

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПУТЕМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ**

В статье приведено описание применения методов идентификации параметров систем к прогнозированию динамических процессов

Задачи прогнозирования поведения любых объектов, независимо от их характера и свойств являются априорно актуальными. Особый интерес представляют задачи прогнозирования поведения сложных объектов (далее систем), когда создание их моделей, основанных на физических принципах, крайне затруднительно по причине полного или частичного отсутствия информации об их внутренней структуре или законах, определяющих внутреннюю логику их поведения. При этом возможность создания моделей, адекватных исследуемым системам позволяет решать задачи не только прогноза, но и оптимального управления ими, а также разработки стратегий, позволяющих достичь желаемого качества или динамики их параметров.

В работе [1] приведена достаточно общая классификация методов прогнозирования, которые делятся на:

- субъективные, а именно:
  - суждений (экспертных оценок);
- объективные, в которых выделяются:
  - «наивные»;
  - причинно – следственные, из них:
    - линейные;
    - классификационные.

Субъективные методы прогнозирования сводятся, в основном, к улучшению представления исходных данных для прогноза с последующим их анализом, который базируется на принципах учета субъективного опыта или элементах эвристического подхода.

Объективные методы предсказания основываются на статистических [2, 3] (в том числе адаптивных [4]) или иных (например, оптимального управления [5] или иных [6, 7]) математических методах. При этом выделяются «наивные» методы предсказания, например, основанные на экстраполяции отдельного исследуемого параметра [2, 3], а также причинно – следственные, в которых обычно рассматривается комплекс параметров, характеризующий исследуемую систему, представляемую линейной или структурной моделью.

Одно из перспективных направлений создания прогнозирующих моделей представляют собою обучаемые системы, основанные, например, на теории нейронных сетей [8], идеология которых предполагает использование распределенных простых вычислительных модулей (блоков), объединенных в иерархические структуры с помощью настраиваемых информационных связей.

В рамках реализации программы информатизации железнодорожного транспорта [9], также развития [10] принципов автоматизированной системы управления локомотивами и локомотивными бригадами (АСУ ЛОКБРИГ) весьма важным представляется дополнение информационных систем, обеспечивающих автоматизацию процессов, непосредственно связанных с работой железнодорожного транспорта средствами, позволяющими обосновать стратегию управления отраслью и принятие решений по обеспечению ее функционирования.

Данная задача, применительно к работе железнодорожного локомотивного хозяйства, может быть решена путем разработки системы анализа-прогноза (САП) его состояния и показателей, которая может являться основным инструментом разработки рациональной стратегии управления им.

Но локомотивное хозяйство, как и каждая сложная система, характеризуется чрезвычайно широким спектром показателей и параметров. Только к основным из них можно отнести:

- финансовые показатели;
- количественные показатели персонала, парка тягового подвижного состава (ТПС) и его элементов;
- качественные показатели работоспособности техники, ее узлов и агрегатов и работы работников локомотивного хозяйства;
- технические показатели надежности основных средств и оборудования, ремонтпригодности и прочие;
- количественные показатели материально-технического обеспечения;
- технические показатели состояния несущих конструкций, оборудование ТПС и других технических единиц;
- количественные показатели эксплуатации ТПС и процесса перевозок (ремонт, пробег, простой, объем перевозок и др.);
- экологические, медицинские, рейтинговые характеристики, личные качества работников аппарата управления и исполнителей и другие показатели, которые тяжело подвергаются формализации.

Необходимо также иметь в виду, что локомотивное хозяйство имеет свою структуру и внутреннюю подчиненность, поэтому модель его работы должна давать возможность анализировать и оценивать характеристики работы его отдельных структурных единиц.

Создание физически обоснованной модели сложной системы, которой является локомотивное хозяйство, практически невозможно. В этом случае могут быть применены принципы создания нефизических моделей (напр. [11]). Основной проблемой их использования является идентификация параметров.

В качестве ядра системы САП (решателя) предлагается использовать линейную математическую модель вида

$$\dot{\lambda} = D\lambda \quad (1)$$

где  $\lambda_i, \dot{\lambda}_i$  - вектор-столбец  $i=1, k$  основных критериев, количественных показателей и параметров работы локомотивного хозяйства и его первая производная;  $k$  - общее количество показателей, которые включены в состав САП;  $D$  - квадратная матрица размерности  $[k, k]$  коэффициентов  $d_{ij}$  влияния системы дифференциальных уравнений (1), определяющих одновременно ее структуру и связи между показателями.

Для идентификации  $k^2$  коэффициентов  $d_{ij}$  уравнения (1) воспользуемся методом наименьших квадратов (МНК) [12, 13]. Выбор данного метода для идентификации структуры системы обусловлен следующим:

- при наличии избыточной информации МНК дает наилучшее в среднем приближение к истинному решению;
- при появлении не систематической, аддитивной ошибки оценивания отдельных показателей, МНК обеспечивает ее автоматическую компенсацию в случае существования достаточной предыстории поведения системы.

Под предысторией поведения системы объемом  $n \geq k$  будем понимать совокупность ее показателей во временной области, а именно

$$\lambda_i(l) = \lambda_i(t - l \cdot h), l = \overline{0, n-1}, \quad (2)$$

где:  $t$  – текущее время;  $h$  – период фиксации состояний системы.

Будем считать, что величина предыстории системы достаточна для образования избыточной системы уравнений относительно определяемых коэффициентов влияния. Определим эту систему следующим образом

$$LR = P \quad (3)$$

В уравнении (3): вектор  $L$  представляет собой развертку матрицы  $D$ , а именно  $L^T = \left[ \begin{array}{|c|c|c|} \hline d_{1,1} & d_{1,2} & d_{1,k} \\ \hline \end{array} , \begin{array}{|c|c|c|} \hline d_{2,1} & d_{2,2} & d_{2,k} \\ \hline \end{array} \dots \begin{array}{|c|c|c|} \hline d_{k,1} & d_{k,2} & d_{k,k} \\ \hline \end{array} \right]$

Матрица  $R$ , в соответствии с изложенной в [13] методикой решения избыточных систем линейных уравнений, является блочно-диагональной матрицей вида

$$R = \left[ \begin{array}{|c|c|c|} \hline r_{1,1} & r_{1,2}^l & r_{1,k}^l \\ \hline r_{2,1} & r_{2,2} & r_{2,k} \\ \hline r_{k,1} & r_{k,2} & r_{k,k} \\ \hline \end{array} \quad \dots \quad \begin{array}{|c|c|c|} \hline r_{1,1} & r_{1,2}^l & r_{1,k}^l \\ \hline r_{2,1} & r_{2,2} & r_{2,k} \\ \hline r_{k,1} & r_{k,2} & r_{k,k} \\ \hline \end{array} \quad \dots \quad \begin{array}{|c|c|c|} \hline r_{1,1} & r_{1,2} & r_{1,k} \\ \hline r_{2,1} & r_{2,2} & r_{2,k} \\ \hline r_{k,1} & r_{k,2} & r_{k,k} \\ \hline \end{array} \right]$$

где  $r_{i,j} = \sum_{l=0}^{n-1} \lambda_i(l) \lambda_j(l)$  - коэффициент взаимной корреляции показателей  $\lambda_i$  и

$\lambda_j$ ;  $k$  - максимальное количество контролируемых критериев или показателей;  $n$  - длина предыстории функционирования системы.

Вектор  $P$ , согласно [13] представляет собой вектор следующего вида:

$$P^T = \left[ \begin{array}{|c|c|c|} \hline \Lambda_{1,1} & \Lambda_{1,2} & \Lambda_{1,k} \\ \hline \end{array} , \begin{array}{|c|c|c|} \hline \Lambda_{2,1} & \Lambda_{2,2} & \Lambda_{2,k} \\ \hline \end{array} \dots \begin{array}{|c|c|c|} \hline \Lambda_{k,1} & \Lambda_{k,2} & \Lambda_{k,k} \\ \hline \end{array} \right], \text{ где его}$$

элементы определены [13] как  $\Lambda_{i,j} = \sum_{l=0}^{n-1} \lambda_j(l) \lambda_i(l)$ .

С целью решения конкретных задач управления системой и анализа ее работы может быть введен набор зависимых показателей, который может приниматься в виде

$$\Pi_m = \sum_i \lambda_i \in A_m, i = k_1, k_2, \dots, k_N \quad (4)$$

$$K_m = \sum_i \alpha_i \lambda_i \in P_m, i = k_1, k_2, \dots, k_N$$

где  $\Pi_m$  – итоговый зависимый параметр, который принадлежит к типу  $A_m$ ;  $k_1, k_2, \dots$  – порядковые номера параметров в уравнении (1), которые принадлежат к типу  $A_m$ ;  $K_m$  – взвешенная оценка;  $\alpha_i$  – коэффициенты веса параметров, которые должны относиться до одного и того же структурного подраздела  $P_m$ .

Использование модели (1) планируется следующим образом.

На первой стадии выполняется накопление необходимой информации и “обучение” модели путем идентификации коэффициентов матриц  $D$  и  $R$ . Поскольку компоненты матрицы  $D$  могут быть построены на основании использования линейно зависимых характеристик системы, она может оказаться вырожденной, что требует дополнительного анализа перечня характеристик (параметров) системы и исключения зависимых переменных. На второй стадии с помощью созданной модели выполняются ее основные задачи:

- прогноз результата управляющих воздействий на характеристики и качество функционирования системы;
- прогноз результата изменения условий и связей системы на ее характеристики и качество функционирования;
- разработка рационального управления системой с использованием соответствующего математического аппарата;
- решение задач распределению, планирование и снабжение.

Создание работоспособной модели оценки и прогноза показателей работы локомотивного хозяйства требует длительного периода уточнения их перечня. Поэтому в качестве примера рассмотрим применение предложенного алгоритма для идентификации структуры и параметров трехмассовой упруго – диссипативной механической системы. Колебания системы описываются шестью дифференциальными уравнениями в форме Коши. Начальное возмущение на систему введено как начальная скорость одной из масс, после чего она совершает свободные затухающие колебания.

Сравнение результатов непосредственного численного моделирования динамических процессов в указанной выше системе и результатов, основанных на идентификации параметров системы рассмотренным в работе методом, проведены на рис. 1 - 6.

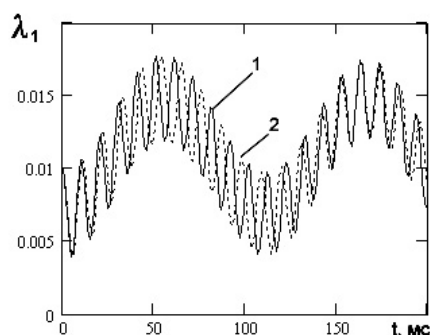


Рис. 1. Сравнение моделирования параметра  $\lambda_1$ .  
1 – непосредственное моделирование; 2 – идентификация и прогноз.

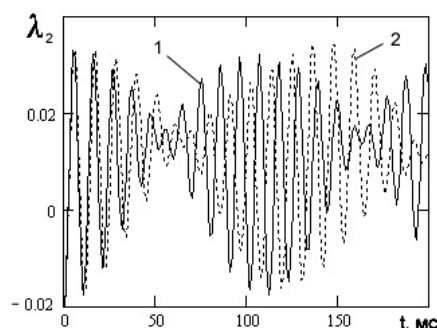


Рис. 2. Сравнение моделирования параметра  $\lambda_2$ .  
1 – непосредственное моделирование; 2 – идентификация и прогноз.

Идентификация переменных системы (обозначенных  $\lambda_1 - \lambda_6$ ) осуществлялась на базе первой половины общей выборки отсчетов состояний системы, таким образом, вторую ее половину можно квалифицировать как прогноз поведения рассмотренной механической системы.

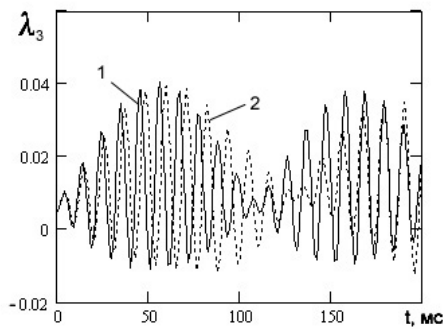


Рис. 3. Сравнение моделирования параметра  $\lambda_3$ .  
1 – непосредственное моделирование; 2 – идентификация и прогноз.

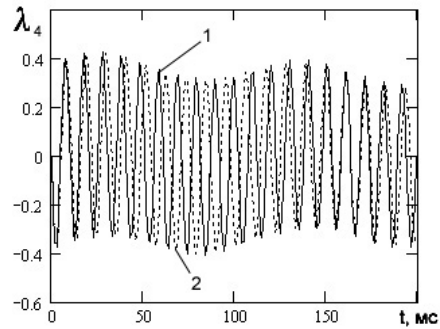


Рис. 4. Сравнение моделирования параметра  $\lambda_4$ .  
1 – непосредственное моделирование; 2 – идентификация и прогноз.

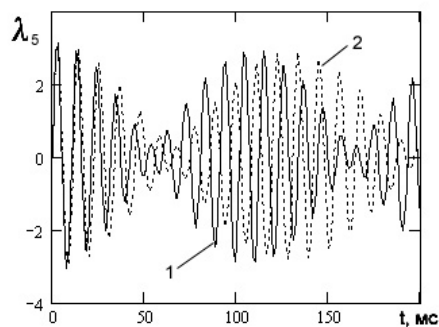


Рис. 5. Сравнение моделирования параметра  $\lambda_5$ .  
1 – непосредственное моделирование; 2 – идентификация и прогноз.

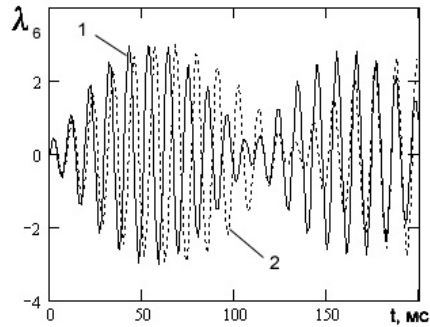


Рис. 6. Сравнение моделирования параметра  $\lambda_6$ .  
1 – непосредственное моделирование; 2 – идентификация и прогноз.

При этом следует отметить наличие погрешностей в оценке собственных частот колебаний исследуемой системы, что подсказывает направление дальнейшего его совершенствования. Следует также развить способы оценки линейной независимости используемых в модели характеристик системы с целью обеспечения единственности результата идентификации ее параметров.

Изложенный в работе материал позволяет сделать следующие выводы:

1. Предложена причинно – следственная линейная модель, позволяющая достаточно идентифицировать параметры (и, таким образом, структуру) сложных объектов и осуществлять прогноз их поведения.
2. Предложенная модель предположительно может быть использована для идентификации широкого круга объектов разного характера и физической природы.
3. Выполнена апробация предложенного метода на примере линейной механической системы.
4. Направление дальнейшего совершенствования предложенного алгоритма заключается в уточнении идентифицируемых параметров с целью более точной оценки собственных частот исследуемых систем.

## Список литературы

1. Armstrong J. Scott. Long – range forecasting From Crystal Ball to Computer. – New York: A Wiley - interscience publication, 1985. – 685 p.
2. Бендат Дж. Применения спектрального и корреляционного анализа/ Дж. Бендат, А. Пирсол. –М.:Мир, 1983. – 312 с.
3. Купер Дж. Вероятностные методы анализа сигналов и систем/ Дж Купер., К. Макгиллем. –М.:Мир, 1989. – 375 с.
4. Уидроу Б. Адаптивная обработка сигналов/ Б. Уидроу, С. Стирнз. –М: Радио и связь, 1989. – 440 с.
5. Алексеев В.М. Оптимальное управление/ В.М. Алексеев, В.М. Тихомиров, Фомин С.В.. –М.:Наука,1979. –429 с.
6. Винер Н. Теория предсказания: В кн. Современная математика для инженеров/Под.ред. Э.Ф. Беккенбаха, –М. :Издательство иностранной литературы, 1959. – 500 с.
7. Винер Н. Теория динамического планирования: В кн. Современная математика для инженеров/ Под. ред. Э.Ф. Беккенбаха, –М. :Издательство иностранной литературы, 1959. –500 с.
8. Jain A.. Artificial Neural Networks: A Tutorial/ Anil K. Jain, Jianchang Mao, K.M. Mohiuddin. // Computer, Vol.29, No.3, March/1996, pp. 31-44.
9. Основні напрямки розвитку інформатизації залізничного транспорту України (Затверджено наказом УЗ №237-Ц від 07.05.2001). Київ: Укрзалізниця, 2001. – 27 с.
10. Проект типових рішень щодо створення автоматизованої системи управління локомотивами та локомотивними бригадами (АСУ ЛОКБРИГ). – К.: Мінтранс України – Укрзалізниця,2001. – 49 с.
11. Северцев В.А. Статистическая теория подобия: надежность механических систем/ В.А. Северцев, В.Г. Шолкин, Г.А. Ярыгин. –М: Наука, 1986. – 205 с.
12. Иванов В.В. Методы вычислений на ЭВМ: Справочное пособие –К.: Наук. думка, 1986. –584 с.
13. Дринфельд Г.И. Интерполирование и способ наименьших квадратов. – К: Вища школа, 1984. – 103 с.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Горобец Владимир Леонидович – д.т.н., ведущий научн. сотр., Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна.

Зиненко Ольга Леонидовна – к.т.н., заместитель начальника Главного управления локомотивного хозяйства, Укрзалізниця.

Чирков Алексей Леонидович – нач. отдела промышленного и гражданского проектирования, Государственное предприятие "Днепропетровский проектно - изыскательный институт железнодорожного транспорта Украины" ДП "Днепрожелдорпроект"

In the article description of application of methods of authentication of parameters of the systems is resulted to prognostication of dynamic processes