

Метод построения прогнозной оценки поведения автономной многопараметрической динамической технической системы

Демин А. В., Дмитриева С. П.
Университет ИТМО
Санкт-Петербург, Россия
dav_60@mail.ru, spdmitrieva@corp.ifmo.ru

Аннотация. Важнейшим требованием к характеристикам многопараметрических динамических технических систем (МДТС), в частности, к системам мониторинга окружающей среды, работающим в автоматическом режиме в условиях неоднозначности обстановки относительно внешних возмущений, является устойчивость функционирования весь период жизненного цикла. Повышение эффективности работы МДТС достигается за счет улучшения ее функционально-параметрических характеристик путем разработки и реализации алгоритмов прогнозирования состояния её компонентов. В зависимости от объёма априорных данных, достоверность и точность прогноза определяется выбранным методом построения и алгоритма реализации в виде прогнозной функции МДТС.

Ключевые слова: прогнозная оценка, поведение сложной технической системы, алгоритм, прогнозная аналитическая модель, аппроксимация априорных данных.

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения надёжности и возможности предотвращения нежелательных последствий функционирования многопараметрических динамических технических систем (МДТС), особенно работающих в автоматическом режиме в условиях неоднозначности обстановки относительно внешних возмущений, можно использовать разные методы и средства, позволяющие прогнозировать состояние техногенных систем (например, атомных электростанций, космических станций, нефте-, газопроводов и др.). Техническими средствами текущего контроля показателей качества МДТС являются сенсорные устройства: на основе получаемой от них информации можно определить прогнозную функцию. В связи с этим в зависимости от объёма априорных данных достоверность и точность прогноза определяется методом построения и алгоритма реализации в виде прогнозной функции для МДТС [1, 2].

Для обеспечения функционально-эксплуатационной устойчивости МДТС необходимо периодическое тестирование, поэтому нужно решить следующие теоретические и практические задачи:

- развитие методов построения и алгоритмов реализации долгосрочного прогнозирования в автономных МДТС в соответствии с апостериорными данными при неопределённости воздействия внешних возмущений (изменении давления, температуры, влажности);
- получение своевременной информации в реальном времени о метеоусловиях и дальнейшее прогнозирование метеобстановки, которое позволило бы обеспечить предска-

зуемость результатов народно-хозяйственной деятельности и безопасность жизнедеятельности.

Современные формализованные подходы к анализу и построению прогнозной функции состояния МДТС базируются на математических методах оптимизации и решения вариационных задач для систем с использованием прогнозирующих моделей – Model Predictive Control (MPC) [3–6].

Набор инструментальных средств исследования и проектирования алгоритмов управления в дискретных и непрерывных системах на основе предсказаний динамики их поведения – Model Predictive Control Toolbox (MPC Tools) – предоставляет инструменты для систематического анализа, разработки и настройки регуляторов с моделью предсказания. Можно проектировать регуляторы и выполнять симуляцию регуляторов с моделью предсказания при помощи функций MATLAB® или блоков Simulink®. Можно задавать и изменять модель предсказания, горизонты управления и прогнозирования, ограничения на входе, на выходе и весовые значения. Инструментарий позволяет диагностировать проблемы, которые могут привести к сбоям во время работы и даёт советы по изменению значений весовых коэффициентов и ограничений для улучшения работы и повышения надёжности. При помощи запуска разных сценариев в линейных и нелинейных симуляциях можно оценить работу регулятора.

СТРУКТУРНОЕ ОПИСАНИЕ МДТС АВТОНОМНОЙ МОБИЛЬНОЙ МЕТЕОСТАНЦИИ

Концептуальная модель МДТС отображает все тактико-технические требования технического задания на проектируемую систему, что фактически является модельным отображением её целевой функции (ЦФ). На рис. 1 дано структурно-функциональное изображение МДТС, которая является предметом исследований, на рис. 2 – её модельное отображение. В качестве практически исследуемых МДТС в работе использована автономная мобильная метеостанция, содержащая датчик измерения оптической дальности видимости (лидар) и метеодатчики, которую можно отнести к классу распределённых многоагентных измерительных систем. Структурная схема взаимодействия метеостанции включает в себя центр сбора и аналитической обработки техногенных наблюдений, датчик измерения оптической дальности видимости (лидар), мобильные сенсорные датчики, фиксирующие метеорологические данные, и встроенный радиомодем, позволяющий принимать и обрабатывать радиосигнал.



Рис. 1. Структурно функциональная схема взаимодействия автономной мобильной метеостанции



Рис. 2. Модельное отображение МДТС автономной мобильной метеостанции

Численный метод построения прогнозной оценки МДТС

Процедура параметрического моделирования МДТС является центральной процедурой разработки прогнозной модели. Допустим, что моделирование технических процессов в сочетании с различными условиями, для которых проводились эксперименты, образует некую систему (рис. 3), которую можно описать через параметрические свойства её элементарных единиц: множества входных параметров МДТС – $\{V_i\}_1^{N_{Вх}}$; множества внешних возмущений окружающей среды – $\{W_i\}_1^{N_{Возм}}$; множества внутрисистемных

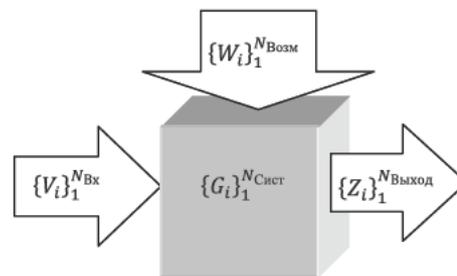


Рис. 3. Общая схема функционирования МДТС в реальных условиях эксплуатации

показателей – $\{G_i\}_1^{N_{Сист}}$; множества выходных системных параметров – $\{Z_i\}_1^{N_{Выход}}$.

В процессе аналитического моделирования выдвинуто предположение, что один из выходных системных параметров, например параметр z_1 , может быть искомым, а остальные выходные параметры z_2, \dots, z_n в процессе разработки прогнозной модели МДТС будут учитываться только при наличии обратной связи от них (телеметрии системы), что и показано в выражении

$$z_1 = f_1(g_1, \dots, g_k) \circ f_1(v_1, \dots, v_l) \circ f_1(w_1, \dots, w_m).$$

Численный метод построения прогнозной функции реализуется путем представления аналитической функции в виде композиции трёх основных компонент: первая составляющая характеризует влияние внутренних параметров и представляет собою некую общую часть искомой модели, вторая (уточняющая) описывает воздействие внешних параметров системы, третья (регулирующая) учитывает величину обратной связи (например, телеметрии):

$$\begin{aligned} Z(x_1, x_2, \dots, x_{N_{Выход}}) &= V(x_1, x_2, \dots, x_{N_{Выход}}); \\ W(x_1, x_2, \dots, x_{N_{Возм}}) &\circ G(x_1, x_2, \dots, x_{N_{Сист}}). \end{aligned} \quad (1)$$

В зависимости от конкретных целей и условий применения прогнозных функций при их построении можно принимать во внимание или, напротив, исключать из рассмотрения отдельные компоненты в структуре функции, можно управлять точностью будущих прогнозов и получать оценки для физического явления с различной степенью детализации, учитывая или игнорируя, таким образом, отдельные факторы влияния.

Наибольший интерес представляет построение прогнозной модели для открытых МДТС, т. е. когда учитываются внешние факторы, прогнозную модель МДТС можно описать как мультифакторную, что следует из выражения (1), и мультипараметрическую, что следует из выражения

$$f(x) = f_1(x) \circ f_2(x),$$

где $f_1(x)$ фиксирует воздействие на объект постоянных факторов окружающей среды; $f_2(x)$ – влияние переменных величин.

Обобщенная прогнозная модель МДТС может быть построена по её модельному представлению [7]. Если модель $\{M_{OB}(g_i)_1^N\}$ является образом реальной системы $\{OB_{real}(g_i)_1^N\}$, то она адекватна при соотношении

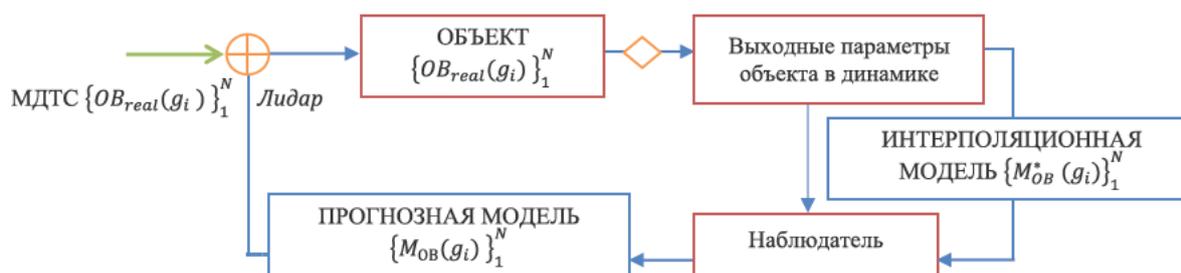


Рис. 4. Структурно функциональная схема прогнозирования состояния МДТС с функцией прогнозного управления

$$\{M_{OB}(g_i)_1^N\} \cap \{OB_{real}(g_i)_1^N\} = \max.$$

Процессы, протекающие в каждом типе подсистем (блоков), основаны на уравнениях математической физики, при этом важно заметить, что математические модели $\{OB_{real}(g_i)_1^N\}$ в общем случае могут быть представлены на макро-, микро- и метаяуровнях. Новый подход прогнозирования заключается в построении прогнозной модели МДТС на основании интерполяционной функции по априорным исходным данным, а модели $\{M_{OB}^*(g_i)_1^N\}$ – как образа реальной МДТС [8] (рис. 4). Полнота и достоверность априорных исходных данных определяет точность прогнозирования.

Этапы реализации метода построения прогнозной функции для МДТС:

- 1) построение интерполяционной функции в соответствии с априорными исходными данными реальной МДТС $\{OB_{real}(g_i)_1^N\}$;
- 2) создание прогнозной модели $\{M_{OB}^*(g_i)_1^N\}$ на основе операции экстраполяции интерполяционной функции;
- 3) выполнение операции компьютерного моделирования для $\{M_{OB}^*(g_i)_1^N\}$;
- 4) сравнение результатов моделирования $\{M_{OB}^*(g_i)_1^N\}$ с исходными данными в контрольных точках;
- 5) выполнение условия: если невязка результатов моделирования с исходными данными лежит в поле допуска, то модель $\{M_{OB}^*(g_i)_1^N\}$ принимается за прогнозирующую функцию $\{OB_{real}(g_i)_1^N\}$;
- 6) выполнение условия: если невязка результатов моделирования с исходными данными не лежит в поле допуска, то процедуру повторяют с необходимой корректировкой алгоритма;
- 7) корректировка полученной прогнозной модели $\{M_{OB}^*(g_i)_1^N\}$ путем прогона её через объект $\{OB_{real}(g_i)_1^N\}$, при котором выполняется следующее условие: если выходные данные с объекта совпадают в пределах поля допуска данных со значениями исследуемой прогнозной модели, то можно считать, что прогнозная модель искомой системы сформирована; если выходные данные с объекта не соответствуют допустимым значениям, то корректировка прогнозной модели должна быть продолжена.

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ПРОГНОЗНОЙ ОЦЕНКИ МДТС

При разработке прогнозной модели следует первоначально изучить реально существующую систему: исследовать её структурно-функциональную схему, эксплуатационные

ограничения, взаимосвязи элементов и влияние внешних факторов, таким образом, лишь после предварительного исследования МДТС можно приступить к её моделированию. Построение прогнозной модели МДТС, начинающееся с описания её целевой функции (ЦФ) и заканчивающееся достижением конечного результата, включает в себя четыре этапа (рис. 5).

АПРОБАЦИЯ МЕТОДА ПОСТРОЕНИЯ ПРОГНОЗНОЙ ОЦЕНКИ ПОВЕДЕНИЯ МДТС

Полный пакет для прогнозирования МДТС образует совокупность метода и модели. При сопоставлении подходов моделирования МДТС существенные преимущества имеет компьютерная обработка данных, которая позволяет манипулировать большим числом изменяемых величин и прогнозировать динамику процессов нелинейного характера с появлением эффектов синергизма [9, 10].

Для решения исследовательской проблемы был создан программный продукт на языке программирования Си++, в задачи которого вошли сбор, анализ и форматирование экспериментальных данных, выявление зависимости между температурой и внешними факторами среды, влияющими на построение прогнозной функции, проверка адекватности спрогнозированных величин их реальным величинам.

Для апробирования предложенного численного метода и разработанных алгоритмов построения прогнозной функции в качестве изучаемого параметра МДТС ввиду доступности, охвата и полноты БД решено выбрать метеорологическую величину (интернет-ресурс с БД статистических метеонаблюдений). На рис. 6 изображена процедура выбора оптимальной аппроксимации для статистики температуры воздуха, на рис. 7 – аппроксимация средней температуры воздуха в доверительных интервалах. Важно, что по методу и алгоритму построения аналитических прогнозных моделей МДТС для реальных условий эксплуатации на основании апостериорной информации можно спрогнозировать любую другую функциональную характеристику системы.

В результате прогнозирования по данным четырех объектов (изменениям температуры воздуха в 6.00, 12.00, 18.00, 24.00 ч) построены четыре прогнозные сезонные модели с выделенной базовой уточняющей и регулирующей компонентой, позволяющие с точностью $\approx 70-80\%$ предсказывать функционально-параметрическое состояние автономной метеостанции. На рис. 8 дана оценка достоверности прогнозной модели, среднее отклонение прогнозных данных от реальных составляет $\approx 5-6$ °С.



Рис. 5. Алгоритм построения прогнозной модели по ЦФ

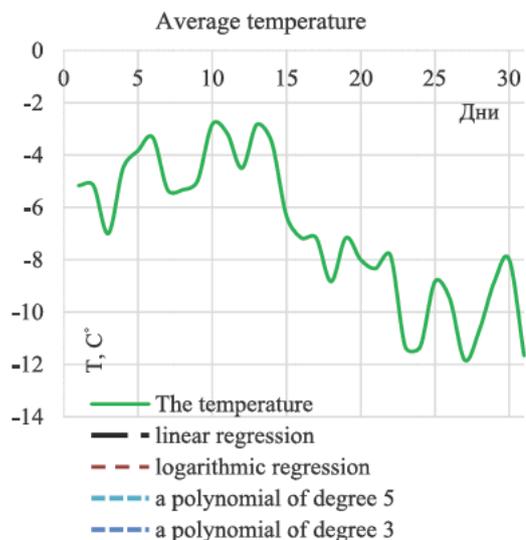


Рис. 6. Процедура выбора оптимальной аппроксимации для статистики температуры воздуха (°C)

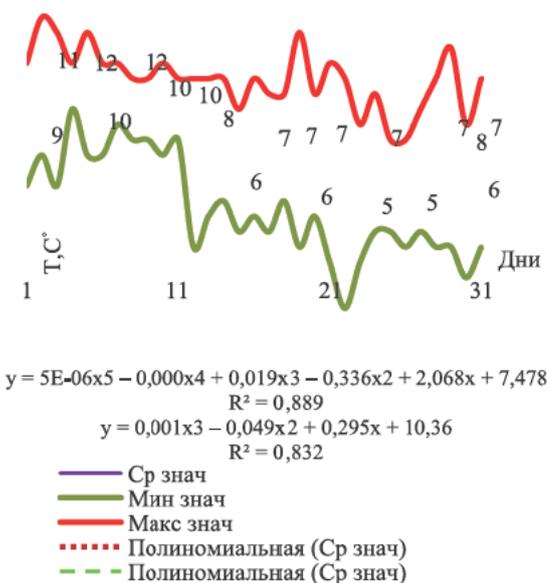


Рис. 7. Аппроксимация средней температуры воздуха (°C) в доверительных интервалах

Таким образом, на примере автономной мобильной метеостанции на основании экспериментальных данных был практически применен разработанный численный метод, алгоритмы прогнозирования состояния МДТС и ПО, позволяющее посредством прогнозного управления экономить ресурс автономной МДТС, гарантируя устойчивость её функционирования на протяжении всего жизненного цикла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование результатов исследования позволяет при неопределенности воздействия внешних возмущений обеспечить стабильность функционирования автономных МДТС за счет прогнозного управления внутренними техническими процессами системы. Результаты работы были использованы ООО «ЛОМО-МЕТЕО», «ОКБ Тест» и «АвтоВизус».

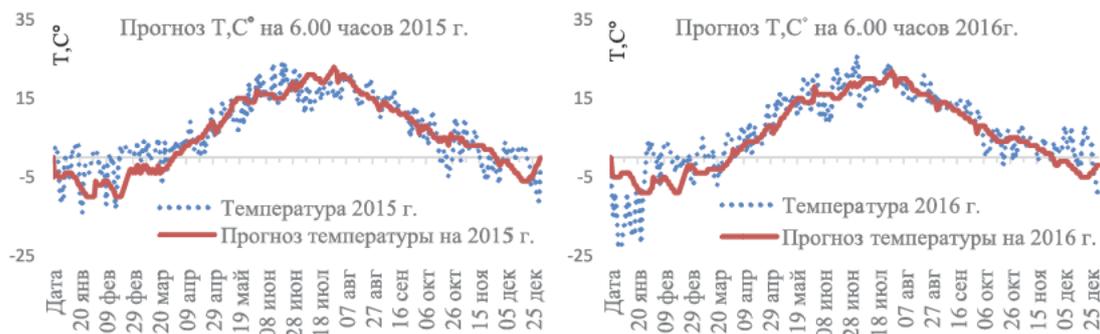


Рис. 8. Оценка достоверности прогноза температуры воздуха

В статье выполнено обоснованное построение прогнозной модели применительно к датчику температуры. Это позволяет управлять режимами работы станции путем включения-выключения указанного датчика для обеспечения экономичности и повышения длительности автономной работы. В перспективе целесообразно реализовать прогнозные модели метеостанции для всех видов датчиков. При этом следует отметить, что разработанный метод распространяется на все факторы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Торшина И. П., Якушенков Ю. Г. Некоторые особенности системного подхода при проектировании оптико-электронных систем 3-го поколения // *Контентант*. 2017. Т. 16, № 1. С. 22-27.
2. Торшина И. П., Якушенков Ю. Г. Некоторые особенности моделирования оптико-электронных систем визуализации 3-го поколения // *Сб. материалов XIII междунар. науч.-техн. конф. «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации „Распознавание – 2017“»*. – Курск: ЮЗГУ, 2017. С. 347-348.
3. Захаров А. И., Загайнов А. И. Реализация программного комплекса для вычисления фрактальных параметров сложных систем // *Интеллектуальные технологии на транспорте*. 2015. № 2. С. 47-53.

4. Красновидов А. В. Подход к построению алгоритмов статистического анализа потоков ошибок в дискретных каналах связи // *Интеллектуальные технологии на транспорте*. 2015. № 2. С. 20-26.
5. Fu Z., Zhou X., Chen Y., Gong J., Peng F., Yan Z., Zhang T., Yang L. The influence of random slowdown process and lock-step effect on the fundamental diagram of the nonlinear pedestrian dynamics: An estimating-correction cellular automaton // *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 2015. Vol. 20 (3). P. 832-845.
6. Bonilla J., Dormido S., Cellier F. E. Switching moving boundary models for two-phase flow evaporators and condensers // *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 2015. Vol. 20 (3). P. 743-768.
7. Demin A. V., Dmitrieva S. P. Algorithm of real-time developing a forecast model of engineering systems // *ICUMT 7.* – Brno, 2015. P. 14-19. <http://www.icumt.info/2015>.
8. Demin A. V., Dmitrieva S. P. The algorithm of state estimation for dynamic multivariable technical system // *CSNT 2016.* – Chandigarh City, India: CSNT, 2016. P. 23-29.
9. Akimov S. V., Verkhova G. V. The four-level integrative model, methodology of structural and parametric synthesis of system objects // *Collection: Proc. XIX Int. Conf. Soft Computing and Measurements SCM'2016*. 2016. P. 321-323.
10. Akimov S. V., Verkhova G. V. The linguistic support of morphological modeling set // *Collection: Proc. XIX Int. Conf. Soft Computing and Measurements SCM'2016*. 2016. P. 337-340.

A Method of Constructing Estimates of the Future Behavior of a Dynamic Autonomous Multiparameter Technical Systems

Demin A. V., Dmitrieva S. P.
ITMO University
St. Petersburg, Russia
dav_60@mail.ru, spdmitrieva@corp.ifmo.ru

Abstract. Stability of functioning for the whole period of the life cycle this is the most important requirement is that the characteristics of multivariable dynamic technical systems (MDTS) and automatic systems for environmental monitoring, working in conditions of uncertainty of external disturbances. The efficiency MDTS is achieved by improving its functional and parametric performance through the development and implementation of algorithms for forecasting of its components. Depending on the amount of prior data, the reliability and accuracy of the forecast depends on the selected build method and algorithm implementation in the form of the forecast function MDTS.

Keywords: predictive assessment of the behavior of complex technical systems, algorithm, predictive analytic model, an approximation of a priori data.

REFERENCES

1. Torshina I. P., Yakushenkov Yu. G. Some features of the system approach in the design of third generation optoelectronic systems. *Contentant*, 2017, vol. 16, no. 1, pp. 22-27. (In Russ.)
2. Torshina I. P., Yakushenkov Yu. G. Some features of simulation of optic-electronic systems of visualization of the third generation. *Proc. XIII Int. Sci. and Tech. Conf. "OPTICS EXPO – 2017"*. Kursk, SSU, 2017. Pp. 347-348. (In Russ.)
3. Zakharov A. I., Zagainov A. I. Implementation of Software for Calculating the Fractal Parameters of Complex Systems. In *Intellectual Technologies on Transport*, 2015, no. 2, pp. 47-53. (In Russ.)
4. Krasnovidov A. V. An Approach to the Construction of Algorithms for the Statistical Analysis of Error Flows in Digital Communications Channels. *Intellectual Technologies on Transport*, 2015, no. 2, pp. 20-26. (In Russ.)
5. Fu Z., Zhou X., Chen Y., Gong J., Peng F., Yan Z., Zhang T., Yang L. The influence of random slowdown process and lock-step effect on the fundamental diagram of the nonlinear pedestrian dynamics: An estimating-correction cellular automaton. *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, 2015, Vol. 20 (3), pp. 832-845.
6. Bonilla J., Dormido S., Cellier F. E. Switching moving boundary models for two-phase flow evaporators and condensers. *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, 2015, Vol. 20 (3), pp. 743-768.
7. Demin A. V., Dmitrieva S. P. Algorithm of real-time developing a forecast model of engineering systems. *ICUMT 7*. Brno, 2015. Pp. 14-19. <http://www.icumt.info/2015>.
8. Demin A. V., Dmitrieva S. P. The algorithm of state estimation for dynamic multivariable technical system. *CSNT 2016*. Chandigarh City, India: CSNT, 2016. Pp. 23-29.
9. Akimov S. V., Verkhova G. V. The four-level integrative model, methodology of structural and parametric synthesis of system objects. *Collection: Proc. XIX Int. Conf. Soft Computing and measurements SCM 2016*. 2016. Pp. 321-323.
10. Akimov S. V., Verkhova G. V. The linguistic support of morphological modeling set. *Collection: Proc. XIX Int. Conf. Soft Computing and measurements SCM 2016*. 2016. Pp. 337-340.