DOI: 10.5862/JCSTCS.224.10
УДК 62-501.72: 62-501.5

Т.Н. Буштрук, М.В. Царыгин, Д.С. Кленюшин

КОМПЬЮТЕРНЫЙ ОБУЧАЮЩИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПЕРСОНАЛА ПРЕДПРИЯТИЙ ВАГОННОГО ХОЗЯЙСТВА С МОДУЛЕМ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

T.N. Bushtruk, M.V. Tsarygin, D.S. Klenjushin

A TRAINING COMPUTER COMPLEX FOR THE STAFF OF RAILCAR DEPOT ENTERPRISES WITH IDENTIFICATION AND TIME SERIES FORECASTING MODULE

Компьютерный обучающий комплекс предназначен для технического и управленческого персонала предприятий инфраструктуры вагонного хозяйства. В комплексе обеспечено интерактивное взаимодействие с исследуемыми объектами. В программный комплекс встраивается модуль идентификации временных рядов производственных процессов.

Представлены метод и алгоритм идентификации модели формирующего фильтра квазистационарных временных процессов. Получены соотношения, обеспечивающие решение задачи идентификации формирующего фильтра. Полученные модели временных рядов используются в системах управления и построении прогнозов. Адаптация измерительно-вычислительной системы идентификации обусловливает достоверность оценок прогноза. Процедуры идентификации и прогнозирования обеспечивают принятие обоснованных управленческих решений по оптимальному формированию сырьевых и технических ресурсов.

КОМПЬЮТЕРНЫЙ ОБУЧАЮЩИЙ КОМПЛЕКС; ВРЕМЕННЫЕ РЯДЫ; КОРРЕЛЯЦИОННО-СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗАТОР; ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ; СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ; ПРОГНОЗИРОВАНИЕ.

A training computer complex has been designed for the technical and management staff of a railcar depot. Interactive use of the studied objects is implemented for the complex. A module of time series identification is integrated in the program complex.

We have described a method and an algorithm for identifying time process models and time series prediction algorithms. The expression obtained gives the solution of the formed filter identification. The obtained time series models are used in the control and forecasting systems. Adaptation of the measuring and computing identification system ensures the accuracy of the forecasting assessments. Management decisions for using the material and technical resources will thus be optimal.

TRAINING COMPUTER COMPLEX; TIME SERIES; CORRELATIVE-SPECTRAL ANALYZER; IDENTIFICATION OF TIME PROCESSES; CONTROL SYSTEM; FORECAST.

Современный уровень развития транспорта предъявляет высокие требования к квалификации обслуживающего персонала для безопасности пассажирских и грузовых перевозок. Железнодорожный транспорт – важнейшая отрасль экономики, и его удовлетворительное эксплуатационное состояние обеспечивает непрерывность грузоперевозок и пассажиропотоков. Один из решающих аспектов обеспечения своевременного, качественного и технологичного ремонта – эффективная подготовка и переподготовка персонала. Применение современных технологий в процессе подготовки и переподготовки кадров соответствует концепции развития ОАО «РЖД».

Применение компьютерных обучающих комплексов является сложившейся общемировой практикой, поскольку использование в процессе обучения реального обору-

дования не всегда доступно. Программные комплексы обеспечивают концентрацию больших объемов информации, позволяют более углубленно изучать отдельные объекты, узлы, устройства и процессы производства, взаимодействовать с ними и получать практические навыки по эксплуатации технологического оборудования. В программном обеспечении реализованы интерактивное взаимодействие с информационными объектами, максимальная визуализация исследуемых объектов, использованы оригинальные метод и алгоритм идентификации временных рядов [3, 4].

Компьютерный обучающий комплекс

Моделирование (имитация) технологического процесса, производственных ситуаций окажет существенную помощь при изучении персоналом технологии осмотра вагонов. Поэтому разработка программных комплексов для целей дистанционного обучения и приобретения тренинговых навыков является актуальной.

В программный комплекс-тренажер включены все блоки, позиции, устройства и процедуры, соответствующие технологической карте осмотра вагонов, утвержденной ОАО «РЖД».

На рис. 1 показаны технологический алгоритм реализации комплекса, алгоритм функционирования программных модулей, модуль идентификации временных рядов с корреляционно-спектральным анализатором, модуль для инженерного персонала, обучающий программный комплекс техни-

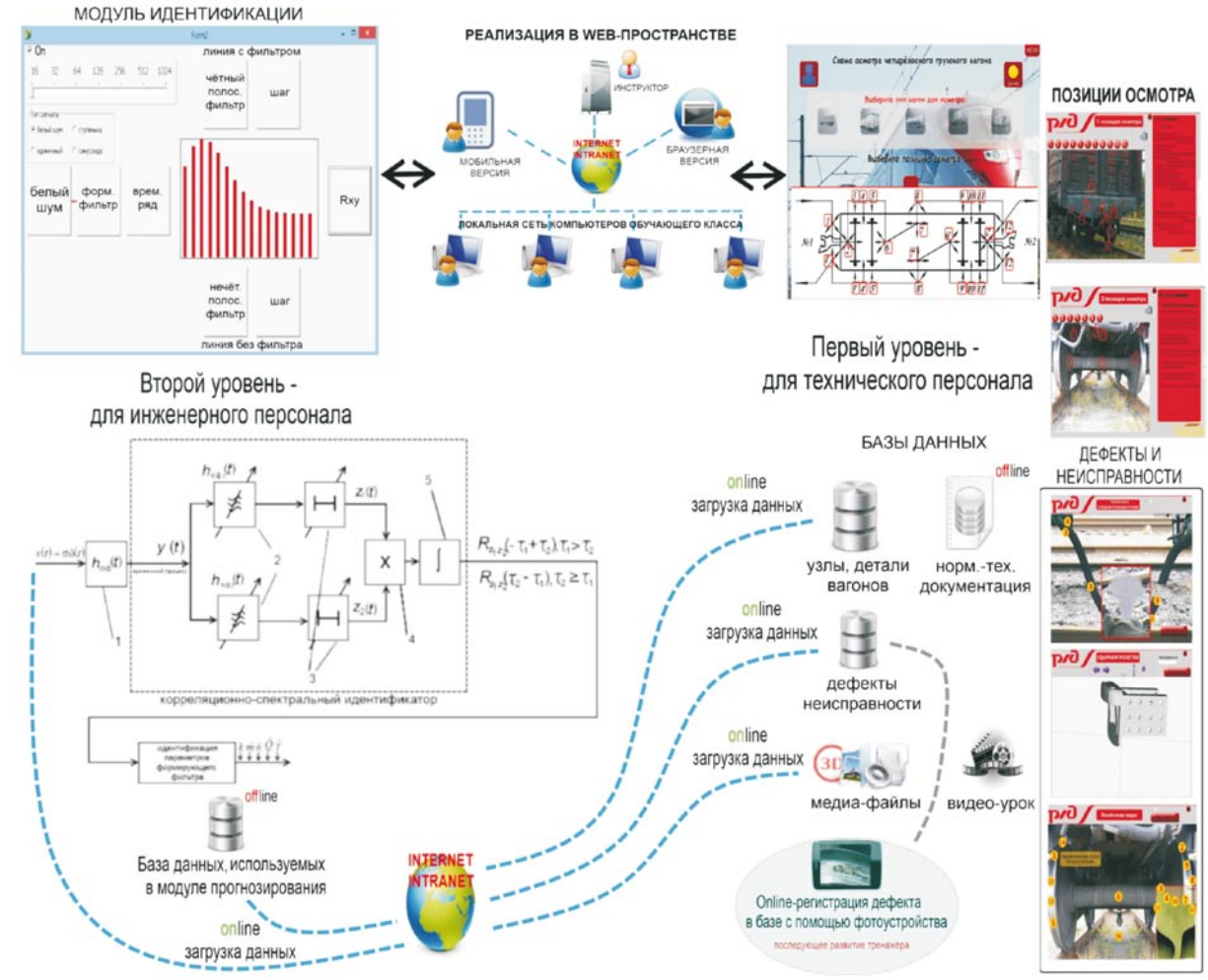


Рис. 1. Взаимодействие и содержание модулей компьютерного обучающего комплекса

ческого персонала, блок с базами данных, блок загрузки данных через сеть Интернет, Интранет, база мультимедийных данных, база неисправностей и дефектов, база узлов и деталей, блок нормативно-технической документации.

Создание библиотеки-базы данных неисправностей вагонов, возникающих при эксплуатации, позволяет их использовать в процессе обучения. Обработка временных последовательностей производственных процессов методами идентификации и использование процедур прогнозирования обеспечат формирование правильных управленческих решений по использованию материальных и технических ресурсов.

Программный комплекс может применяться для обучения эксплуатационного и ремонтного персонала, технологов ОАО «РЖД». Обучающий программный комплекс является платформой для апробации аппарата идентификации квазистационарных временных рядов.

Уравнения идентификации моделей квазистационарного временного процесса

Процедура идентификации временного ряда основана на вычислении взаимных корреляционных функций [2, 3] для равных по продолжительности участков временного процесса. Основной элемент измерительно-вычислительной системы – четные полосовые фильтры. По мере поступления реализации временного процесса выделяются участки, на которых идентифицируемый процесс является квазистационарным. Идентификация временного ряда сводится к идентификации структуры и параметров формирующего фильтра. В выражения для взаимных корреляционных функций входят модули и фазовые характеристики комплексных передаточных функций формирующего фильтра. Исследование полученных зависимостей дает решение задачи идентификации.

Согласно [5] временной процесс формируется линейным фильтром при подаче на вход сигнала типа белый шум. Предполагается, что временной процесс является квазистационарным на рассматриваемом участке, при этом масштабные коэффициенты и постоянные времени меняются незначительно.

Задание исследуемых участков математически можно представить в виде

$$y(t;\Delta t_1)=\int_0^{\infty} h(\mu_1;\Delta t_1)x(t-\mu_1)d\mu_1,\ y(t;\Delta t_2)=$$

$$=\int_0^{\infty} h(\mu_2;\Delta t_2)x(t-\mu_2)d\mu_2,\ \ldots,\ y(t;\Delta t_f)=$$

$$=\int_0^{\infty} h(\mu_f;\Delta t_f)x(t-\mu_f)d\mu_f,$$

где $h(\mu_i;\Delta t_i)$ – импульсная переходная характеристика квазистационарного линейного формирующего фильтра; $x(t)=\sigma\delta(t)$ – белый шум с неизвестным весом σ, $\delta(t)$ – дельта-функция; $\Delta t_i = t_{i+1}-t_i$, $\overline{i=1,\ f}$. Согласно постановке задачи $\Delta t_1=\Delta t_2=\cdots=\Delta t_f$.

Обратное преобразование Лапласа от импульсной переходной функции линейного формирующего фильтра есть дробно-рациональная передаточная функция (ПФ) вида:

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

где $k^{(i)}$, $Q_q^{(i)}$ и $T_q^{(i)}$ – соответственно масштабные коэффициенты и постоянные времени формирующего фильтра, которые являются кусочно-непрерывными функциями времени (на квазистационарном участке эти функции не изменяются), $m^{(i)}$, $n^{(i)}$ – порядки полиномов числителя и знаменателя ПФ.

Задача идентификации модели квазистационарного временного процесса состоит в определении оценок $\hat{\sigma}, k^{(i)}$, $\widehat{m}^{(i)}$, $\hat{n}^{(i)}$, $\widehat{Q}_q^{(i)}$ и $\widehat{T}_q^{(i)}$ в ПФ формирующего фильтра на квазистационарных участках Δt_i.

Структурная схема измерительно-вычислительной системы с корреляционно-спектральным идентификатором и блоком построения прогноза дана на рис. 2.

В состав измерительно-вычислительной системы входят корреляционно-спектральный анализатор (идентификатор) с

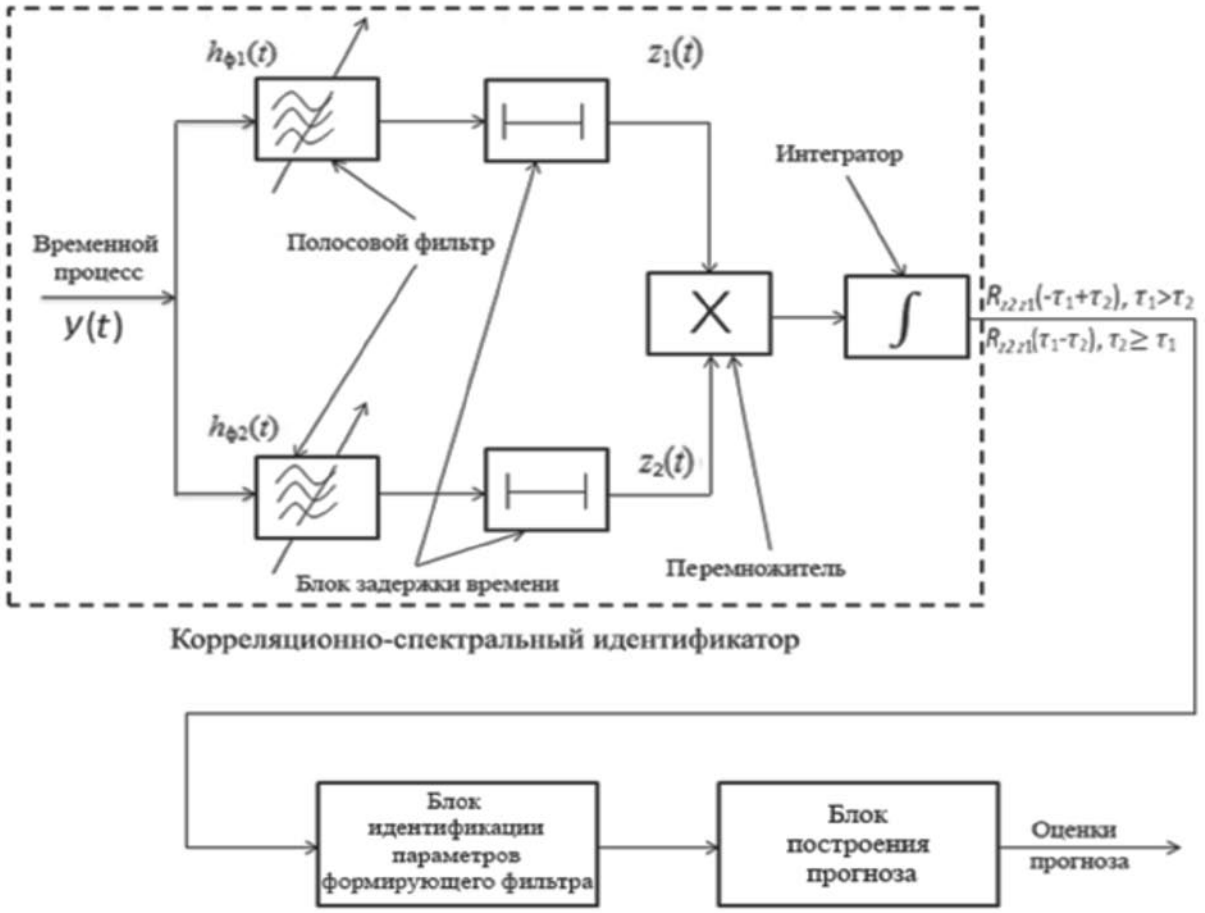


Рис. 2. Корреляционно-спектральный идентификатор с блоком прогнозирования

четными полосовыми фильтрами – $h_{фi}(t)$, блоки задержки времени, перемножитель, интегратор, блок идентификации параметров формирующего фильтра, блок формирования оценок прогноза.

Для проведения дальнейших выкладок используются сигналы $y(t)$, $z_1(t-\tau_1;\Delta t_\gamma)$ и $z_2(t-\tau_2;\Delta t_q)$, выражения для которых имеют следующий вид:

$$y(t)=\int_0^\infty h_{фф}(\theta)x(t-\theta)\,d\theta,$$

$$z_1(t-\tau_1;\Delta t_\gamma)=$$

$$=\int_0^\infty h_{ф1}(\mu_\gamma)y(t-\tau_1-\mu_\gamma;\Delta t_\gamma)\,d\mu_\gamma, \qquad (1)$$

$$z_2(t-\tau_2;\Delta t_q)=$$

$$=\int_0^\infty h_{ф2}(\mu_q)y(t-\tau_2-\mu_q;\Delta t_q)\,d\mu_q,$$

где $\gamma,q\in\overline{1,f}$, $h_{фф}(\cdot)$ – импульсная переходная характеристика формирующего фильтра, $h_{ф1}(\cdot)$ и $h_{ф2}(\cdot)$ – импульсные переходные характеристики полосовых фильтров в корреляционно-спектральном анализаторе.

Получение алгоритмов процедуры корреляционно-спектральной идентификации формирующего фильтра основано на вычислении следующих корреляционных функций:

$$R_{Z_2Z_1}(\tau_2-\tau_1)=\frac{1}{t_0-(\tau_2-\tau_1)}\times$$

$$\times\int_0^{t_0-(\tau_2-\tau_1)} z_2(t-\tau_2;\Delta t_\alpha)z_1(t-\tau_1;\Delta t_\beta)\,dt, \qquad (2)$$

$$\tau_2\geq\tau_1,$$

$$R_{Z_2Z_1}(-\tau_1+\tau_2)=\frac{1}{t_0-(\tau_1-\tau_2)}\times$$

$$\times \int_0^{t_0-(\tau_1-\tau_2)} z_1(t-\tau_1;\Delta t_c)z_2(t-\tau_2;\Delta t_d)\,dt, \qquad (2)$$

$$\tau_1 > \tau_2,$$

где α, β, c, $d \in \overline{1, f}$.

Уравнения (2) справедливы для случая, когда $t_{\text{пп}} << \Delta t_i$, где $i = \overline{1, f}$, $t_{\text{пп}}$ – время переходного процесса полосового фильтра. Также необходимо, чтобы $t_0 - (\tau_2 - \tau_1) \le \Delta t_i$, $\tau_2 \ge \tau_1$; $t_0 - (\tau_1 - \tau_2) < \Delta t_i$, $\tau_1 > \tau_2$ и $i = \overline{1, f}$.

Подставим в уравнения (2) выражения для сигналов $y(t)$, $z_1(t-\tau_1;\Delta t_\gamma)$, $z_2(t-\tau_2;\Delta t_q)$ (1) и получим следующие соотношения:

$$\begin{aligned} R_{Z_2Z_1}(\tau_2-\tau_1) &= \int_0^\infty\!\!\dots\!\int_0^\infty h_{\text{фф}}(\theta_1;\Delta t_\alpha)h_{\text{фф}}(\theta_2;\Delta t_\beta)\times \\ &\times h_{\text{ф2}}(\mu_\alpha)h_{\text{ф1}}(\mu_\beta)R_{xx}(\tau_2-\tau_1+\theta_2-\theta_1+ \\ &+\mu_\alpha-\mu_\beta)d\mu_\alpha d\mu_\beta d\theta_1 d\theta_2, \\ R_{Z_2Z_1}\{-(\tau_1-\tau_2)\} &= \int_0^\infty\!\!\dots\!\int_0^\infty h_{\text{фф}}(\theta_1;\Delta t_c)\times \\ &\times h_{\text{фф}}(\theta_2;\Delta t_d)h_{\text{ф2}}(\mu_c)h_{\text{ф1}}(\mu_d)R_{xx}\{-(\tau_1-\tau_2)+ \\ &+\theta_1-\theta_2+\mu_c-\mu_d\}d\mu_c d\mu_d d\theta_1 d\theta_2, \end{aligned} \qquad (3)$$

где $R_{xx}(\tau) = \sigma^2\delta(\tau)$ – автокорреляционная функция белого шума с неизвестной σ^2. Порядки интегрирования интегральных уравнений (2) изменялись, поскольку $\int_0^\infty h_{\text{фф}}(t)dt \ne \infty$, $\int_0^\infty h_{\text{ф1}}(t)dt \ne \infty$ и $\int_0^\infty h_{\text{ф2}}(t)dt \ne \infty$.

Структура и параметры четного полосового фильтра в корреляционно-спектральном анализаторе должны быть выбраны такими, чтобы его импульсная переходная характеристика имела вид:

$$h_{\text{ф}i}(t) = k_{\text{ф}i}\{\exp(-|t|/T_i)\cos\omega_0^{(i)}t\}/T_i,$$

где $\omega_0^{(i)}$ – центральные частоты настройки фильтров, $k_{\text{ф}i}$ – масштабные коэффициенты, T_i – постоянные времени. Предел $\lim h_{\text{ф}i}(t)$ при $T_i \to \infty$ и $k_{\text{ф}i}/T_i = 1$ равен $\cos\omega_0^{(i)}t$ при $i = 1, 2$. Предельные значения для $h_{\text{ф}i}(t)$ подставляем в (3). Получаемые при этом интегралы вычисляются на основе фильтрующего свойства дельта-функций:

$$\begin{aligned} R_{Z_2Z_1}(\tau_2-\tau_1) &= \sigma^2\int_0^\infty\int_0^\infty\int_0^\infty h_{\text{фф}}(\theta_1;\Delta t_\alpha)\times \\ &\times h_{\text{фф}}(\theta_2;\Delta t_\beta)h_{\text{ф1}}(\mu_\beta)\cos(\omega_0^{(2)}(-(\tau_2-\tau_1+\theta_2- \\ &-\theta_1-\mu_\beta)))d\mu_\beta d\theta_1 d\theta_2, \\ R_{Z_2Z_1}\{-(\tau_1-\tau_2)\} &= \sigma^2\int_0^\infty\int_0^\infty\int_0^\infty h_{\text{фф}}(\theta_1;\Delta t_c)\times \\ &\times h_{\text{фф}}(\theta_2;\Delta t_d)h_{\text{ф1}}(\mu_d)\cos(\omega_0^{(1)}(-\tau_1+\tau_2+\theta_1- \\ &-\theta_2+\mu_c))d\mu_c d\theta_1 d\theta_2. \end{aligned} \qquad (4)$$

Поскольку $h_{\text{фф}}(t)$, $h_{\text{ф1}}(t)$ и $h_{\text{ф2}}(t)$ – симметричные функции на квазистационарных участках, то для преобразования (4) используем теорему Бореля о свертке:

$$\begin{aligned} R_{Z_2Z_1}(\tau_2-\tau_1) &= \sigma^2\int_0^\infty\int_0^\infty h_{\text{фф}}(\theta_1;\Delta t_\alpha)h_{\text{ф1}}(\mu_\beta)\times \\ &\times d\theta_1 d\mu_\beta\int_{-\infty}^\infty e^{j\omega(\tau_1-\tau_2+\theta_1+\mu_\beta)}K_{\text{фф}}^{(\beta)}(\omega)\,e^{-j\Psi_{\text{фф}}^{(\beta)}(\omega)}\times \\ &\times\left\{\frac{1}{2}\delta(\omega-\omega_0^{(2)})+\frac{1}{2}\delta(\omega+\omega_0^{(2)})\right\}d\omega, \\ R_{Z_2Z_1}\{-(\tau_1-\tau_2)\} &= \sigma^2\int_0^\infty\int_0^\infty h_{\text{фф}}(\theta_1;\Delta t_c)\times \\ &\times h_{\text{ф1}}(\mu_c)\,d\theta_1 d\mu_c\int_{-\infty}^\infty e^{j\omega(\tau_1-\tau_2+\theta_1+\mu_d)}K_{\text{фф}}^{(c)}(\omega)\times \\ &\times e^{-j\Psi_{\text{фф}}^{(c)}(\omega)}\left\{\frac{1}{2}\delta(\omega-\omega_0^{(1)})+\frac{1}{2}\delta(\omega+\omega_0^{(1)})\right\}d\omega, \end{aligned} \qquad (5)$$

где $K_{\text{фф}}^{(\beta)}(\omega)$, $K_{\text{фф}}^{(c)}(\omega)$, $\Psi_{\text{фф}}^{(\beta)}(\omega)$, $\Psi_{\text{фф}}^{(c)}(\omega)$ – модули и фазы комплексных коэффициентов передачи формирующего фильтра для временных участков β и c соответственно.

Интегралы, входящие в (5), вычисляются на основе фильтрующего свойства дельта-функций и свойства эрмитовой симметрии для формирующего фильтра. Затем к интегралам по μ_α и μ_d также применяется теорема Бореля о свертке. После преобразований имеем:

$$\begin{aligned} R_{Z_2Z_1}(\tau_2-\tau_1) &= \sigma^2\int_0^\infty\int_0^\infty h_{\text{фф}}(\theta_1;\Delta t_\alpha)h_{\text{ф1}}(\mu_\beta)\times \\ &\times d\theta_1 d\mu_\beta K_{\text{фф}}^{(\beta)}(\omega_0^{(2)})\cos(\omega_0^{(2)}(\tau_1-\tau_2+\theta_1+ \\ &+\mu_\beta+\psi_{\text{фф}}^{(\beta)}(\omega_0^{(2)})/\omega_0^{(2)})), \\ R_{Z_2Z_1}\{-(\tau_1-\tau_2)\} &= \sigma^2\int_0^\infty\int_0^\infty h_{\text{фф}}(\theta_1;\Delta t_c)\times \\ &+h_{\text{ф1}}(\mu_c)d\theta_1 d\mu_c K_{\text{фф}}^{(c)}(\omega_0^{(2)})\cos(\omega_0^{(1)}(\tau_1-\tau_2+ \end{aligned} \qquad (6)$$

$$+ \theta_1 + \mu_c + \psi^{(c)}_{\text{фф}}(\omega_0^{(1)}) / \omega_0^{(1)})). \quad (6)$$

Для преобразования (6) также используем теорему Бореля о свертке:

$$R_{Z_2Z_1}(\tau_2 - \tau_1) = \sigma^2 K^{(\beta)}_{\text{фф}}(\omega_0^{(2)}) K^{(\alpha)}_{\text{фф}}(\omega_0^{(2)}) \times$$
$$\times \int_{-\infty}^{\infty} \cos(\omega_0^{(1)}\mu_\beta) \cos(\omega_0^{(2)}(\tau_2 - \tau_1 - \mu_\beta -$$
$$- \psi^{(\beta)}_{\text{фф}}(\omega_0^{(2)}) / \omega_0^{(2)})) d\mu_\beta,$$
$$R_{Z_2Z_1}(-(\tau_1 - \tau_2)) = \sigma^2 K^{(d)}_{\text{фф}}(\omega_0^{(1)}) K^{(c)}_{\text{фф}}(\omega_0^{(1)}) \times$$
$$\times \int_{-\infty}^{\infty} \cos(\omega_0^{(1)}\mu_d) \cos(\omega_0^{(1)}(\tau_2 - \tau_1 + \mu_c -$$
$$- \psi^{(d)}_{\text{фф}}(\omega_0^{(1)}) / \omega_0^{(2)})) d\mu_c.$$

Последние интегральные уравнения вычисляются на основе теоремы Бореля о свертке:

$$R_{Z_2Z_1}(\tau_2 - \tau_1) = \sigma^2 K^{(\beta)}_{\text{фф}}(\omega_0^{(2)}) K^{(\alpha)}_{\text{фф}}(\omega_0^{(2)}) \times$$
$$\times \cos\{\omega_0^{(1)}((\tau_2 - \tau_1) + \Psi^{(\beta)}_{\text{фф}}(\omega_0^{(2)}) / \omega_0^{(2)} -$$
$$- \Psi^{(\alpha)}_{\text{фф}}\omega_0^{(2)} / \omega_0^{(2)})\}; \quad (7)$$
$$R_{Z_2Z_1}(-\tau_1 + \tau_2) = \sigma^2 K^{(d)}_{\text{фф}}(\omega_0^{(1)}) K^{(c)}_{\text{фф}}(\omega_0^{(1)}) \times$$
$$\times \cos\{\omega_0^{(2)}((-\tau_1 + \tau_2) - \Psi^{(d)}_{\text{фф}}(\omega_0^{(1)}) / \omega_0^{(1)} +$$
$$+ \Psi^{(c)}_{\text{фф}}(\omega_0^{(1)}) / \omega_0^{(1)})\}.$$

При выводе формул (7) учитывалось свойство эрмитовой симметрии для δ-функций от частотных аргументов.

В случае равенства частот $\omega_0^{(2)} = \omega_0^{(1)} = \omega_0$ имеем:

$$R_{Z_2Z_1}(\tau_2 - \tau_1) = \sigma^2 K^{(\beta)}_{\text{фф}}(\omega_0) K^{(\alpha)}_{\text{фф}}(\omega_0) \times$$
$$\times \cos\{\omega_0(\tau_2 - \tau_1) + \Psi^{(\beta)}_{\text{фф}}(\omega_0) - \Psi^{(\alpha)}_{\text{фф}}(\omega_0)\}; \quad (8)$$
$$R_{Z_2Z_1}(-\tau_1 + \tau_2) = \sigma^2 K^{(d)}_{\text{фф}}(\omega_0) K^{(c)}_{\text{фф}}(\omega_0) \times$$
$$\times \cos\{\omega_0(-\tau_1 + \tau_2) - \Psi^{(d)}_{\text{фф}}(\omega_0) + \Psi^{(c)}_{\text{фф}}(\omega_0)\}.$$

Таким образом, получены выражения для взаимных корреляционных функций [2, 3], в которые входят модули комплексных передаточных функций и фазовые характеристики формирующего фильтра.

Алгоритм идентификации параметров модели формирующего фильтра

Ниже приведен алгоритм идентификации параметров [1–4] модели формирующего фильтра квазистационарных временных процессов. Для максимального быстродействия устройства идентификации проведем анализ участков временного процесса, для которых $\alpha = \beta \pm 1$, $c = d \pm 1$. Эти условия соответствуют близлежащим отрезкам временного процесса. Для первого участка имеем:

$$R_{Z_2Z_1}(-\tau_1 + \tau_2) = R_{Z_2Z_1}(\tau_2 - \tau_1) =$$
$$= \sigma^2 \{K^{(1)}_{\text{фф}}(\omega_0)\}^2 \cos(\omega_0(\tau_2 - \tau_1)). \quad (9)$$

На основе (9) определяем следующие характеристики и параметры.

1. Статическая характеристика [1, 2] находится по следующему алгоритму:

$$\{b^{(1)}_{\text{ст}}\}^2 = \max_{\omega_0} R_{Z_2Z_1}\{\pm(\tau_2 - \tau_1)\} = (k^{(1)}_{\text{фф}})^2 \sigma^2 \quad (10)$$

при $\omega_0(\tau_2 - \tau_1) = \pm 2p\pi$, где $p = \overline{0, \infty}$, $k_{\text{фф}}{}^{(1)}$ — масштабные коэффициенты, $i = \overline{1, f}$.

Идентификация квазистационарного временного процесса проводится в классе блочно-ориентированных моделей [2]. Эти модели относятся к нелинейным моделям, и вследствие этого избирательные свойства нелинейного корреляционно-спектрального анализатора должны увеличиваться при меньших значениях добротностей полосовых фильтров по сравнению с линейным случаем. Интервалы времени Δt_i, где $i = \overline{1, f}$, на которых осуществляется обработка сигналов, уменьшаются. Значение $(k^{(1)}_{\text{фф}}\sigma)^2$ можно выбрать достаточно произвольно. Из этого выбранного значения $\max_{\omega_0} R_{Z2Z1} = [k^{(1)}_{\text{фф}}\sigma]^2$ извлекаем квадратный корень и определяем значение $(k^{(1)}_{\text{фф}}\sigma)$, которое является статической характеристикой $b^{(1)}_{\text{ст}}$. Аналогично определяются статические характеристики [2, 4] и на других отрезках времени Δt_i, где $i = \overline{1, f}$.

2. Частотные функции для первого участка, частотные функции для второго участка, взаимная частотная функция между первым и вторым участками и т. д. квазистационарного временного процесса определяются соотношениями:

$$\max_{(\tau_2 - \tau_1)} R_{Z_2Z_1}\{\pm(\tau_2 - \tau_1)\} = \sigma^2 \{K^{(1)}_{\text{фф}}(\omega_0)\}^2, \quad (11)$$

$$\max_{(\tau_2-\tau_1)} R_{Z_2Z_1}\{\pm(\tau_2-\tau_1)\} = \\ = (K_{\text{фф}}^{(1)}(\omega_0)K_{\text{фф}}^{(2)}(\omega_0))\sigma^2, \quad (11)$$

$$\max_{(\tau_2-\tau_1)} R_{Z_2Z_1}\{\pm(\tau_2-\tau_1)\} = \sigma^2\{K_{\text{фф}}^{(2)}(\omega_0)\}^2.$$

От функций (7) и (8) строятся знаковые функции при сдвигах 0 и $\pi/2$:

$$\text{sign}[R_{z2z1}^{(0)}(\omega_0,\tau)],\ \ \text{sign}[R_{z2z1}^{(\pi/2)}(\omega_0,\tau)].$$

От функций (7), (8) и (11) строятся логарифмические функции и разницы между логарифмическими функциями для исследуемых участков [2]:

$$\hat{L}_k^{(0)} = \hat{L}_k^{(0)}(\omega_0,\pm\tau),\ \ \hat{L}_k^{(\pi/2)} = L_k^{(\pi/2)}(\omega_0,\pm\tau),$$

где $k \div \overline{1,n},\ \hat{L}_k^{(.)} = 20\lg\left|[R_{z2z1}(\omega_0,\tau)]\right|$.

Все эти функции являются частотно-временными критериями [2], по которым можно определить структуру модели для формирующего фильтра. Аналогичные частотно-временные критерии приведены в работах [1–3].

В общем случае корреляционно-спектральный идентификатор может быть представлен блочно-ориентированной моделью, в которую входит перемножитель. Наличие нелинейного элемента обеспечивает улучшение избирательности корреляционно-спектрального анализатора при меньших значениях добротностей полосовых фильтров [4].

В результате проведения процедур идентификации в общем случае для системы с постоянными сосредоточенными параметрами можно перейти к дискретной передаточной функции эквивалентной импульсной системы

$$K_*(z) = \frac{A_0 + A_1 z + ... + A_{l-1}z^{l-1} + A_l z^l}{1 + B_1 z + ... + B_{m-1}z^{m-1} + B_m z^m} = \\ = \frac{\sum_{k=0}^{l} A_k z^k}{1 + \sum_{k=1}^{m} B_k z^k}.$$

Построение прогноза

Известны подходы к прогнозированию [5], основанные на представлении временного ряда в виде бесконечной взвешенной суммы текущего и предшествующих импульсов как бесконечной взвешенной суммы предыдущих наблюдений плюс случайный импульс и представлении модели процесса в виде разностного уравнения. Наиболее предпочтительным является представление модели процесса (формирующего фильтра) в виде разностного уравнения.

Выражение для получения прогнозных значений временного ряда при наличии адекватной модели формирующего фильтра в общем имеет вид

$$y[n+l] = \sum_{i=0}^{n+l} h(i)x(n-i).$$

Для получения прогноза нужно выразить полученную модель процесса в виде разностного уравнения. Процедура получения значений прогноза $\hat{y}_t(l)$ приведена в [5]. Достоверность полученных прогнозных значений временного ряда обеспечивается адаптацией измерительно-вычислительной системы идентификации.

Функциональность компьютерного обучающего комплекса существенно повышается за счет включения в структуру комплекса модуля идентификации временных рядов по производственным потокам. Данные обрабатываются методами идентификации [2–4] с целью получения моделей временного ряда для дальнейшего использования их в системах управления и прогнозах. Блок идентификации и прогнозирования обеспечит принятие обоснованных управленческих решений по оптимальному формированию сырьевых и технических ресурсов. Эти модули могут быть использованы при проведении тренинговых мероприятий с персоналом управленческого звена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Буштрук А.Д., Буштрук Т.Н.** Структурная идентификация нелинейных динамических объектов в режиме пассивного эксперимента // Автоматика и телемеханика. 2001. № 8. С. 61–67.

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

3. **Буштрук А.Д., Буштрук Т.Н.** Корреляционно-спектральный метод идентификации квазистационарных временных процессов // Автоматика и телемеханика. 2005. № 2. С. 46–54.

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

5. **Бокс Дж., Дженкинс Г.** Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Пер. с англ. М.: Мир, 1974. Вып. 1.

REFERENCES

1. **Bushtruk A.D., Bushtruk T.N.** Strukturnaya identifikatsiya nelineynykh dinamicheskikh obyektov v rezhime passivnogo eksperimenta [Structural identification of nonlinear dynamic objects in a passive mode, the experiment]. *Avtomatika i telemekhanika* [*Automatics and telemechanics*], 2001, No. 8, Pp. 61–67. (rus)

2. **Bushtruk T.N., Bushtruk A.D.** *Metody identifikatsii obyektov i protsessov* [*Methods of identification of objects and processes*], Samara: SamGAPS Publ., 2005, 150 p. (rus)

3. **Bushtruk A.D., Bushtruk T.N.** Korrelyatsionno-spektralnyy metod identifikatsii kvazistatsionarnykh vremennykh protsessov [Correlation-spectral identification method for quasi-stationary time processes]. *Avtomatika i telemekhanika* [*Automatics and telemechanics*], 2005, No. 2, Pp. 46–54. (rus)

4. **Bushtruk A.D., Bushtruk T.N., Fazlyyev I.I.** Korrelyatsionno-spektralnyy metod identifikatsii kvazistatsionarnykh vremennykh protsessov s razresheniyem protivorechiya mezhdu tochnostyu i bystrodeystviyem [Correlation-spectral identification method for quasi-stationary time processes with a resolution of the contradiction between accuracy and speed]. *Avtomatika i telemekhanika* [*Automatics and telemechanics*], 2011, No. 7, Pp. 147–158. (rus)

5. **Boks Dzh., Dzhenkins G.** *Analiz vremennykh ryadov. Prognoz i upravleniye* [*Time series analysis. Forecast and Control*], Moscow: Mir Publ., 1974, Vol. 1. (rus)

БУШТРУК Татьяна Николаевна – *доцент кафедры электротехники Самарского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.*
443066, Россия, г. Самара, 1-й Безымянный пер., д. 18.
E-mail: btnsam@mail.ru

BUSHTRUK Tatyana N. *Samara State Transport University.*
443066, 1st Bezymjannyi lane, 18, Samara, Russia.
E-mail: btnsam@mail.ru

ЦАРЫГИН Максим Вячеславович – *аспирант кафедры электротехники Самарского государственного университета путей сообщения.*
443066, Россия, г. Самара, 1-й Безымянный пер., д. 18.
E-mail: max_crazzy@mail.ru

TSARYGIN Maksim V. *Samara State Transport University.*
443066, 1st Bezymjannyi lane, 18, Samara, Russia.
E-mail: max_crazzy@mail.ru

КЛЕНЮШИН Дмитрий Сергеевич – *инженер-технолог эксплуатационного депо дирекции инфраструктуры подвижного состава Приволжской железной дороги.*
413108, Россия, Саратовская область, г. Энгельс-8.
E-mail: klenyshinds@gmail.com

KLENJUSHIN Dmitry S *Privolgskay geleznay doroga*.
413108, Engels 8, Saratov region, Russia.
E-mail: klenyshinds@gmail.com

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2015