

Прогнозирование технического состояния объектов наземных комплексов на основе принципа многомодельности

Forecasting of ground complex elements technical state based on multi-model principle

Ключевые слова: техническое состояние – technical state; потенциально опасный объект – potentially dangerous object; многомодельное прогнозирование – multi-model forecasting; объект наземных комплексов – ground complex element.

В статье описан способ многомодельного прогнозирования технического состояния объектов наземных комплексов, основанный на применении процедуры целенаправленного выбора модели прогнозирования из базы моделей в зависимости от характеристик прогнозной ситуации, учитывающей сочетание как параметров прогнозируемого процесса, так и количества и качества исходной информации. Рассмотрены возможности реализации автоматизированной процедуры такого выбора с использованием последовательного многоэтапного подхода (многоуровневой идентификации).

Described in the article is a method of multi-model forecasting of ground complex elements technical state based on application of the purposeful forecasting model selection from the base of models, depending on the forecast situation characteristics which take into account a combination of both parameters of the process being forecast and quantity and quality of the initial information. Possibilities of implementing the automated procedure of such selection with application of sequential multi-stage approach (multi-level identification) are also considered.

Многообразие потенциально опасных объектов наземных комплексов (ПО ОНК) и условий прогнозирования их технического состояния (ТС) порождает многовариантность ситуаций прогнозирования. Особенностью реального процесса прогнозирования технического состояния ПО ОНК является принципиальная нестабильность

БЕССОНОВ / BESSONOV P.

Павел Евгеньевич

(bessonov.pe@szte.ru)

старший научный сотрудник,
филиал ФГУП «ЦЭНКИ» – «ЦЭНКИ – Северо-Запад»,
Санкт-Петербург

ПИВОВАРОВ / PIVOVAROV O.

Олег Григорьевич

(command@usst3.spb.ru)

начальник ФГУП «ГУССТ № 3 при Спецстрое России»,
Санкт-Петербург

прогнозной ситуации. Ее изменчивость обусловлена как периодической сменой объекта прогнозирования (элементов ПО ОНК) в процессе контроля ТС ПО ОНК, так и меняющимися условиями прогнозирования.

В зависимости от конкретной прогнозной ситуации будут существенно отличаться начальные условия, определяющие требования и ограничения к применяемому методу прогнозирования ТС элемента ПО ОНК. Эти отличия, прежде всего, касаются следующих моментов: характеристик случайных процессов изменения определяющих параметров элементов ПО ОНК; характеристик случайного процесса ошибок измерений; объема исходных данных (количества точек временного ряда (ВР), представляющего результаты контроля, объема априорной информации о параметрах аналогичных элементов). При разработке подходов к прогнозированию ТС элементов ПО ОНК необходимо учитывать возможность широкого варьирования перечисленных выше факторов.

Исходя из этого, методология прогнозирования ТС элементов ПО ОНК должна базироваться на следующих основополагающих принципах: наиболее полном учете физических особенностей построения и функционирования элементов ПО ОНК в целом, наиболее полном учете индивидуальных особенностей изменения ТС элементов ПО ОНК, адаптивном учете изменения количе-

ства и качества используемых при прогнозировании исходных данных, автоматизации основных процедур построения прогнозирующих моделей и получения результатов расчетов. При этом невозможно ограничиться одной моделью прогнозирования ТС [1]. В зависимости от конкретной ситуации необходимо использовать определенную модель прогнозирования из некоторой базы моделей. В связи с этим актуальной задачей является подбор оптимальной совокупности используемых моделей прогнозирования (базы моделей) и, собственно, выбор конкретной модели из базы моделей в отдельных ситуациях.

Таким образом, эффективное решение задачи прогнозирования ТС элементов ПО ОНК при описанных выше условиях возможно только на основе многомодельного подхода. При этом возникает ряд проблем, без разрешения которых невозможно прогнозировать ТС элементов ПО ОНК с заданными показателями точности и достоверности, а именно:

- 1) определение исходного множества моделей, в совокупности описывающих основные закономерности изменения определяющих параметров элементов ПО ОНК;

- 2) выбор адекватной математической модели в конкретной прогнозной ситуации с учетом типа объекта прогнозирования, количества и качества исходной информации;

- 3) формулировка правил адаптивного изменения прогнозирующей модели (перехода к другой модели) в условиях изменения объема исходных данных;

- 4) автоматизация процессов построения моделей, используемых для прогнозирования ТС элементов ПО ОНК.

Приведем общую характеристику процесса идентификации модели объекта прогнозирования. Задача идентификации математической модели объекта прогнозирования (здесь и далее под объектом прогнозирования (ОП) мы будем понимать элемент ПО ОНК) подразумевает выбор типа модели и оценивании ее неизвестных параметров на основе анализа априорной и апостериорной (экспериментальной) информации об объекте прогнозирования. Необходимо отметить, что в зависимости от уровня использования априорной информации об объекте различают задачи идентификации в узком и широком смысле [2]. Идентификация в узком смысле заключается в оценивании неизвестных параметров заданного математического оператора по экспериментальной информации. При этом структура оператора (структура модели) постулируется на основе априорной информации. Априорная информация следует из основных физических законов, которые заложены

в основу развития постепенных отказов объекта, а также из опыта эксплуатации подобных объектов. Экспериментальная информация получается в результате обработки наблюдений за параметрами объекта в процессе эксплуатации.

Пусть $\omega_i, i=1, N$ означает определенное свойство объекта прогнозирования (ОП), а $\bar{\omega}_i$ – противоположное ему свойство. Тогда элемент Ω_j множества

$$\Omega = \{\Omega_j : (\omega_1 \cup \bar{\omega}_1) \cap (\omega_2 \cup \bar{\omega}_2) \cap \dots \cap (\omega_N \cup \bar{\omega}_N)\} \quad (1)$$

определяет логически обоснованную комбинацию наиболее общих свойств объекта, которую будем называть классом объекта.

Если в качестве ω_i и $\bar{\omega}_i$, соответственно, понимать такие общие свойства, как сосредоточенность или распределенность параметров, линейность или нелинейность, статичность или динамичность, стационарность или нестационарность, непрерывность или дискретность, то примерами классов будут комбинации типа «объекты с сосредоточенными параметрами – нелинейные – динамические – стационарные – дискретные» или «объекты с сосредоточенными параметрами – нелинейные – динамические – стационарные – непрерывные» и т.д.

Множество Ω имеет $q = 2^N$ элементов, соответствующих различным классам ОП. Принципиальной особенностью процесса формирования новых знаний об объекте прогнозирования является его замещение соответствующей моделью с последующим ее исследованием. Пусть $v_k, k=1, M$ обозначает определенное, наиболее общее свойство модели ОП, а \bar{v}_k – соответственно, противоположное ему свойство.

Тогда логически обоснованная комбинация таких свойств (при условии их достаточной общности) может быть названа классом модели ОП V_l . Класс модели V_l является элементом множества

$$V = \{V_l : (v_1 \cup \bar{v}_1) \cap (v_2 \cup \bar{v}_2) \cap \dots \cap (v_n \cup \bar{v}_M)\}, \quad (2)$$

называемого множеством классов моделей ОП.

Задача оценивания класса объекта прогнозирования сводится к построению некоторого решающего правила:

$$\Phi_{\text{кл}} : \Omega \xrightarrow{AI, Y} V, \quad (3)$$

позволяющего на основе анализа априорной AI и апостериорной Y (экспериментальной) информации некоторым наилучшим способом сопостав-

КОСМОС

вить с конкретным классом объекта соответствующий класс модели. Вследствие ряда обстоятельств, к которым относятся принципиально случайный характер изменения входных и выходных параметров объекта, искаженность результатов измерений параметров случайными помехами, возможная неполнота множества классов моделей (когда не все свойства объекта покрываются соответствующими свойствами модели), как правило, отсутствует принципиальная возможность построения решающего правила $\Phi_{\text{кл}}$ с нулевой вероятностью ошибочных решений. Следовательно, решение задачи (3) приводит, в общем случае, к некоторой оценке класса объекта прогнозирования, называемой классом модели ОП.

Установление класса модели на основе анализа информации об объекте составляет первый (высший) уровень идентификации типа прогнозирующей модели. Второй уровень связан с выбором структуры модели внутри некоторого выбранного класса V_i . Под структурой модели понимается вид математического оператора, известного с точностью до его параметров. Параметры могут быть как непрерывными, так и дискретными величинами (например – порядки авторегрессии и скользящего среднего в моделях Бокса – Дженкинса [3] являются дискретными параметрами, а соответствующие коэффициенты – непрерывными). Третий уровень связан непосредственно с оцениванием значений параметров модели ОП по экспериментальным данным.

Необходимо отметить различие между понятиями класса и структуры модели. Как следует из вышеизложенного, понятие класса отражает только основные свойства объекта или модели. В одном и том же классе моделей могут быть использованы различные математические операторы. Следовательно, при такой постановке вопроса число возможных операторов в общем случае больше числа классов систем и моделей. Установлением класса модели сужается первоначальная совокупность возможных операторов, а в некоторых классах

имеется только один-два эквивалентных математических оператора.

В принципе, задачу можно ставить и таким образом, чтобы под элементом V_i подразумевать один оператор, однако тогда сильно возрастает число элементов множества V_i и появляются существенные трудности при выделении из наблюдений характерных признаков каждой структуры модели. В этом направлении более легко реализуемым является многоуровневый подход – на первом уровне определяется принадлежность объекта к одному из основных классов, внутри которого далее вводятся новые подклассы и т.д.

Принцип многоуровневой идентификации показан на рис. 1. В формализованном виде процедура многоуровневой (трехуровневой) идентификации прогнозирующей модели может быть записана в виде системы отношений:

$$\begin{cases} \Phi_{\text{кл}} : \Omega \xrightarrow{AI, Y} V, \\ \Phi_{\text{стр}} : M \xrightarrow{AI, Y} F, \\ \Phi_{\text{пар}} : A \xrightarrow{Y} C, \end{cases} \quad (4)$$

где $\Phi_{\text{кл}}$, $\Phi_{\text{стр}}$, $\Phi_{\text{пар}}$ – есть решающие правила, которые на основе анализа априорной AI и экспериментальной Уинформации (наблюдений) позволяют последовательно оценить класс модели из множества V , структуру модели из множества F и по экспериментальной информации определить значения параметров модели на множестве их значений C .

Процесс идентификации в виде цепочки «наблюдение – выбор структуры модели – оценивание параметров – проверка адекватности» в общем случае является многошаговым. Иными словами, если степень адекватности построенной модели недостаточна для достижения поставленной цели, задачу идентификации необходимо решать сначала, используя приобретенный опыт и стараясь получить дополнительную информацию из наблюдений. Взаимосвязь основных этапов идентификации в широком смысле иллюстрирует рис. 2.

Приведем общую функциональную схему идентификации модели объекта, представленную на рис. 3. Согласно рис. 3, идентификация осуществляется при помощи *настраиваемой модели* той или иной структуры, параметры которой могут изменяться. В каждый момент времени $n = 1, 2, \dots$ ко входам объекта и настраиваемой модели приложено внешнее воздействие $u(n)$. Объект возмущается также некоторой случайной ненаблюдаемой помехой $\xi(n)$. Выходная величина объекта $y(n)$ зависит как от внешнего воздействия и помехи, так

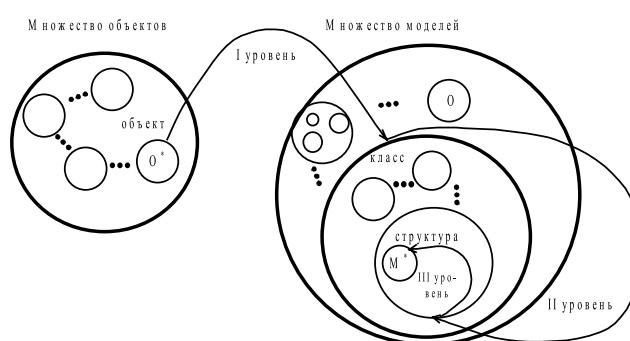


Рис. 1. Принцип многоуровневой идентификации модели объекта прогнозирования

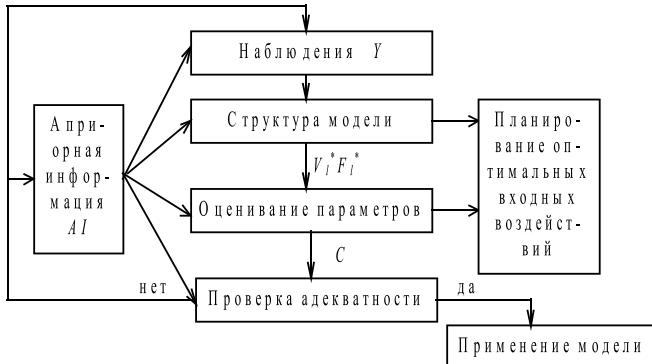


Рис. 2. Взаимосвязь основных этапов идентификации в широком смысле

и от неизвестного вектора параметров c^* . Выходная величина настраиваемой модели $\tilde{y}(n)$ зависит от вектора настраиваемых параметров c , который пересчитывается в силу алгоритма, обрабатывающего вектор всех наблюдений $\Pi(n)$.

Разность выходных величин объекта и настраиваемой модели образует *невязку*

$$\varepsilon(\Pi(n), c) = y(n) - \tilde{y}(n),$$

которая поступает на вход функционального преобразователя, изображенного на рис. 4 в виде двойного прямоугольника. Обычно предполагается, что объект работает в стационарном режиме, т.е. вероятностные характеристики последовательностей $y(n)$, $\tilde{y}(n)$, а значит – $\Pi(n)$, не зависят от момента времени n . Такой режим называется *режимом нормальной работы*.

Соответствие настраиваемой модели объекту, т.е. качество идентификации, оценивается *критерием качества идентификации*:

$$Q(c) = M\{F[\varepsilon(\Pi(n), c)]\}, \quad (5)$$

где $F[\cdot]$ – функция потерь, а M – символ математического ожидания.

Критерий качества идентификации (5) представляет собой средние потери. Улучшение качества идентификации осуществляется надлежащим выбором структуры настраиваемой модели и изменением ее параметров. Данное изменение осуществляется *алгоритмом идентификации*. Алгоритм идентификации определяется функцией потерь и структурой настраиваемой модели. По наблюдениям входного воздействия и выходных величин объекта и настраиваемой модели алгоритм идентификации изменяет параметры последней таким образом, чтобы средние потери достигали с ростом n минимума. Эти условия соответствуют идентификации в режиме нормальной работы объекта. Схема поэтапной проверки адекватности показана на рис. 4.

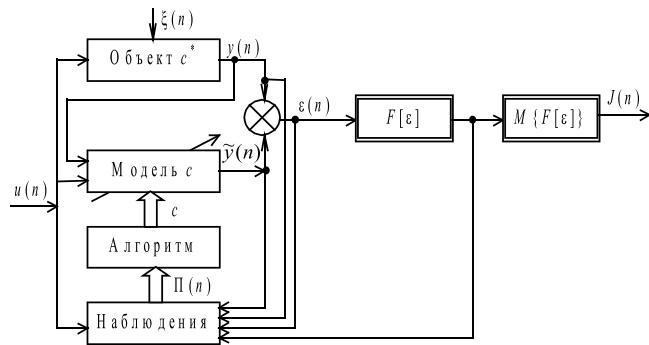


Рис. 3. Функциональная схема идентификации модели объекта в узком смысле

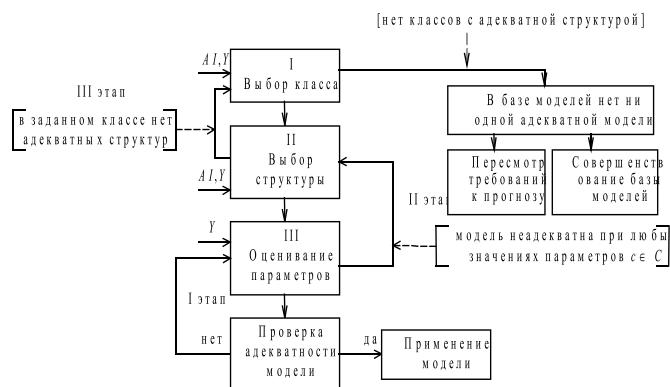


Рис. 4. Схема поэтапной проверки адекватности прогнозирующей модели

Предполагается, что процедура проверки адекватности осуществляется поэтапно, начиная с нижнего уровня идентификации. При этом если проверка адекватности модели на нижнем уровне показала, что используемая модель перестала удовлетворять требованиям по точности и достоверности прогнозирования, вначале осуществляется переоценение значений ее параметров c . Если это не приводит к желаемому эффекту, производится пересмотр структуры математического оператора F_l^* на втором уровне идентификации. В случае необходимости осуществляется процедура поиска нового класса математических моделей.

Литература

- Миронов А.Н. Теоретические основы и методы многомодельного прогнозирования долговечности сложных военно-технических систем космического назначения. – Изд-во МО РФ, 2000.
- Миронов А.Н., Талов О.В., Макаренко А.А. Многомодельный подход к прогнозированию остаточного ресурса сложных технических систем // Надежность и контроль качества. – 1996. – № 7. – С. 10–17.
- Бокс Д., Дженнингс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. – Вып.1. – М.: Мир, 1974