

УДК 004.89

ПРОГНОЗ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ НАЛИЧИИ ЕДИНИЧНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

БАРАНОВ Леонид Аврамович, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой; e-mail: baranov.miit@gmail.com
АНОХИН Антон Сергеевич, студент; e-mail: antonahin26@gmail.com
ЖЕРЕБЯТИН Илья Андреевич, студент; e-mail: opoxil@mail.ru
ЧЖАН ЮНЦЯН, аспирант; e-mail: zyq0526@yandex.ru

Российский университет транспорта (МИИТ), кафедра «Управление и защита информации», Москва

Прогнозирование случайных возмущений позволяет улучшить качество управления в интеллектуальных транспортных системах, а также обеспечить эффективную работу диагностических систем. Известен ряд работ, в которых приведены модели экстраполяторов на базе многочленов Чебышева, ортогональных на множестве равноотстоящих точек с прогнозирующим многочленом, коэффициенты которого вычисляются по критерию наименьших квадратов, а также проведен анализ погрешностей прогноза случайных стационарных входных сигналов. Вместе с тем в случае нестационарных входных сигналов возможны единичные возмущения, воздействие которых на экстраполятор приводит к значительным погрешностям прогноза.

В данной статье приведен пример возникновения аддитивных возмущений, появляющихся в системах автоматического управления движения поездов; получено аналитическое выражение и проведен расчет величин погрешностей прогноза при единичных возмущениях. Анализ результатов расчета позволяет определить влияние параметров экстраполятора на величину погрешности прогноза, показать необходимость детектирования единичных возмущений и исключить их влияние на величину погрешностей прогноза.

В статье рассмотрен алгоритм детектирования единичных возмущений и их исключения в процессе прогноза; сделан вывод об эффективности использования экстраполяторов случайных возмущений с исключением влияния единичных возмущений в интеллектуальных системах автоматического управления движением поездов метрополитена.

Ключевые слова: прогнозирование; экстраполяторы; погрешности прогноза; случайные возмущения; единичные возмущения; детектирование единичных возмущений; алгоритм; интеллектуальная система; автоматическое управление; поезда метрополитена.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-03-239-246

▼ Введение

Прогнозирование случайных возмущений позволяет улучшить качество управления в технических и социальных системах [1–6], использовать достоинства методов предиктивной диагностики систем [7–14], позволяет принимать эффективные решения в условиях неопределенности [15–17].

Примером использования прогноза возмущений для выработки управления является применение экстраполятора l -го порядка в интеллектуальных системах управления движением поездов метрополитена [16]. Задача управления ставится следующим образом: необходимо, имея для каждого поезда линии плановое время прибытия и отправления с каждой станции

и получая информацию о фактическом времени прибытия и отправления каждого поезда линии с каждой станции, рассчитать для каждого n -го поезда, отправляющегося с $(j - 1)$ -й станции, время хода до j -й станции и длительность стоянки этого поезда на j -й станции так, чтобы минимизировать рассогласование между плановым и реальным графиками остановок и обеспечить тем самым $(n + 1)$ -му поезду, следующему за n -м по данному перегону, движение без необходимости ограничения скорости системами безопасности.

Дополнительно в процессе управления учитываются возможности выбора времени хода сзади идущего поезда с учетом минимизации расхода энергии на тягу. Показано, что при прочих

равных, для известного времени хода по j -му перегону минимальный интервал следования между впереди идущим n -м и сзади идущим $(n - 1)$ -м поездами линейно зависит от длительности стоянки n -го поезда на j -й станции.

В случае интенсивного пассажиропотока режим управления $(n - 1)$ -го поезда рассчитывается до прибытия n -го поезда на j -ую станцию и случайная величина отклонения реальной длительности стоянки n -го поезда на j -й станции от плановой неизвестна. Эта случайная величина (возмущение), как правило, определяется наличием большого количества пассажиров, при котором увеличивается длительность процесса входа и выхода пассажиров. Так как высокая плотность пассажиропотока, соответствующая часам пик, мгновенно не изменяется, то рассматриваемые возмущения для последовательно отстающих на j -й станции поездов коррелированы между собой.

Анализ погрешностей прогноза для различных стационарных сигналов, заданных своими автокорреляционными функциями, приведены в [17]. Учитывая возможную нестационарность случайных возмущений, разработан адаптивный экстраполятор, позволяющий автоматически изменять свою структуру в условиях нестационарности с целью уменьшения погрешности прогноза.

Алгоритм управления движением поездов на линии метрополитена, использующий прогноз возмущений, приведен в работе [18]. Вместе с тем возможны случаи единичных случайных возмущений, в частности вызванных недисциплинированностью отдельных пассажиров. Для этих условий необходимо проанализировать функционирование экстраполятора, определить погрешности прогноза, выбрать методы, позволяющие отличить стационарные возмущения от единичных.

Целью данной статьи является анализ функционирования экстраполяторов l -го порядка, построенных на базе многочленов Чебышева, ортогональных на множестве равноотстоящих точек. Коэффициенты прогнозирующего многочлена выбираются по методу наименьших квадратов [19, 20]. Результаты анализа используются для выбора алгоритма, позволяющего отличить отдельные возмущения от случайных процессов.

1. Математическая модель экстраполятора

Формализацию модели приведем на языке теории импульсных систем [19, 21]. Текущее время t определим в соответствии с формализацией теории импульсных систем в виде:

$$t = (n + \varepsilon)T,$$

где T — шаг временной дискретизации;

$n = -2, -1, 0, 1, 2, \dots$ — текущий номер шага временной дискретизации;

$0 \leq \varepsilon \leq 1$ — дробная часть шага временной дискретизации.

Пусть $x[(n + \varepsilon)T]$ — случайный процесс на входе экстраполятора. Значения этого процесса известны в моменты времени $(n - M + i)T$, где $i = 0, 1, \dots, M$; $M + 1$ — число отсчетов, предшествующих началу прогноза.

Как показано в [22], результат прогноза $z[(n + \varepsilon)T]$ на временном интервале от nT до $(n + 1)T$ определяется выражением:

$$z[(n + \varepsilon)T] = \sum_{i=0}^M x[(n - M + i)T] L_i^{\varepsilon, \text{кв}, l} [0, \varepsilon], \quad (1)$$

$$L_i^{\varepsilon, \text{кв}, l} [0, \varepsilon] = \sum_{j=0}^l \frac{\varphi_{j,m}(i) \varphi_{j,m}(M + \varepsilon)}{\varphi_{j,m}^2}, \quad (2)$$

где верхний индекс $L_i^{\varepsilon, \text{кв}, l}$ свидетельствует о том, что используется экстраполятор (э), метод наименьших квадратов (кв), порядок экстраполятора l ,

$\varphi_{j,m}(\dots)$ — многочлены Чебышева, ортогональные на множестве равноотстоящих точек, заданные следующим рекуррентным соотношением:

$$\begin{aligned} i\varphi_{j,m}(i) &= -\frac{(j+1)(M-j)}{2(2j+1)}\varphi_{j+1,m}(i) + \\ &+ \frac{M}{2}\varphi_{j,m}(i) - \frac{j(M+j+1)}{2j+1}\varphi_{j-1,m}(i). \end{aligned} \quad (3)$$

Начальные условия для (3):

$$\varphi_{0,m}(i) = 1; \quad (4)$$

$$\varphi_{1,M}(i) = 1 - \frac{2i}{M}, \quad (5)$$

где l — степень экстраполирующего многочлена $z[(n + \varepsilon)T]$, ($l \leq M$); l в дальнейшем назовем порядком экстраполятора;

$$\varphi_{j,M}^2 = \sum_{i=0}^M \varphi_{j,M}^2(i).$$

При $l = M$ экстраполирующий многочлен совпадает с многочленом, полученным по итерационной формуле Лагранжа.

В [22] доказаны следующие свойства $L_i[0, \varepsilon]$:

$$L_i^{\varepsilon, \text{KB}, l+1}[0, \varepsilon] = L_i^{\varepsilon, \text{KB}, l}[0, \varepsilon] + \frac{\varphi_{l+1,M}(i) \cdot \varphi_{l+1,M}(M + \varepsilon)}{\varphi_{l+1,M}^2}; \quad (6)$$

$$\sum_{i=0}^M L_i^{\varepsilon, \text{KB}, l}[0, \varepsilon] = 1. \quad (7)$$

Формулы многочленов Чебышева приведены в [23]. Авторами данной статьи разработан цифровой двойник экстраполятора, в котором, наряду с прочими, реализована процедура получения многочленов Чебышева и выражений $L_i^{\varepsilon, \text{KB}, l}[0, \varepsilon]$.

2. Реакция экстраполятора порядка на входной сигнал, моделирующий единичное возмущение

Единичное возмущение представим в виде:

$$x[(n + \varepsilon)T] = \begin{cases} 1 & \text{при } n = 0; \varepsilon = 0 \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (8)$$

Тогда, после подставления (8) в (1) получаются следующие соотношения:

$$\begin{aligned} z[0, \varepsilon] &= L_M^{\varepsilon, \text{KB}, l}[0, \varepsilon] \\ z[1, \varepsilon] &= L_{M-1}^{\varepsilon, \text{KB}, l}[0, \varepsilon] \\ &\dots \\ z[k, \varepsilon] &= L_{M-k}^{\varepsilon, \text{KB}, l}[0, \varepsilon] \\ &\dots \\ z[M, \varepsilon] &= L_0^{\varepsilon, \text{KB}, l}[0, \varepsilon] \\ z[n \geq M, \varepsilon] &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Откуда следует, что длительность отклика на единичное возмущение, заданное выражением (8), составляет $(M + 1)T$.

Погрешность прогноза:

$$\Theta[(n + \varepsilon)T] = z[(n + \varepsilon)T] - x[(n + \varepsilon)T]. \quad (10)$$

для единичного возмущения (8):

$$\Theta[k + \varepsilon] = \begin{cases} L_{M-k}^{\varepsilon, \text{KB}, l}[0, \varepsilon], & k = M, M-1, \dots, 0 \\ 0 & \text{при } k \in (-\infty, 0) \cup [M+1, +\infty) \end{cases}. \quad (11)$$

Графики $\Theta[k + \varepsilon]$ для различных экстраполяторов от $l = 0$ до $l = 5$ и различных $M \geq l$ приведены на рис. 1 и 2.

Анализ результатов расчета позволяет сделать следующие выводы:

- экстраполяция при единичном входном сигнале дает погрешность прогноза на $(M + 1)$ тактов. То есть увеличение количества точек, по которым производится экстраполяция, приводит к увеличению длительности воздействия погрешности единичного возмущения на прогноз;
- при фиксированном порядке экстраполятора увеличение числа точек, по которым выполняется прогноз, приводит к уменьшению модуля максимума погрешности (см. таблицу);
- при фиксированном числе точек, по которым выполняется прогноз, увеличение порядка экстраполятора ($l \leq M$) приводит к увеличению модуля максимума погрешности (см. таблицу);
- при фиксированном порядке экстраполятора, в случае $M = l$, что соответствует использованию интерполяционной формулы Лагранжа для экстраполяции, модуль максимума погрешности наибольший.

Величина модуля максимума погрешности экстраполяции при единичных возмущениях для различных M и $l \leq M$.

	$l = 0$	$l = 1$	$l = 2$	$l = 3$	$l = 4$	$l = 5$
$M = l$	1	2	3	4	10	20
$M = l + 1$	0,5	1,333	2,25	3,2	4,167	7,143
$M = 10$	0,091	0,364	0,818	1,454	2,273	3,273
$M = 40$	0,024	0,098	0,219	0,390	0,610	0,878

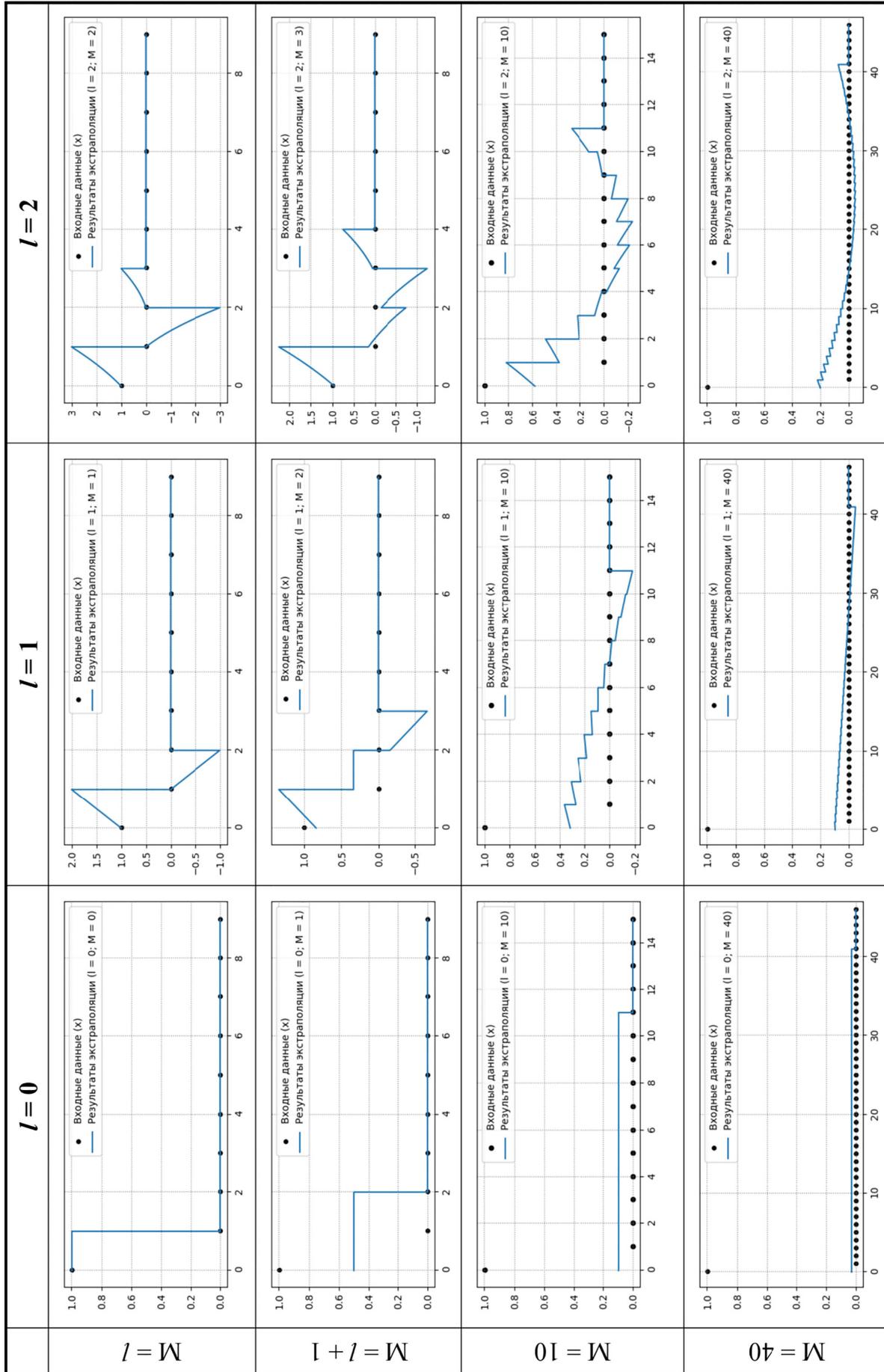


Рис. 1. Графики погрешностей прогнозов экстраполяторов степени $l = 0, 1, 2$ при единичном возмущении

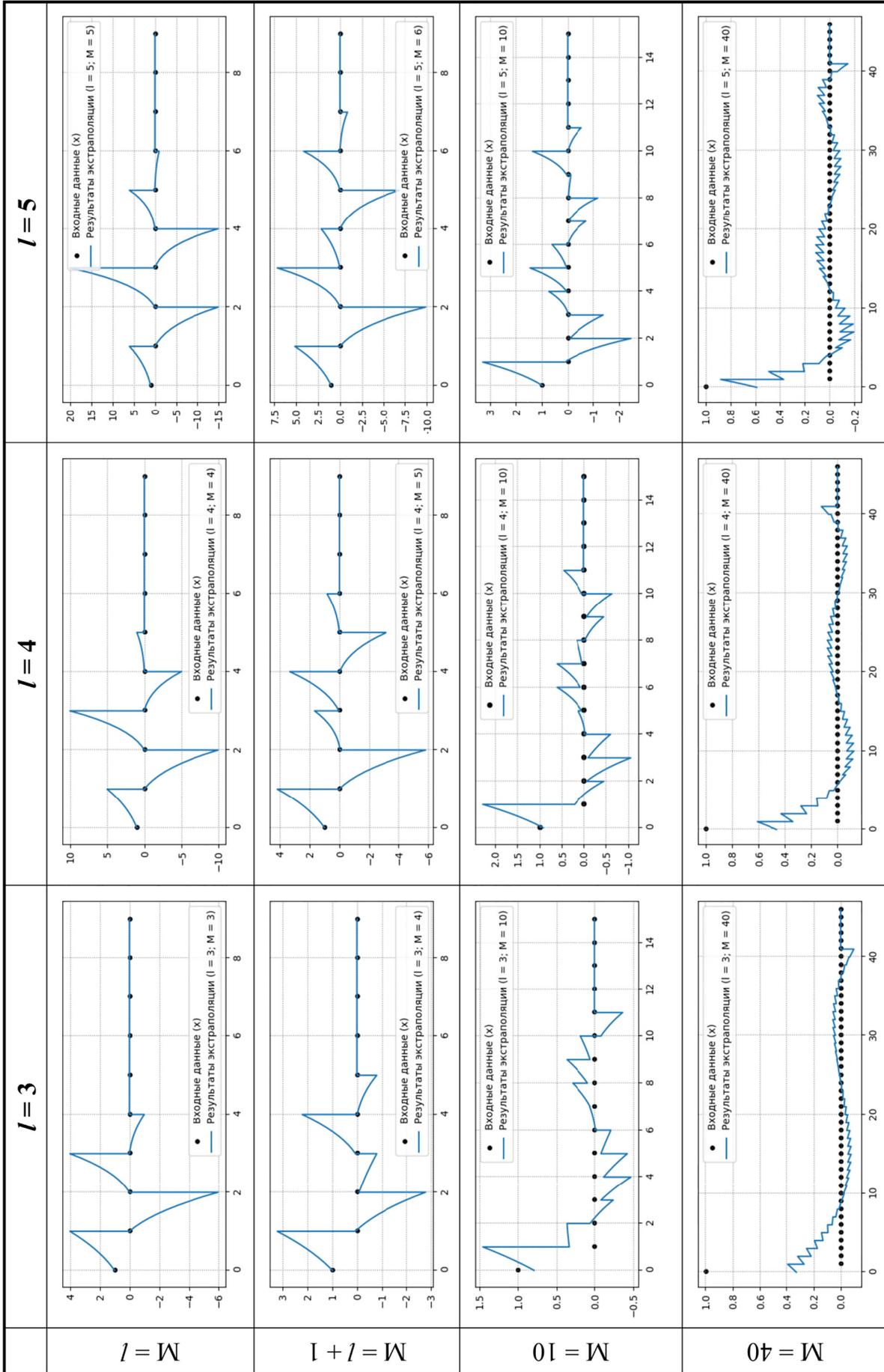


Рис. 2. Графики погрешностей прогнозов экстраполяторов степени $l = 3, 4, 5$ при единичном возмущении

Приведенные результаты свидетельствуют о необходимости использования детектора, определяющего наличие единичных возмущений при функционировании экстраполятора, работающего в реальном времени в системе управления. Учитывая, что при каждом значении $t = nT$, если $m \leq n - 1$, известно $x[mT]$, можно в момент $t = (n - 1)T$ при условии $x[nT] \geq 0$, например, предположить, что возмущение может быть единичным и использовать экстраполяцию 0 порядка, приняв $z[nT] = x[(n - 1)T]$. Если при этом $x[nT] = 0$, то предположение подтверждается и возмущение считается единичным, что далее учитывается в алгоритме работы экстраполятора. Это решение используется в разрабатываемом алгоритме централизованного управления движением поездов метрополитена.

Заключение

1. Получено аналитическое выражение, и проведен расчет величин погрешностей прогноза экстраполяторов, использующих многочлены Чебышева ортогональных на множестве равноотстоящих точек с прогнозирующим многочленом, коэффициенты которого вычислены по методу наименьших квадратов, при единичных возмущениях. Приведены графики изменения величин погрешностей прогноза во времени при единичных возмущениях.

2. Проведен анализ работы экстраполятора в условиях единичных возмущений; показана необходимость детектирования этих возмущений и исключения их влияния на величину погрешности прогноза случайных возмущений при наличии статистической связи между отсчетами этих возмущений.

3. Рассмотрен алгоритм детектирования единичных возмущений и их исключения в процедуре прогноза.

4. Экстраполяторы случайных возмущений с исключением погрешностей прогноза, вызванных единичными возмущениями, эффективно использовать в интеллектуальных системах автоматического управления, предиктивной диагностики, поддержки принятия решений.

5. Дальнейшим направлением исследования будет имитационное моделирование систем автоматического управления движения

поездов на линии метрополитена встроенным алгоритмом прогнозирования возмущений при условии исключения единичных случайных возмущений. ▲

Библиографический список

1. Petropoulos F. Forecasting: Theory and practice / F. Petropoulos, Ya. Kang, F. Li et al. // *International Journal of Forecasting*. — 2022. — Vol. 38. — Iss. 3, July — September. — Pp. 705–871. — DOI: 10.1016/j.ijforecast.2021.11.001.
2. Silitonga S. Survey on damage mechanics models for fatigue life prediction / S. Silitonga, J. Maljaars, F. Soetens et al. // *Heron*. — 2013. — Vol. 58. — Iss. 1. — Pp. 25–60.
3. Kim Y. Introduction to Kalman Filter and Its Applications / Y. Kim, H. Bang // *IntechOpen*. — 2018. — DOI: 10.5772/intechopen.80600.
4. Grewal M. S. Kalman Filtering: Theory and Practice with MATLAB / M. S. Grewal, A. P. Andrews // *John Wiley & Sons*. — 2015. — P. 640.
5. Asadi F. Adaptive Kalman Filter for Noise Estimation and Identification with Bayesian Approach / F. Asadi, S. H. Sadati // *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mathematical and Computational Sciences*. — 2021. — Vol. 15. — Iss. 10.
6. Serradilla O. Deep learning models for predictive maintenance: a survey, comparison, challenges and prospects / O. Serradilla, E. Zugasti, J. Rodriguez et al. // *Applied Intelligence*. — 2022. — DOI: 10.1007/s10489-021-03004-y.
7. Mosavi A. Structural Damage Diagnosis and Prediction Using Machine Learning and Deep Learning Models: Comprehensive Review of Advances / A. Mosavi. — Preprints.org 2019, 2019120149. — DOI: 10.20944/preprints201912.0149.v1.
8. Byington Carl S. Handbook of Multisensor Data Fusion / S. Byington Carl, K. Garga Amulya // Ch. 23. Data Fusion for Developing Predictive Diagnostics for Electromechanical Systems // *CRC Press*, 2009.
9. Bezerra A. The use of artificial intelligence for assessing an overpass affected by Alkali-Silica Reaction (ASR) / A. Bezerra, C. Trottier, L. F. M. Sanchez // Ch. 40. Data Fusion for Developing Predictive Diagnostics for Electromechanical Systems // *CRC Press*. — 2022. — Pp. 354–361. — DOI: 10.1201/9781003322641-40.
10. Smit N. Guide for the Monitoring, Diagnosis and Prognosis of Large Motors / N. Smit, Convener, S. Bhumiwat et al. // *Cigre Working Group A1.26*. — December 2013. — P. 53.
11. Gulgec N. S. Structural Damage Detection Using Convolutional Neural Networks / N. S. Gulgec, M. Takác, S. Pakzad // *Model Validation and Uncertainty Quantification*. — 2022. — Vol. 3. — Pp. 331–337. — DOI: 10.1007/978-3-319-54858-6_33.
12. Kashevarova G. G. Technical diagnostics of reinforced concrete structures using intelligent systems / G. G. Kashevarova, Yu. L. Tonkov // *Magazine of Civil Engineering*. — 2020. — Iss. 1(93). — Pp. 13–26. — DOI: 10.18720/MCE.93.2.
13. Bulgakov A. Cyber-physical System for Diagnosing and Predicting Technical Condition of Servo-drives of Mechatronic Sliding Complex during Construction of High-

rise Monolithic Buildings / A. Bulgakov, T. Bock, T. Kruglova // 2020 Proceedings of the 37th ISARC, Kitakyushu, Japan. — Pp. 339–346.

14. Масалимов К. А. Применение двунаправленных сетей долгой краткосрочной памяти для определения износа режущего инструмента станков с числовым программным управлением в процессе эксплуатации / К. А. Масалимов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. — 2021. — Т. 9, № 4(35). — DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.014.
15. Byington C. S. Handbook of Multisensor Data Fusion / C. S. Byington, A. K. Garga // Ch. 17. Studies and Analyses within Project Correlation: An In-Depth Assessment of Correlation Problems and Solution Techniques // CRC Press, 2009.
16. Баранов Л. А. Централизованное управление движением поездов городских железных дорог современного мегаполиса / Л. А. Баранов, Е. П. Балакина, С. Е. Иконников и др. // Наука и техника транспорта. — 2020. — № 1. — С. 30–38.
17. Баранов Л. А. Влияние прогноза рассогласования на качество управления в замкнутых автоматических системах / Л. А. Баранов, О. Е. Пудовиков, Е. П. Балакина // Электротехника. — 2022. — № 9. — С. 8–15.
18. Баранов Л. А. Метрополитен Мехико. Алгоритм движения / Л. А. Баранов, П. Ю. Воробьев // Мир транспорта. — 2012. — № 4. — С. 106–113.
19. Баранов Л. А. Квантование по уровню и временная дискретизация в цифровых системах управления / Л. А. Баранов. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — С. 304.
20. Березин И. С. Методы вычислений / И. С. Березин, И. П. Жидков. — М.: Физматгиз, 1959. — Т. 1. — С. 464.
21. Цыпкин Я. З. Теория линейных импульсных систем / Я. З. Цыпкин. — М.: Физматиздат, 1963. — С. 968.
22. Баранов Л. А. Прогнозирование случайных процессов на базе многочленов, ортогональных на множестве равноотстоящих точек / Л. А. Баранов, Е. П. Балакина // Электротехника. — 2020. — № 9. — С. 39–46.
23. Милн В. Э. Численный анализ / В. Э. Милн. — М.: ИЛ, 1951. — 292 с.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 3, pp. 239–246
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-03-239-246

Forecasting Random Processes in Intelligent Transport Systems with Singular Perturbations

Information about authors

Baranov L. A., Doctor of Engineering, Head of the Department.

E-mail: baranov.mii@gmail.com

Anokhin A. S., Student. E-mail: antonanohin26@gmail.com

Zherebyatin I. A., Student. E-mail: opoxil@mail.ru

Zhang Yongqiang, Postgraduate Student. E-mail: zyx0526@yandex.ru

Russian University of Transport (MIIT), Department of Management and Protection of Information, Moscow

Abstract: Forecasting random perturbations allows improving the control quality in intelligent transport systems and ensuring the efficient operation of diagnostic systems. Several works are known where extrapolator models based on Chebyshev polynomials orthogonal on equidistant points are presented. These models use a predictive polynomial whose coefficients are computed using the least squares criterion. Additionally, an analysis of forecast errors for random stationary input signals has been conducted. At the same time, in the case of non-stationary input signals, singular perturbations may occur, the influence of which on the extrapolator leads to significant forecast errors.

This article presents an example of the occurrence of additive perturbations that arise in automatic train control systems. An analytical expression has been derived, and calculations of forecast error magnitudes in the presence of singular perturbations have been conducted. The analysis of the calculation results allows determining the influence of extrapolator parameters on the forecast error magnitude, highlighting the necessity of detecting singular perturbations, and excluding their influence on the forecast error magnitude.

The article discusses an algorithm for detecting singular perturbations and their exclusion during the forecasting process. The conclusion is drawn about the effectiveness of using extrapolators for random perturbations with the exclusion of singular perturbations in intelligent systems for automatic train control in subway transportation.

Keywords: forecasting; extrapolators; forecast errors; random perturbations; singular perturbations; detection of singular perturbations; algorithm; intelligent system; automatic control; subway trains.

References

1. Petropoulos F., Kang Ya., Li F. et al. Forecasting: Theory and practice. International Journal of Forecasting, 2022, vol. 38, Iss. 3, July — September, pp. 705–871. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2021.11.001.
2. Silitonga S., Maljaars J., Soetens F. et al. Survey on damage mechanics models for fatigue life prediction. Heron, 2013, vol. 58, Iss. 1, pp. 25–60.
3. Kim Y., Bang H. Introduction to Kalman Filter and Its Applications. IntechOpen, 2018. DOI: 10.5772/intechopen.80600.
4. Grewal M. S., Andrews A. P. Kalman Filtering: Theory and Practice with MATLAB. John Wiley & Sons, 2015, p. 640.
5. Asadi F., Sadati S. H. Adaptive Kalman Filter for Noise Estimation and Identification with Bayesian Approach. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mathematical and Computational Sciences, 2021, vol. 15, Iss. 10.
6. Serradilla O., Zugasti E., Rodriguez J. et al. Deep learning models for predictive maintenance: a survey, comparison, challenges and prospects. Applied Intelligence, 2022. DOI: 10.1007/s10489-021-03004-y.
7. Mosavi A. Structural Damage Diagnosis and Prediction Using Machine Learning and Deep Learning Models: Comprehensive Review of Advances. Preprints.org 2019, 2019120149. DOI: 10.20944/preprints201912.0149.v1.
8. Byington C. S., Amulya K. G. Handbook of Multisensor Data Fusion / S. Byington Carl, // Ch. 23. Data Fusion for Developing Predictive Diagnostics for Electromechanical Systems // CRC Press, 2009.
9. Bezerra A., Trottier C., Sanchez L. F. M. The use of artificial intelligence for assessing an overpass affected by Alkali-Silica Reaction (ASR). Ch. 40. Data Fusion for Developing Predictive Diagnostics for Electromechanical Systems. CRC Press, 2022, pp. 354–361. DOI: 10.1201/9781003322641-40.
10. Smit N., Convener, Bhumiwat S. et al. Guide for the Monitoring, Diagnosis and Prognosis of Large Motors. Cigre Working Group A1.26. December 2013, p. 53.
11. Gulgec N. S., Takác M., Pakzad S. Structural Damage Detection Using Convolutional Neural Networks. Model Validation and Uncertainty Quantification, 2022, vol. 3, pp. 331–337. DOI: 10.1007/978-3-319-54858-6_33.

12. Kashevarova G. G., Tonkov Yu. L. Technical diagnostics of reinforced concrete structures using intelligent systems. *Magazine of Civil Engineering*, 2020, Iss. 1(93), pp. 13–26. DOI: 10.18720/MCE.93.2.
13. Bulgakov A., Bock T., Kruglova T. Cyber-physical System for Diagnosing and Predicting Technical Condition of Servo-drives of Mechatronic Sliding Complex during Construction of High-rise Monolithic Buildings. 2020 Proceedings of the 37th ISARC, Kitakyushu, Japan, pp. 339–346.
14. Masalimov K. A. Primenenie dvunapravlennykh setey dolgoy kratkosrochnoy pamyati dlya opredeleniya iznosa rezhushchego instrumenta stankov s chislovyim programmym upravleniem v protsesse ekspluatatsii [The use of bidirectional networks of long short-term memory to determine the wear of the cutting tool of machine tools with numerical control during operation]. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, optimization and information technologies]. 2021, vol. 9, Iss. 4(35). DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.014. (In Russian)
15. Byington C. S., Garga A. K. Handbook of Multisensor Data Fusion. Ch. 17. Studies and Analyses within Project Correlation: An In-Depth Assessment of Correlation Problems and Solution Techniques. CRC Press, 2009.
16. Baranov L. A., Balakina E. P., Ikonnikov S. E. Tsentralizovannoe upravlenie dvizheniem poezdov gorodskikh zheleznnykh dorog sovremennogo megapolisa [Centralized traffic control of urban railways in a modern metropolis]. *Nauka i tekhnika transporta* [Nauka i Tekhnika Transporta]. 2020, Iss. 1, pp. 30–38. (In Russian)
17. Baranov L. A., Pudovikov O. E., Balakina E. P. Vliyaniye prognoza rassoglasovaniya na kachestvo upravleniya v zamknutykh avtomaticheskikh sistemakh [Influence of mismatch prediction on the quality of control in closed automatic systems]. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering]. 2022, Iss. 9, pp. 8–15. (In Russian)
18. Baranov L. A., Vorob'ev P. Yu. Metropolitn Mekhiko. Algoritm dvizheniya [Metropolitan Mexico City. Movement algorithm]. *Mir transporta* [World of transport]. 2012, Iss. 4, pp. 106–113. (In Russian)
19. Baranov L. A. *Kvantovanie po urovnyu i vremennaya diskretizatsiya v tsifrovyykh sistemakh upravleniya* [Level quantization and time discretization in digital control systems]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1990, p. 304. (In Russian)
20. Berezin I. S., Zhidkov I. P. *Metody vychisleniy* [Computational methods]. Moscow: Fizmatgiz Publ., 1959, vol. 1, p. 464. (In Russian)
21. Tsyarkin Ya. Z. *Teoriya lineynykh impul'snykh sistem* [Theory of linear impulse systems]. Moscow: Fizmatizdat Publ., 1963, p. 968. (In Russian)
22. Baranov L. A., Balakina E. P. Prognozirovaniye sluchaynykh protsessov na baze mnogochlenov, ortogonal'nykh na mnozhestve ravnootstoyashchikh toчек [Forecasting random processes based on polynomials orthogonal on the set of equidistant points]. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering]. 2020, Iss. 9, pp. 39–46. (In Russian)
23. Miln V. E. *Chislennyy analiz* [Numerical analysis]. Moscow: IL Publ., 1951, 292 p. (In Russian)