–79.

5 **Буштрук, Т.Н.**, Засов В.А. Перспективные направления моделирования и идентификации динамических систем : [монография] / Т. Н. Буштрук, В. А. Засов. – Самара : СамГУПС, 2019. – 158 с.

6 Кун, Макс. Предиктивное моделирование на практике / Макс Кун, Кьелл Джонсон. – СПб. : Питер, 2019. – 640 с.