

УДК 681.53

Д. А. Гринюк, И. Г. Сухорукова, Н. М. Олиферович
Белорусский государственный технологический университет

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ АППРОКСИМАЦИИ ДЛЯ СГЛАЖИВАНИЯ ТРЕНДОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Статья посвящена вопросам адаптивной фильтрации при измерении сигналов со сложной динамикой. Примерами таких сигналов могут служить: преобразователь измерения скорости капиллярного впитывания; величина протечки при диагностике запорной арматуры. Для данных случаев предлагается изменять тип сглаживания в зависимости от динамики. Динамика оценивается с помощью аппроксимации текущих значений линейной, параболической или другой зависимостью.

Представлены результаты математического моделирования работы цифрового фильтра, бегущего среднего, а также сглаживания с помощью линейной и параболической зависимости при различных частотах полезного сигнала, проведенного с помощью пакета MatLab. Эффективность фильтра оценивалась по среднеквадратическому отклонению от исходного синусоидального сигнала. Проведенные исследования показали, что применение локальной линейной или параболической аппроксимации позволяет существенно улучшить сглаживание. Их использование также позволяет одновременно следить за динамикой и строить адаптивные схемы; одновременно контролировать параметры шума, бороться с импульсными помехами. По результатам предложен алгоритм адаптации для измерительного преобразователя впитывания.

Ключевые слова: адаптивная фильтрация, сглаживание, измерительный преобразователь.

D. A. Hryniuk, I. G. Suhorukova, N. M. Oliferovich
Belarusian State Technological University

THE USE OF ALGORITHMIC APPROACHES FOR SMOOTHING OF MEASUREMENT INFORMATION

The article is devoted to adaptive filtering in signal's with complex dynamics measurement. Examples of such signals are: the wetting speed of the capillary soaking time converter; the leakage value during the stop valve diagnosing. For these cases, it is suggested to change the type of smoothing depending on the dynamics. The dynamics is estimated by approximating current values by linear, parabolic or other dependencies.

The results of mathematical modeling of a digital filter's operation, a running average filter, and smoothing by linear and parabolic dependence at various frequencies of a useful signal, carried out with the help of MatLab, are presented. The filter efficiency was estimated from the root-mean-square deviation from the original sine signal. The conducted researches have shown, that application of local linear or parabolic approximation allows essentially to improve smoothing. Their use also allows to simultaneously monitor the dynamics and build adaptive schemes; one-time to control the noise parameters, to deal with impulse noise. Based on the results, an adaptation algorithm for the soaking measuring transducer is proposed.

Key words: adaptive filtering, smoothing, measuring transducer.

Введение. На сегодняшний день на практике применяется ряд устройств, принцип работы которых основан на преобразовании физических параметров во временные характеристики напряжения (тока). Помимо полезного сигнала, первичные преобразователи генерируют случайный. Для его устранения в измерительных схемах применяют различные варианты сглаживания и фильтрации.

Существуют два подхода в идентификации первичной информации: параметрический и непараметрический. Параметрические методы основаны на знании с определенной точностью модели восстанавливаемой зависимости. Непараметрические методы идентификации не используют такую модель. Другими словами, для преобразователей с информативным сигналом

синусоидальной формы не возникает сложностей с интерпретацией результатов параметрической и непараметрической фильтрации. Временной сдвиг в этом случае можно легко учесть. При сложных моделях динамики сигнала могут возникать погрешности.

Основная часть. Измерительные преобразователи скорости капиллярного впитывания [1] и величины протечки [2] характеризуются сложной динамикой. При использовании конструкции измерительного бумажного конденсатора [3] с чередованием металлизированных и неметаллизированных колец динамика может оказаться еще более сложной (рис. 1–2). Также бумага имеет стохастический характер расположения каналов движения жидкости, и динамику измерительного преобразователя впитывания трудно прогнозировать.

Одним из эффективных методов непараметрической фильтрации может быть метод локальной аппроксимации (МЛА) [4]. Суть этого метода состоит в использовании скользящих локально-параметрических моделей. Для обеспечения максимального качества сглаживания требуется определить порядок локальности и выбрать локально-параметрическую модель.

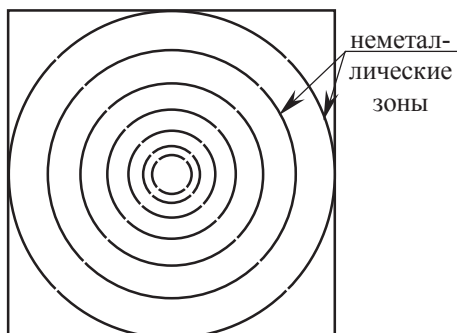


Рис. 1. Геометрия измерительного конденсатора

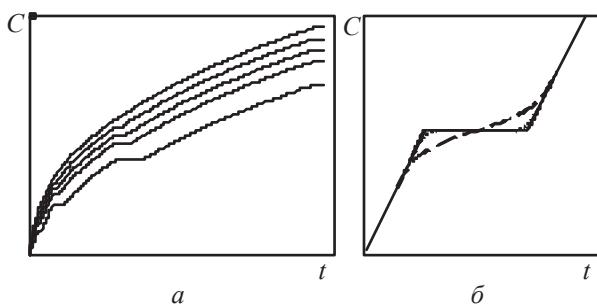


Рис. 2. Динамика изменения емкости измерительного преобразователя:

a – при наличии неметаллических полос разной ширины; *б* – фрагмент вариации динамики около полосы от флуктуации фронта пропитки; (—) – идеальная динамика; (---; - - -) – динамика при флуктуации фронта пропитки

Наиболее часто на практике для сглаживания применяются фильтры бегущего среднего и низких частот. Практика их реализации хорошо отработана. Фильтры бегущего среднего используются как простейшие формулы

$$y_i = \frac{x_i + x_{i-1} + \dots + x_{i-N+1} + x_{i-N}}{N}, \quad (1)$$

так и как формулы с весовыми коэффициентами

$$y_i = \frac{a_i x_i + a_{i-1} x_{i-1} + \dots + a_{i-N+1} x_{i-N+1} + x_{i-N}}{N}, \quad (2)$$

при условии

$$a_1 + a_2 + \dots + a_{N-1} + a_N = N,$$

где y_i – выход; x_i – текущее измерение; N – порядок (диапазон) усреднения.

Методы локальной аппроксимации могут иметь различные варианты весовых функций. Однако это сопряжено с большими требованиями по мощности вычислений. Для применения в автономном режиме в реальном времени с невысокими требованиями по мощности, приемлемым вариантом является использование прямоугольных финитных функций. В качестве локальных моделей предлагается использовать линейную и квадратичную аппроксимации:

$$y(t) = c_1 + c_2 t, \quad (3)$$

$$y(t) = d_1 + d_2 t + d_3 t^2, \quad (4)$$

где

$$\begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_2 & w_1 \\ w_3 & w_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}; \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_3 & w_2 & w_1 \\ w_4 & w_3 & w_2 \\ w_5 & w_4 & w_3 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}; \quad (6)$$

$$w_j = (t_1)^{j-1} + (t_2)^{j-1} + \dots + (t_N)^{j-1}; \quad (7)$$

$$b_j = (t_1 x_1)^{j-1} + (t_2 x_2)^{j-1} + \dots + (t_N x_N)^{j-1}; \quad (8)$$

$$t_k = [0 \ \Delta t \ 2\Delta t \ \dots \ (N-2)\Delta t \ (N-1)\Delta t], \quad (9)$$

Δt – время квантования.

Система уравнений (5)–(6) является результатом применения метода наименьших квадратов. В отличие от других весовых функций, не требует большого количества вычислений.

Для формирования выходного значения y_i может быть использовано любое значение $t = t_S$ в диапазоне аппроксимации $[0 \ (N-1)\Delta t]$. В зависимости от величины N и особенности шумов t_k имеет свое оптимальное значение. Проведенные исследования показали, что

$$|y_i(t_S) - y_S| \quad (10)$$

имеет параболическую зависимость, минимум которой находится в первой половине диапазона аппроксимации, где y_S – истинное значение параметра. При использовании (3) и значении t_S , равном половине диапазона аппроксимации, сглаживание будет соответствовать методу бегущего среднего (2).

Зачастую после аналогово-цифрового преобразователя в измерительных данных вместе с шумом первичного преобразователя возникают значения с большими отклонениями. Это является следствием либо внешних импульсных помех, либо наличия паразитивных связей в измерительной схеме. Для борьбы с такими явлениями обычно используют медианный фильтр и т. д. Путем локальной аппроксимации можно также бороться с импульсными помеха-

ми типа шпоры. Сравнивая величины отклонения $x_i \dots x_{i-N+1}$ от результатов аппроксимации с некоторыми значениями, можно существенно уменьшить влияние данного типа помех на сглаживание. Впервые обнаруженные плохие значения можно фиксировать и не использовать в последующих аппроксимациях.

Моделирование проводилось с помощью математического пакета MatLab. Генерировались синусоидальный сигнал с разными значениями частоты [0 0,0001 0,001 0,01 0,05] Гц. Значение времени квантования составляло 1 с. Первичный сигнал смешивался с шумами различных типов. Сглаживание проводилось с помощью фильтра бегущего среднего, фильтра низких частот, и аппроксимации (3) и (4). В качестве фильтра низких частот (ФНЧ) использовался фильтр Баттерворта 3-го порядка. Частота среза для каждого случая определялась отдельно путем минимизации среднеквадратического отклонения

$$|y_i - y_s| \rightarrow \min. \quad (12)$$

Диапазон для бегущего среднего и аппроксимации выбирался из значений $N = [3, 5, 9, 11, 15, 21, 25]$.

Некоторые из полученных результатов сглаживания различных типов фильтров можно видеть на рис. 3–8. На графиках представлены варианты работы фильтров с лучшими настройками. Так при минимальной частоте лучшие параметры по сглаживанию дает фильтр низких частот (рис. 3).

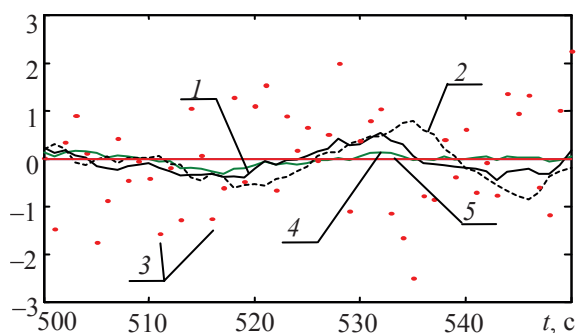


Рис. 3. Сглаживание на частоте 0 Гц для различных фильтров при наилучших параметрах:

- 1 – линейная аппроксимация; 2 – параболическая аппроксимация; 3 – исходные данные; 4 – бегущего среднего; 5 – фильтр низких частот

Но при заметной динамике среднеквадратическое отклонение для параболической аппроксимации становится сравнимым с результатом фильтра низкой частоты (рис. 4). При дальнейшем увеличении частоты параболическая аппроксимация дает лучшее сглаживание. При компенсации временной задержки отличия от

других вариантов становятся значительными. С ростом частоты уменьшается оптимальное окно аппроксимации. Результат линейной аппроксимации дает лучшие результаты на высоких частотах исследованного диапазона и высоком уровне шумов в измерительном канале.

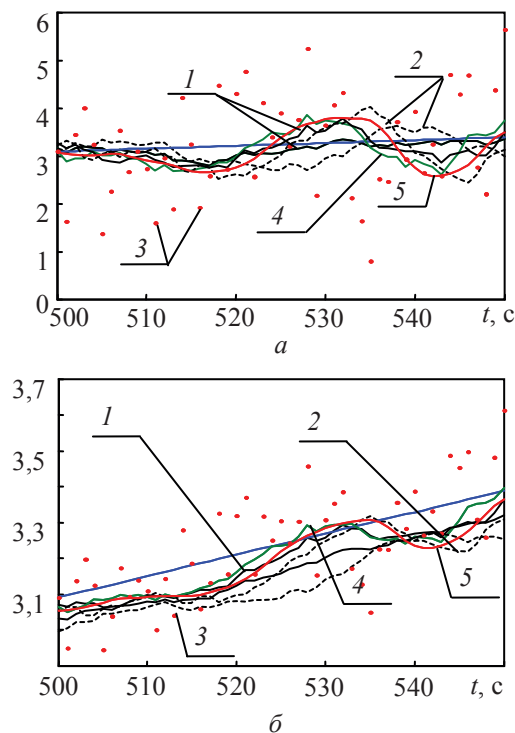


Рис. 4. Сглаживание на частоте 0,0001 Гц при высоком (а) и низком (б) уровне шума для различных фильтров:

- 1 – линейная аппроксимация ($N = 15, 25$);
2 – параболическая аппроксимация ($N = 25, 15$);
3 – исходные данные;
4 – бегущего среднего ($N = 25$); 5 – ФНЧ

Дисперсия отклонения от синусоидальной формы для параболической и линейной аппроксимаций имеет меньшее значение, начиная с частоты 0,001 Гц.

При произведении вычислений использовался алгоритм решения системы уравнения с помощью метода Гаусса. При его реализации на микроконтроллерах следует учитывать существующие ограничения при выполнении операций умножения и деления, которые могут оказывать влияние на точность результатов.

Автономная работа адаптации предполагает проведение постоянных расчетов по линейной или параболической аппроксимации. Результаты моделирования показали, что окно аппроксимации N не стоит увеличивать более чем на 20. Слежение за коэффициентами d_2 и c_2 позволяет определять текущую динамику и в зависимости от этого осуществлять выбор вида и параметров сглаживания.

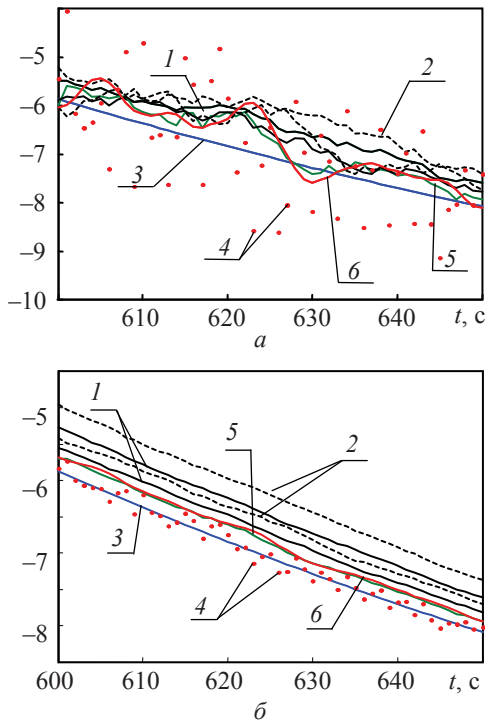


Рис. 5. Сглаживание на частоте 0,001 Гц при высоком (а) и низком (б) уровне шума для различных фильтров:

- 1 – линейная аппроксимация ($N = 15, 21$);
- 2 – параболическая аппроксимация ($N = 15, 21$);
- 3 – первичный сигнал; 4 – исходные данные;
- 5 – бегущего среднего ($N = 15$); 6 – ФНЧ

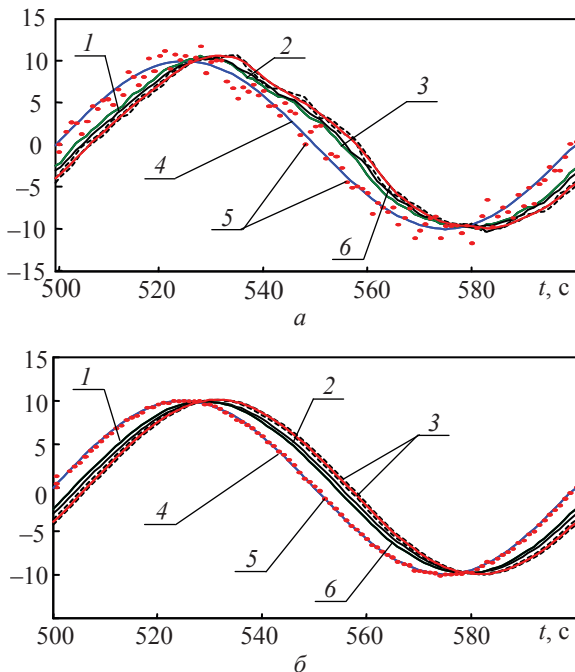


Рис. 6. Сглаживание на частоте 0,01 Гц при высоком (а) и низком (б) уровне шума для различных фильтров:

- 1 – линейная аппроксимация ($N = 11, 15$);
- 2 – бегущего среднего ($N = 11$); 3 – параболическая аппроксимация ($N = 11, 15$); 4 – первичный сигнал;
- 5 – исходные данные; 6 – ФНЧ

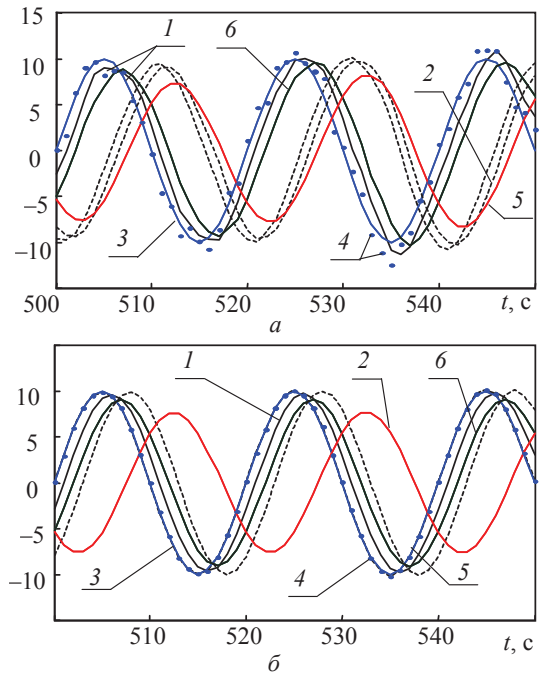


Рис. 7. Сглаживание на частоте 0,05 Гц при высоком (а) и низком (б) уровне шума для различных фильтров:

- 1 – линейная аппроксимация ($N = 3, 5$); 2 – ФНЧ;
- 3 – первичный сигнал; 4 – исходные данные;
- 5 – параболическая аппроксимация ($N = 9, 11$);
- 6 – скользящее среднее ($N = 5$)

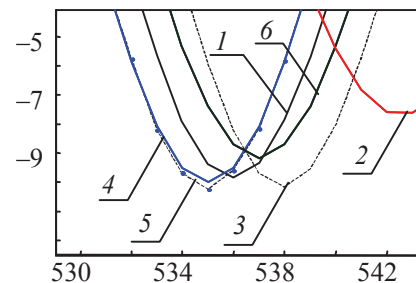


Рис. 8. Сглаживание на частоте 0,05 Гц при низком уровне шума для различных фильтров (увеличенный фрагмент):

- 1 – линейная аппроксимация ($N = 3, 5$);
- 2 – ФНЧ; 3 – первичный сигнал;
- 4 – исходные данные;
- 5 – параболическая аппроксимация ($N = 9, 11$);
- 6 – скользящее среднее ($N = 5$)

По причине флуктуации параметров d_2 и c_2 переход на новый вид или параметры фильтра лучше осуществлять с использованием триггерных алгоритмов.

Вычисление величины дисперсии отклонения значений от аппроксимированных кривых не является сложной задачей. Слежение за ней позволяет характеризовать текущие параметры шумов в измерительном канале. Это позволит осуществлять выбор между линейной и квадратичной аппроксимацией и их параметрами.

Алгоритм борьбы с импульсными помехами был представлен выше. Данный алгоритм хорошо применим для измерительного преобразователя скорости капиллярного впитывания.

Кроме метода наименьших квадратов могут быть применены другие функции метода МЛА. Использование экспоненциальных и логарифмических зависимостей потребует еще большей вычислительной мощности. Для уменьшения вычислительной мощности может быть использована квадратичная или линейная аппроксимация по методу средних.

Принцип использования расчетных формул для проведения вычислений по методу средних не отличается от метода наименьших квадратов. Матрицы для вычислений могут иметь различный вид. С учетом того, что в цифровых системах есть ограничения на вычислительную точность, следует рекомендовать разбивать исходные уравнения на приблизительно равные группы.

Пусть r, n, m – натуральные числа, равные $r \approx N/3, n \approx N/3, m \approx N/3$ при $r + n + m = N$, тогда для квадратичной зависимости

$$\begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_3 & y_2 & y_1 \\ y_6 & y_5 & y_4 \\ y_9 & y_8 & y_7 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где

$$y_1 = r; \quad y_4 = n; \quad y_7 = m; \quad (13a)$$

$$y_2 = \sum_{i=1}^r t_i; \quad y_5 = \sum_{i=1+r}^n t_{r+i}; \quad y_8 = \sum_{i=1+r+n}^N t_{r+n+i}; \quad (13b)$$

$$y_3 = \sum_{i=1}^r t_i^2; \quad y_6 = \sum_{i=1+r}^n t_{r+i}^2; \quad y_9 = \sum_{i=1+r+n}^N t_{r+n+i}^2; \quad (13c)$$

$$s_1 = \sum_{i=1}^r x_i; \quad s_2 = \sum_{i=1}^n x_{r+i}; \quad s_3 = \sum_{i=1+r+n}^N x_{r+n+i}. \quad (14)$$

При линейной зависимости

$$\begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_2 & v_1 \\ v_4 & v_3 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix}, \quad (15)$$

где

$$v_1 = z; \quad v_3 = N - z; \quad (16a)$$

$$v_2 = \sum_{i=1}^z t_i; \quad v_4 = \sum_{i=1+z}^N t_{z+i}; \quad (16b)$$

$$q_1 = \sum_{i=1}^z x_i; \quad q_2 = \sum_{i=1+z}^N x_{z+i}. \quad (14)$$

Значение z должно быть натуральным числом и равным примерно половине N .

Закключение. 1. Использование локальной линейной или параболической аппроксимации позволяет существенно улучшить сглаживание. При этом временная задержка контролируется и может быть исключена при любой форме сигнала.

2. Инструмент линейной или параболической аппроксимации позволяет одновременно следить за динамикой и строить адаптивные схемы.

3. Линейная или параболическая аппроксимации позволяют одновременно контролировать параметры шума, бороться с импульсными помехами.

Литература

1. Богослав Н. М., Гринюк Д. А., Оробей И. О. Экспериментальное исследование динамики круговой пропитки // Труды БГТУ. 2013. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 99–103.
2. Сухорукова И. Г., Гринюк Д. А., Оробей И. О. Повышение чувствительности измерителя протечек запорной арматуры // Труды БГТУ. 2015. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 132–136.
3. Oliferovich N., Hryniuk D., Orobei I. Measuring the speed of capillary soaking with adaptation regarding coordinates // 2015 Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream 2015), Vilnius, Lithuania, 21 April 2015, pp. 1–4.
4. Катковник В. Я. Непараметрическая идентификация и сглаживание данных: метод локальной аппроксимации. М.: Наука, 1985. 336 с.
5. Демидович Б. П., Марон И. А., Шувалова Э. З. Численные методы анализа: приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения. 3-е изд. М.: Наука, Гл. ред. физ-мат литературы, 1967. 368 с.

References

1. Bogoslav N. M., Hryniuk D. A., Orobei I. O. Experimental research of the dynamics of circular impregnation. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 6: Physical-mathematical sciences and informatics, pp. 99–103 (In Russian).
2. Suhorukova I. H., Hryniuk D. A., Orobei I. O. Increased sensitivity stand leaks stop valves. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 6: Physical-mathematical sciences and informatics, pp. 132–136 (In Russian).

3. Oliferovich N., Hryniuk D., Orobei I. Measuring the speed of capillary soaking with adaptation regarding coordinates. 2015 Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream 2016), Vilnius, Lithuania, 21 April 2015, pp. 1–4.

4. Katkovnik V. Ya. *Neparametricheskaya identifikatsiya i sglazhivanie dannykh: metod lokal'noy approksimatsii* [Nonparametric Identification and Data Smoothing: Method of Local Approximation]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 336 p.

5. Demidovich B. P., Maron I. A., Shuvalova E. Z. *Chislennyye metody analiza: priblizhenie funktsiy, differentsial'nye i integral'nye uravneniya* [Numerical methods of analysis: approximation of functions, differential and integral equations]. Moscow, Nauka Publ., Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1967. 368 p.

Информация об авторах

Гринюк Дмитрий Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: hryniuk@tut.by

Сухорукова Ирина Геннадьевна – ассистент кафедры информационных технологий. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: irina_x@rambler.ru

Олиферович Надежда Михайловна – ассистент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: bogosnadya@rambler.ru

Information about the authors

Hryniuk Dmitry Anatolyevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: hryniuk@tut.by

Suhorukova Irina Gennadyevna – assistant lecturer, the Department of Information Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: irina_x@rambler.ru

Oliferovich Nadezhda Mihaylovna – assistant lecturer, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bogosnadya@rambler.ru

Поступила 25.04.2017