

УДК 681.53

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

### **ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СГЛАЖИВАНИЯ СИГНАЛОВ**

В статье рассматриваются вопросы обработки данных с первичных измерительных преобразователей. Повышение чувствительности современных преобразователей сопряжено с высоким уровнем помех. Однако во многих случаях требуется сохранить полезный сигнал с минимальными искажениями после обработки.

В качестве объекта рассмотрен сигнал с датчика геометрических перемещений при измерении нелинейной деформации. Для задачи был выбран вариант кусочной аппроксимации квадратичной функцией. Оптимизация алгоритма сглаживания проводилась путем исследования на модельном сигнале, который подобен измеренному. Для повышения соотношения сигнал/шум предложено использовать двойное сглаживание. Проведен математический эксперимент для оптимизации предложенной схемы. Основная цель заключалась в определении оптимального значения окна аппроксимации для первичного и вторичного сглаживаний и проведения сравнения с однократным использованием данного алгоритма. Для этого был сгенерирован сигнал с присутствием пяти гармоник информативного сигнала с аддитивным шумом и высокочастотной паразитивной гармоникой. В качестве основного критерия выступало сохранение мощности гармоник информативного сигнала. Результаты показали, что выбранный метод сглаживания имеет чувствительность к оптимальному значению окна. Несмотря на теоретические предпосылки к отсутствию влияния многократного сглаживания на результат, поставленный эксперимент показал эффективность данного подхода. Использование многократного сглаживания позволяет уменьшить нагрузку на вычислительные ресурсы при обработке с одновременным повышением качества для данного метода.

Полученные результаты сглаживания на математической модели позволили оптимизировать процесс обработки измерительной информации в физическом эксперименте.

**Ключевые слова:** измерительный тренд, временные ряды, сглаживание.

**Для цитирования:** Гринюк Д. А., Олиферович Н. М., Сухорукова И. Г. Оптимизация процесса сглаживания сигналов // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2021. № 2 (248). С. 72–79.

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

### **SIGNAL SMOOTHING OPTIMIZATION**

The article deals with the issues of data processing from primary measuring converters. Increasing the sensitivity of modern converters is associated with a high level of interference. However, in many cases it is required to preserve the useful signal with minimal distortion after processing.

As an object, the signal from the sensor of geometric displacements when measuring nonlinear deformation is considered. For the problem, a variant of piecewise approximation by a quadratic function was chosen. The optimization of the smoothing algorithm was carried out by examining the model signal, which is similar to the measured one. To increase the signal-to-noise ratio, it is proposed to use double anti-aliasing. A mathematical experiment was carried out to optimize the proposed scheme. The main goal was to determine the optimal value of the approximation window for primary and secondary smoothing and to compare with a single use of this algorithm. For this, a signal was generated with the presence of five harmonics of an informative signal with additive noise and high-frequency parasitic harmonics. The main criterion was the conservation of the power of the harmonics of the information signal. The results showed that the selected smoothing method is sensitive to the optimal window value. Despite the theoretical prerequisites for the absence of the effect of multiple smoothing on the result, the experiment showed the effectiveness of this approach. The use of multiple anti-aliasing allows to reduce the load on computational resources during processing while improving the quality for this method.

The obtained results of smoothing on a mathematical model made it possible to optimize the process of processing measurement information in a physical experiment.

**Key words:** measuring trend, time series, smoothing.

**For citation:** Hryniuk D.A., Olinerovich N. M., Suhorukova I. G. Signal smoothing optimization. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics*, 2021, no. 2 (248), pp. 72–79 (In Russian).

**Введение.** При анализе информации с измерительных преобразователей всегда встает вопрос о рациональном уменьшении шумов. Более простым вариантом является решение в преобразователях, где полезную информацию несет первая гармоника. Тогда за счет различных цифровых и аналоговых фильтров необходимо сгладить шумы. Фильтры могут несколько увеличивать динамическую ошибку, но не искажают информацию. Однако при проведении исследований встает вопрос о сохранении формы сигнала [1–4]. Это, в первую очередь, характерно для исследований в научных лабораториях. Такие вопросы решаются и при обработке сигналов в томографии [5–8].

Применение различных вариантов линейных фильтров приводит к различному влиянию на амплитуду и фазу гармоник сигналов. Разнообразие методов, используемых в задачах анализа и моделирования временных рядов, велико [9]. При обработке данных используют методы математической статистики [10]: критерий согласия Колмогорова, теорема Вальда, теорема Гофдинга и т. д. В последнее время набирает популярность использование различных нечетких, нейронных, вейвлет-преобразований и других [11]. Так как задачи по выделению полезной информации очень различаются, то приходится использовать различные варианты для достижения приемлемого результата обработки данных.

Популярны варианты фильтров, основанных на скользящем взвешенном среднем; скользящем среднем арифметическом; методе Савицкого – Голея; сглаживании гауссианой [12, 13]. Скользящее среднее – один из самых быстрых методов сглаживания. Однако результат тяжело прогнозируется.

Перспективным является подход, предложенный в работе [12], основанный на методе наименьших квадратов (МНК), который, несмотря на сложность модели, имеет очень низкую вычислительную сложность. Согласно этому методу,  $2n + 1$  последовательных равноотстоящих точек аппроксимируются МНК полиномом  $2k$ -й степени ( $k < n$ ) и в качестве сглаженного значения используется величина полинома в  $(n + 1)$ -й точке. Оказалось, что математически это значение вычисляется путем скользящего взвешенного среднего с весами точек, положительными в центре окна фильтрации.

Для повышения качества возможен вариант многократного сглаживания скользящим взвешенным средним. Однако, согласно

центральной предельной теореме теории вероятностей [14], можно не получить выигрыша. В случае неотрицательных значений весов скользящего взвешенного среднего и при распределении со вторым моментом  $M_2$  можно не добиться улучшения. Это явление не зависит от метода сглаживания. При увеличении числа повторений  $n$  результат будет приближаться к однократному сглаживанию скользящим взвешенным средним с весами, распределенными по закону Гаусса, и вторым моментом  $M_2$ .

Многократное сглаживание имеет смысл при комбинации методов с различным принципом [8]. При медианном сглаживании рассчитывают медианное среднее по  $2n + 1$  точкам, и оно считается сглаженным значением в центральной  $(n + 1)$  точке. Фильтр Калмана для формирования результата фильтрации использует рекурсию предыдущих значений. При некоторых структурах фильтра Калмана получается эквивалент экспоненциально взвешенного среднего [15, 16].

**Цель и методика исследований.** При проведении исследований механических деформаций композитных структур была выявлена проблема сильной зашумленности измерительного тренда (рис. 1). Стояла задача выбора метода и настроек для максимального сохранения формы сигнала. Для обработки данных был выбран алгоритм с использованием метода наименьших квадратов [17, 18].

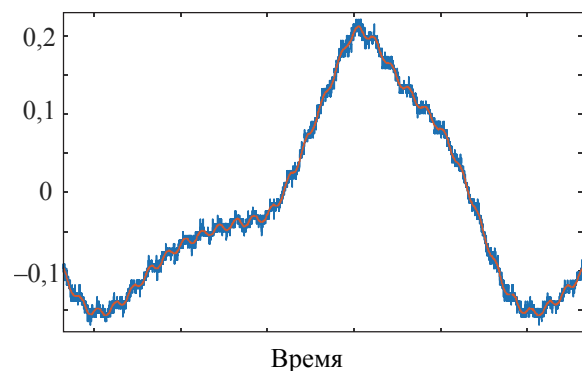


Рис. 1. Измерительный тренд с датчика контроля деформации и результат его сглаживания

Квадратичная аппроксимация

$$y(t) = d_1 + d_2t + d_3t^2, \tag{1}$$

где

$$\begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_3 & w_2 & w_1 \\ w_4 & w_3 & w_2 \\ w_5 & w_4 & w_3 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}; \tag{2}$$

$$w_j = (t_1)^{j-1} + (t_2)^{j-1} + \dots + (t_N)^{j-1}; \quad (3)$$

$$b_j = (t_1 x_1)^{j-1} + (t_2 x_2)^{j-1} + \dots + (t_N x_N)^{j-1}; \quad (4)$$

$$t_k = [0 \Delta t \ 2\Delta t \ \dots \ (N-2) \Delta t \ (N-1) \Delta t], \quad (5)$$

здесь  $\Delta t$  – время квантования.

Одним из основных параметров оптимальной выборки данного метода является выбор окна усреднения  $N$  и возможность использования многократного сглаживания.

С этой целью было произведено моделирование и последующий анализ двух сигналов той же частоты с наложением шумов и помех, которые характерны для исходной задачи.

Один из сигналов ( $MS_1$ ) (рис. 2) представлял собой гармонический сигнал с наложением псевдослучайного шума. В другом случае был смоделирован сигнал ( $MS_2$ ) сложной формы с пятью гармониками в близких соотношениях, которые характерны для сигнала с первичного преобразователя. К последнему варианту была добавлена синусоидальная высокочастотная помеха с некротной основной гармоникой, что характерно для сигнала на рис. 1. Исходные сигналы можно видеть на рис. 2, 3.

По сравнению с рис. 1 амплитуда шумов была увеличена для выявления зависимости. Каждый из модельных сигналов имел эквивалентное количество точек на период (8022), как и у экспериментального сигнала.

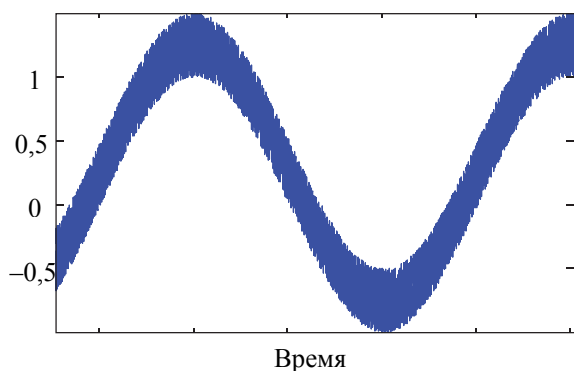


Рис. 2. Модельный сигнал  $MS_1$

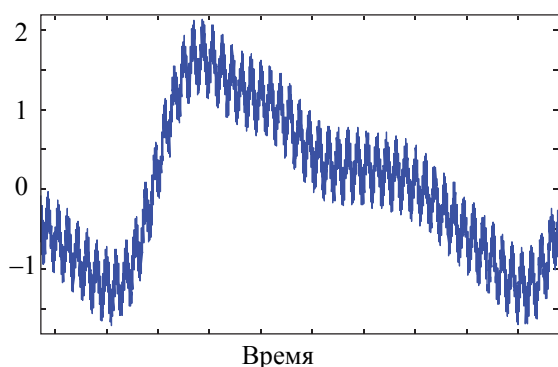


Рис. 3. Модельный сигнал  $MS_2$

Каждый из модельных сигналов сглаживался выбранным алгоритмом дважды в разных комбинациях  $N_1$  первичного и  $N_2$  вторичного тактов.  $N_1$  принимал следующие значения: 5, 9, 13, 17, 23, 29, 35, 43, 51, 105, 151, 281, 341, 381, 421, 521, 621, 721, 821, 921, 969, 1017, 1065, 1111, 1301, 1491. Для оценки качества, мощности шумов и полезных сигналов использовались спектральный анализ и теорема Парсеваля.

**Результаты и обсуждение.** Результаты сглаживания первого модельного сигнала показаны на рис. 4–6. Увеличение параметров  $N_1$  и  $N_2$ , как было сказано выше, демонстрирует, что увеличение окна способствует асимптотическому сходимости отношения сигнал/шум между однократным и двукратным сглаживанием (рис. 4).

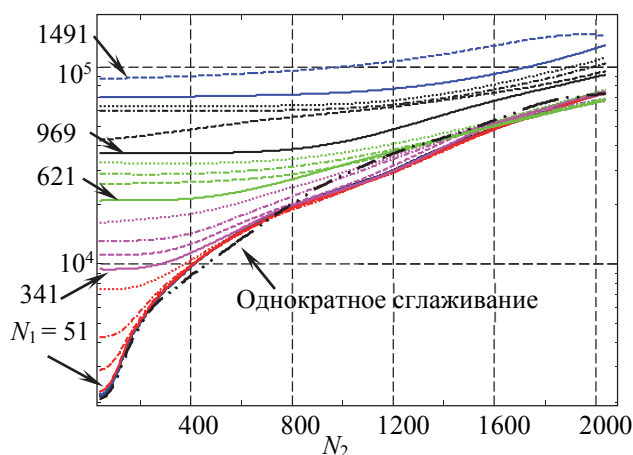


Рис. 4. Отношение исходный сигнал/шум после сглаживания для  $MS_1$

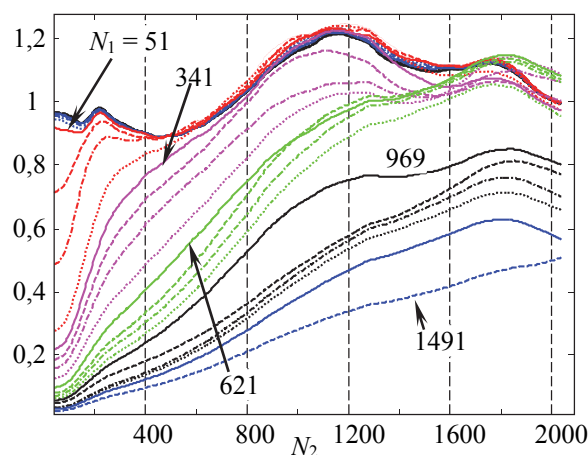


Рис. 5. Отношение мощности помех при однократном и двукратном сглаживании

Следует обратить внимание на рис. 5, 6, они демонстрируют, что после значения  $N_2$  1000–1200 намечается устойчивая тенденция изменения амплитуды основного сигнала. При этом, если первичное сглаживание происходило

в диапазоне до 300, то амплитуда полезного сигнала незначительно изменяется. Оптимальным выбором здесь будет двукратное первичное  $N_1 = 250-300$  и вторичное  $N_2 = 1200-1800$  сглаживание. Даже при  $N_1 = 621$  и  $N_2 = 1200-1400$  позиция больше выигрышная, чем при однократном сглаживании (рис. 6, а).

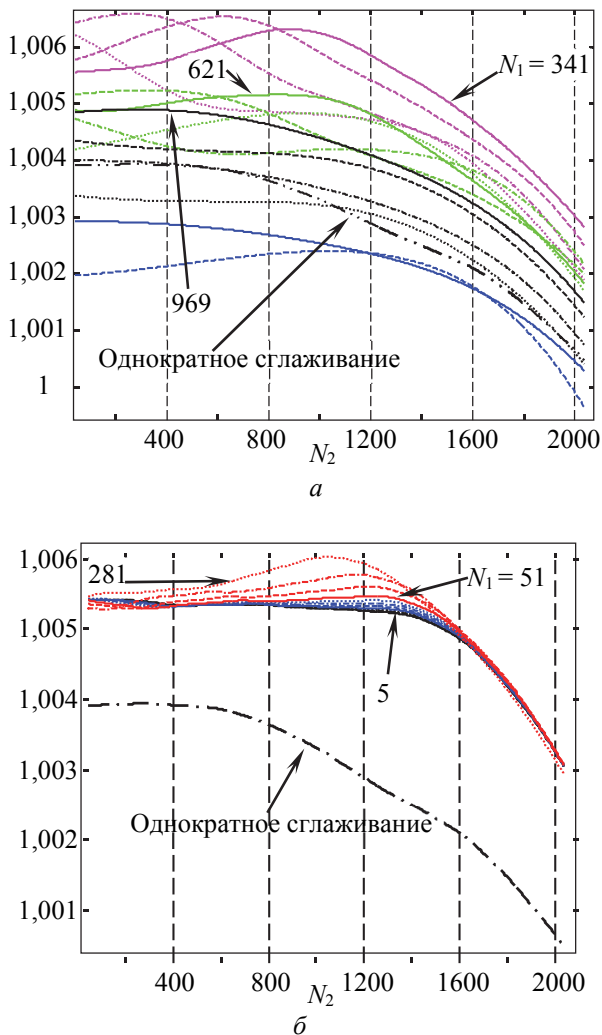


Рис. 6. Зависимость амплитуды первой гармоники от  $N_2$  после второго такта сглаживания для  $MS_1$  при  $N_1$ : а – от 341 до 1491; б – от 5 до 281

В целом при сглаживании модельного сигнала  $MS_2$  наблюдается схожая ситуация, однако присутствуют нюансы (рис. 6–8). Наличие гармонической помехи показывает существенное влияние на результат сглаживания величины  $N_1$  и  $N_2$  как при однократном, так и при двукратном сглаживании.

При двукратном сглаживании для значений  $N_1$  выше 341 гармоническая помеха не проявляется. В этом случае на окно усреднения получалось больше трех периодов гармонической помехи.

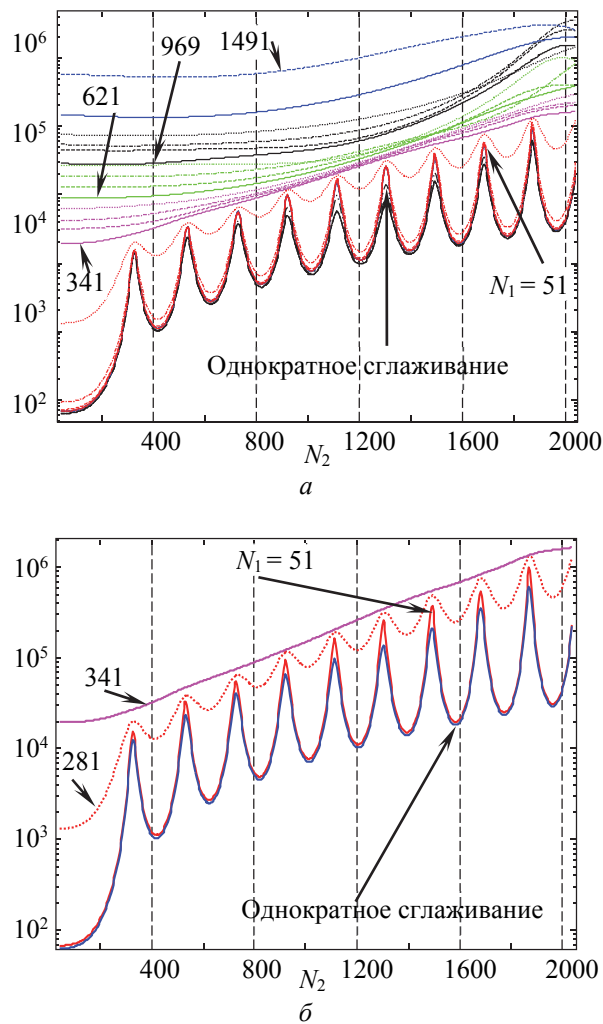


Рис. 7. Отношение исходный сигнал/шум после сглаживания для  $MS_2$ : а – весь диапазон; б – от 5 до 281 для отдельных  $N_1$

Согласно рис. 8, однократное сглаживание выигрывает перед двукратным только при небольших значениях  $N_1 = 9-13$ . Во всех остальных случаях двукратное сглаживание дает лучший результат. Особенно, если при выборе значения  $N_1$  учитывать волновой характер подавления гармонической помехи. При значениях  $N_1$  выше 341 превосходство двукратного сглаживания является очень существенным даже при небольших значениях  $N_2$ .

В отношении изменений амплитуды информативного канала наблюдается схожая картина, как и для предыдущего модельного сигнала. Существует диапазон, в котором амплитуда подвергается минимальному влиянию вследствие процесса сглаживания (рис. 9). Однако следует отметить, что изменение амплитуды более существенно, чем для модельного сигнала  $MS_1$ . Уменьшение амплитуды в первом случае на рассматриваемом диапазоне не достигало 1%, здесь же при максимальном значении  $N_1$  и  $N_2$  достигает почти 5%.

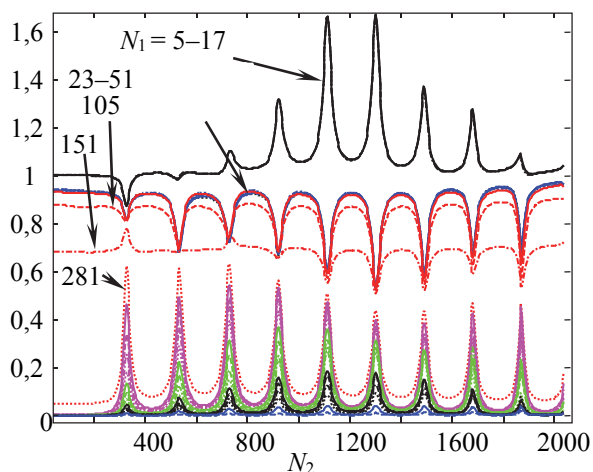


Рис. 8. Отношение мощности помех при однократном и двукратном сглаживании сложного сигнала

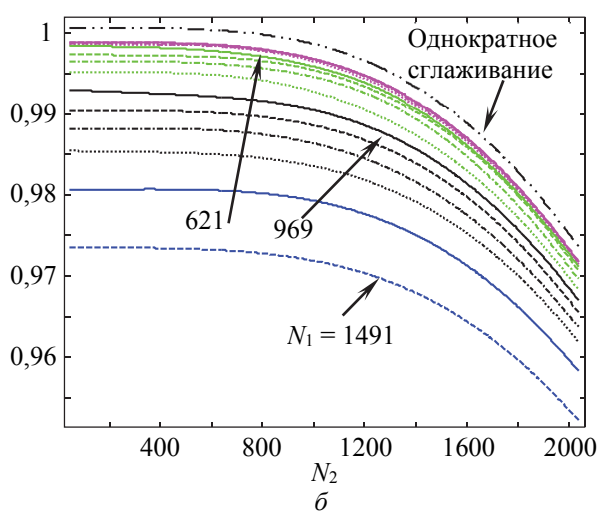
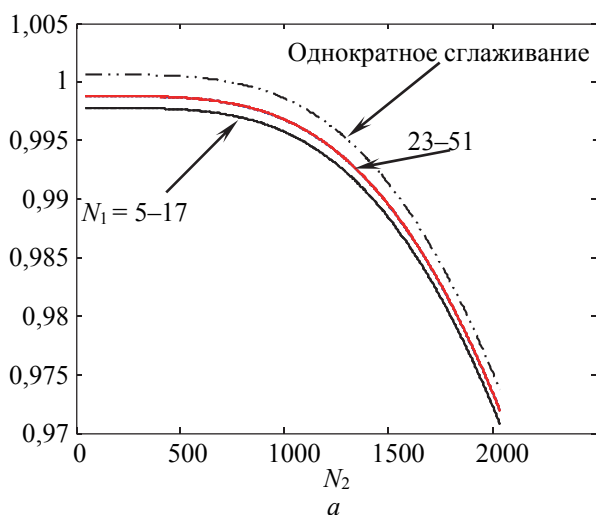


Рис. 9. Зависимость мощности информативного сигнала от  $N_2$  после второго такта сглаживания для  $MS_1$  при  $N_1$ :  
 а – от 5 до 281;  
 б – от 341 до 1491

Присутствие гармонической помехи не проявляется на рис. 9, в то же время амплитуда первой гармоники как при однократном, так и при двукратном сглаживании испытывает влияние данного воздействия. Только при значениях  $N_1$  выше 341 влияние синусоидальной помехи стремится к нулю.

Однократное сглаживание приводит к незначительному повышению мощности полезного сигнала, однако при двукратном, даже при начальном, диапазоне наблюдаются потери мощности (рис. 10).

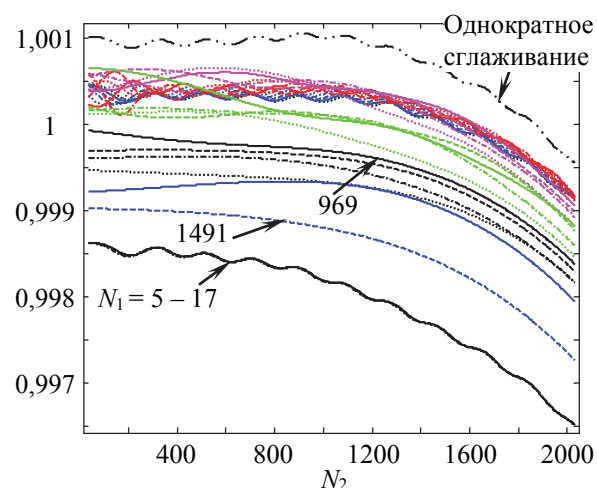


Рис. 10. Изменение амплитуды первой гармоники

Характер кривых на рис. 11. для  $MS_2$  имеет серьезные отличия от кривых для  $MS_1$ .

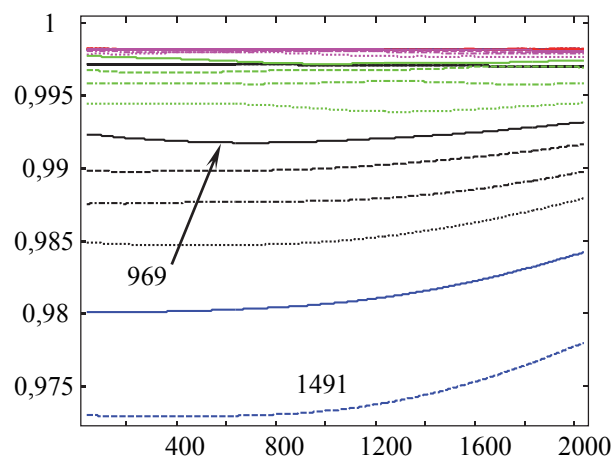


Рис. 11. Отношение мощностей полезного сигнала при однократном и двукратном сглаживании для  $MS_2$

На рис. 12 представлены тренды временных характеристик в местах наибольших градиентов для некоторых значений  $N_1$  и  $N_2$ . Сигналы имеют разную фазу для облегчения анализа.

Визуально из представленных фрагментов следует, что при выборе предпочтений настроек параметров сглаживания диапазон при данных характеристиках помех следует отдавать значениям  $N_1 = 330-800$  и  $N_2 = 400-1000$ . Следует



отметить, что выбранный алгоритм сглаживания вносит свои коррективы в постоянную составляющую сигнала. Отсутствие постоянной составляющей в исходном сигнале не гарантирует ее появления после сглаживания.

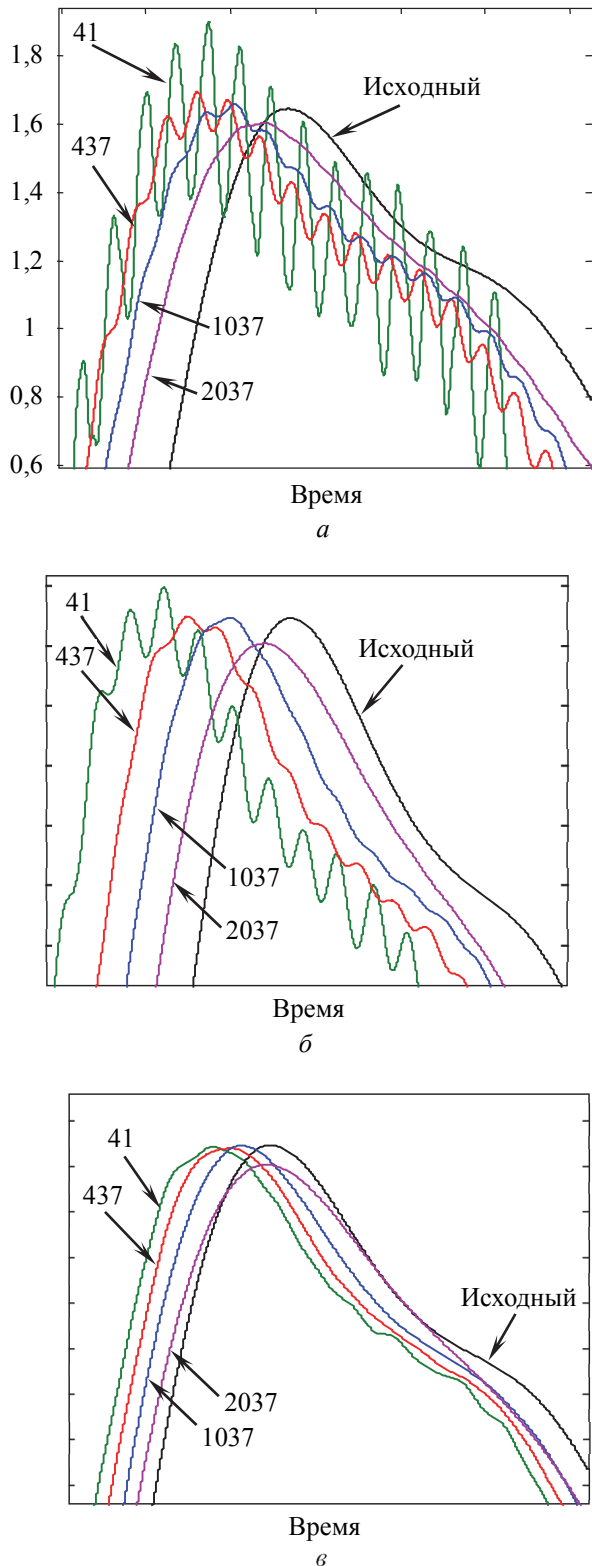


Рис. 12. Результат сглаживания для  $N_2 = 41, 437, 1037, 2037$  при  $N_1$ : а – 51; б – 281; в – 341

Из вышесказанного следует, что при настройке алгоритма сглаживания методом наименьших квадратов следует ориентироваться на особенности измерительного тренда.

Несмотря на наличие похожего характера шумов для  $MS_1$  и  $MS_2$ , рекомендации по выбору алгоритма для решения прикладных задач сглаживания у таких сигналов может быть разным. Если для первого модельного сигнала использование двукратного сглаживания не очевидно, то для второго сигнала двукратное сглаживание дает значительный выигрыш.

Нелинейный характер работы фильтра не всегда позволяет прогнозировать его работу. Современные цифровые системы редко формируют тренды с нормальным распределением шумов и помех.

Кроме полезной информации, очень часто в измерительном тренде наблюдаются помехи от сети питания и выпрямителей, особенностей работы аналогово-цифровых преобразователей (рис. 1).

При решении задачи, которая была обозначена в начале статьи, осуществлена оценка спектральных характеристик основных гармоник полезного сигнала и шумовых составляющих.

Затем произведено моделирование и нахождение компромиссных значений  $N_1$  и  $N_2$ , при которых наблюдаются небольшие изменения мощности полезных гармоник и наибольшее подавление шумовых составляющих. После этого уже происходила окончательная обработка первичной информации. Особенностью исходных данных было плавание частоты полезного сигнала.

Полученные результаты зависимости мощности от  $N$  (например, рис. 9, 10), в частности отсутствие зависимости мощности от значения  $N$  на начальном диапазоне значений, были использованы для точного определения периода колебаний. После оптимизации процесса сглаживания флуктуации частоты не оказывали влияния на качество обработки измерительной информации.

**Заключение.** 1. Использование метода наименьших квадратов предоставляет гибкие возможности по сглаживанию измерительной информации.

2. Несмотря на теоретические предпосылки, многократное сглаживание может быть более эффективным решением задачи обработки измерительной информации.

3. Наличие в измерительном тренде паразитных гармонических составляющих требует аккуратной настройки процесса сглаживания.

### Список литературы

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. Vilnius, 2015. P. 1–4.
4. Гринюк Д. А., Сухорукова И. Г., Олиферович Н. М. Использование алгоритмов аппроксимации для сглаживания трендов измерительных преобразователей // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2017. № 2 (200). С. 82–87.
5. Felinger A. Data analysis and signal processing in chromatography. *Data Handling in Science and Technology*, Elsevier, 1998. Vol. 21. 413 p.
6. Grushka E. Characterization of Exponentially Modified Gaussian Peaks in Chromatography // *Anal. Chem.* 1972. Vol. 44, no. 11. P. 1733–1738. DOI: 10.1021/ac60319a011.
7. Reconstruction of chromatographic peaks using the exponentially modified Gaussian function / Kalambet Y. A. [et al] // *J. Chemom.* 2011. Vol. 25, no. 7. P. 352–356. DOI: 10.1002/cem.1343
8. Каламбет Ю. А. Оптимизация параметров линейного сглаживания хроматографических пиков // *Научное приборостроение*. 2019. Т. 29, № 3. С. 51–60.
9. Hangos K. M., Cameron I. T. *Process modelling and model analysis*. San Diego: Academic Press, 2001. 543 p.
10. *Mathematical Statistics*. Samuel S. Wilks. Wiley, New York, 1962. XVI. 644 p.
11. Mallat S. *A wavelet tour of signal processing*. San Diego: Academic Press, 1999. 620 с.
12. Savitzky A., Golay M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures // *Anal. Chem.* 1964. Vol. 36, no. 8. P. 1627–1639. DOI: 10.1021/ac60214a047.
13. Delley R. Series for the exponentially modified Gaussian peak shape // *Anal. Chem.* 1985. Vol. 57, no. 1. P. 388–388. DOI: 10.1021/ac00279a094.
14. Вентцель Е. С. *Теория вероятностей*. М.: Высшая школа, 1999. 576 с.
15. Kaniewski P., Gil R., Konatowski S. Estimation of UAV position with use of smoothing algorithms // *Metrol. Meas. Syst.*, 2017. Vol. 24, no. 1. P. 127–142.
16. Kalman R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems // *J. Basic Eng.* 1960. Vol. 82, no. 1. P. 35–45. DOI: 10.1115/1.3662552.
17. Hryniuk D., Suhorukova I., Oliferovich N. Adaptive smoothing and filtering in transducers // 2016 Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream 2016), Vilnius, Lithuania, 21 April 2016. Vilnius, 2016. P. 1–4.
18. Катковник В. Я. *Непараметрическая идентификация и сглаживание данных: метод локальной аппроксимации*. М.: Наука, 1985. 336 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: Physics and Mathematics. Informatics, pp. 99–103 (In Russian).
2. Suhorukova I. G., Hryniuk D. A., Orobei I. O. Increased sensitivity stand leaks stop valves. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 6: Physics and Mathematics. 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 2015)*, Vilnius, Lithuania, 21 April 2015. Vilnius, 2015, pp. 1–4.
4. Hryniuk D. A., Suhorukova I. G., Oliferovich N. M. Using Approximation Algorithms to Smooth Transmitter Trends. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2017, no. 2: Physics and Mathematics. Informatics, pp. 82–87 (In Russian).
5. Felinger A. Data analysis and signal processing in chromatography. *Data Handling in Science and Technology*. 1998, Elsevier, vol. 21. 413 p.
6. Grushka E. Characterization of Exponentially Modified Gaussian Peaks in Chromatography. *Anal. Chem.*, 1972, vol. 44, no. 11, pp. 1733–1738. DOI: 10.1021/ac60319a011.
7. Kalambet Y. A., Kozmin Y. P., Mikhailova K. V., Nagaev I. Y., Tikhonov P. N. Reconstruction of chromatographic peaks using the exponentially modified Gaussian function. *J. Chemom.*, 2011, vol. 25, no. 7, pp. 352–356. DOI: 10.1002/cem.1343.

8. Kalambet Yu. A. Optimization of parameters of linear smoothing of chromatographic peaks. *Nauchnoye priborostroyeniye* [Scientific instrumentation], 2019, vol. 29, no 3 pp. 51–60.
9. Hangos K. M., Cameron I. T. Process modelling and model analysis. San Diego, Academic Press Publ., 2001. 543 p.
10. Mathematical Statistics. Samuel S. Wilks. Wiley, New York, 1962. XVI. 644 p.
11. Mallat S. A wavelet tour of signal processing. San Diego, Academic Press Publ., 1999. 620 с.
12. Savitzky A., Golay M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Anal. Chem.*, 1964, vol. 36, no. 8, pp. 1627–1639. DOI: 10.1021/ac60214a047.
13. Delley R. Series for the exponentially modified Gaussian peak shape. *Anal. Chem.*, 1985, vol. 57, no. 1, pp. 388–388. DOI: 10.1021/ac00279a094.
14. Wentzel E. S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1999, 576 с.
15. Kaniewski P., Gil R., Konatowski S. Estimation of UAV position with use of smoothing algorithms. *Metrol. Meas. Syst.*, 2017, vol. 24, no. 1, pp. 127–142.
16. Kalman R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems. *J. Basic Eng.*, 1960, vol. 82, no. 1, pp. 35–45. DOI: 10.1115/1.3662552.
17. Hryniuk D., Suhorukova I., Olyferovich N. Adaptive smoothing and filtering in transducers. *2016 Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream 2016)*, Vilnius, Lithuania, 21 April 2016. Vilnius, 2016, pp. 1–4.
18. Katkovnik V. Ya. *Neparametricheskaya identifikatsiya i sglazhivaniye dannykh: metod lokal'noy approksimatsii* [Nonparametric Identification and Data Smoothing: Method of Local Approximation]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 336 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

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

**Сухорукова Ирина Геннадьевна** – старший преподаватель кафедры программной инженерии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: irina\_x@rambler.ru

#### Information about the authors

**Hryniuk Dzmitry Anatol'yevich** – 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

**Olyferovich Nadezhda Mikhaylovna** – 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: oliferovich@belstu.by

**Suhorukova Irina Gennad'yevna** – Senior Lecturer, the Department of Software Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: irina\_x@rambler.ru

Поступила после доработки 15.06.2021