

УДК 628.1:621.65:681.5

DOI 10.62595/1819-5245-2026-2-90-98

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕДИАННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ СИГНАЛАХ ПОВЫСИТЕЛЬНОЙ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ

А. А. КАПАНСКИЙ, В. А. МАРКОВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Показана возможность применения медианной фильтрации для предварительной очистки телеметрических сигналов давления повысительной насосной станции от импульсных помех. Исходный массив включал 21 484 измерения, полученных с минутным интервалом в течение двух недель, из которых более 5,45 % отсчетов вышли за допустимый рабочий диапазон датчика 130–250 кПа. Для подавления помех рассмотрены различные размеры медианного окна. Качество фильтрации оценивалось по доле остаточных выбросов, степени снижения шума и относительной нормированной средней абсолютной ошибки (МАРЕ) искажения исходного сигнала. Показано, что увеличение скользящего окна снижает число остаточных выбросов, но повышает риск сглаживания кратковременных технологических событий. По совокупности критериев для оперативного мониторинга окно в 5 значений снижает долю помех до 0,13 % и обеспечивает значительное подавление импульсных выбросов при умеренном росте ошибки. Показано, что медианные окна большей длины целесообразны для ретроспективной подготовки архивных рядов, но не как инструмент аварийной сигнализации, поскольку могут маскировать короткие отклонения и существенно отражать аварийную динамику. Для предотвращения пропуска реальных аварий предложено использовать медианную фильтрацию совместно с правилом подтверждения аварии по последовательности исходных отсчетов.

Ключевые слова: медианная фильтрация, телеметрический сигнал, импульсные помехи, фильтрация данных, размер окна фильтра.

Для цитирования. Капанский, А. А. Исследование эффективности применения медианной фильтрации в телеметрических сигналах повысительной насосной станции / А. А. Капанский, В. А. Марков // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2026. – № 2 (105). – С. 90–98. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2026-2-90-98>

TUDY OF THE EFFECTIVENESS OF USING MEDIAN FILTERING IN TELEMETRY SIGNALS OF A BOOSTER PUMPING STATION

A. A. KAPANSKY, V. A. MARKOV

*Sukhoi State Technical University of Gomel,
the Republic of Belarus*

The feasibility of using median filtering for pre-cleaning telemetry pressure signals from a booster pump station from impulse noise is demonstrated. The initial dataset included 21,484 measurements obtained at one-minute intervals over a two-week period, of which more than 5.45 % fell outside the sensor's permissible operating range of 130–250 kPa. Various median window sizes were considered for noise suppression. The filtering quality was assessed based on the proportion of residual outliers, the degree of noise reduction, and the relative normalized mean absolute error (MAPE) of the original signal distortion. Increasing the sliding window is shown to reduce the number of residual outliers but increases the risk of smoothing out short-term process events. Based on a set of criteria for operational monitoring, a window of 5 values reduces the proportion of interference to 0.13 % and ensures significant suppression of impulse outliers with

a moderate increase in error. It has been shown that longer median windows are useful for retrospective preparation of archived data series, but not as an alarm signaling tool, as they can mask short-term deviations and significantly reflect accident dynamics. To prevent missing real accidents, it is proposed to use median filtering in conjunction with an accident confirmation rule based on the sequence of initial readings.

Keywords: median filtering, telemetry signal, impulse noise, data filtering, filter window size.

For citation. Kapanski A. A., Markov V. A. Study of the effectiveness of using median filtering in telemetry signals of a booster pumping station. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2026, no. 2 (105), pp. 90–98 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2026-2-90-98>

Введение

Системы диспетчерского мониторинга формируют непрерывные измерения, по которым оператор оценивает состояние оборудования и принимает решения о реагировании на отклонения технологических параметров. Практическая ценность таких данных определяется как точностью датчиков, так и низкой чувствительностью канала измерения к помехам. Для удаленных объектов это особенно важно, так как одиночные выбросы могут быть ошибочно интерпретированы как аварийные события и привести к ложному выезду оперативной бригады. В этой связи проведенное исследование направлено на изучение способов подавления ложных импульсных помех в телеметрических сигналах измерения давления водопроводных сетей. Такие события характеризуются кратковременностью: значение резко выходит за физически допустимый диапазон, после чего ряд возвращается к исходному уровню.

В связи с тем, что реальная динамика временного ряда в городском водоснабжении отличается малоинерционным изменением давления, для предварительной очистки данных целесообразно использовать нелинейные оконные методы, устойчивые к одиночным выбросам. Медианный фильтр является одним из наиболее простых и воспроизводимых инструментов такой обработки, где значение заменяется медианой ранжированного набора. Поэтому одиночный выброс оказывает незначительное влияние на результат. Вместе с тем при чрезмерном увеличении окна фильтр может сглаживать не только шум, но и полезные кратковременные изменения сигнала. Поиск компромисса поиска оптимальных параметров является центральным вопросом настоящего и будущих исследований.

Цель работы – оценить эффективность медианной фильтрации для очистки телеметрического сигнала давления повысительной насосной станции от импульсных помех и определить практически оправданный размер окна, при котором снижается число ложных срабатываний без потери информативности о возможных аварийных ситуациях.

Литературный обзор

Задача подавления помех в измерительных и телеметрических системах решается разными классами методов, выбор которых зависит от природы сигнала, требований к задержке обработки и наличия априорной модели объекта. В работах по телеметрии гидравлических каналов связи рассматриваются вейвлет-преобразования, адаптивные фильтры и схемы с двумя датчиками, позволяющие отделять полезный сигнал от помех насосного оборудования [1]. Эти подходы эффективны при наличии сложной модели канала, однако требуют большего объема вычислений и предварительной настройки.

Медианная фильтрация широко применяется там, где помехи имеют импульсный характер. В системах мониторинга температуры и влажности медианный фильтр повышает устойчивость данных датчиков с более выраженным шумом [2]. В задачах обработки изображений развиваются адаптивные модификации медианного фильтра,

в том числе методы с изменяемыми масками и алгоритмы, восстанавливающие только поврежденные элементы [3, 8]. Несмотря на отличие изображений от временных рядов давления, эти работы подтверждают важное свойство медианного подхода, способное избирательно подавлять одиночные экстремальные значения.

Для измерительных систем также применяются комбинированные методы фильтрации и компенсации. Так, в системах датчиков давления используются алгоритмы фильтрации совместно с температурной стабилизацией и PID-компенсацией [4]. Для МЭМС-гидрофонов предложены методы на основе EEMD и SSA, позволяющие разделять периодические вибрационные шумы и низкочастотный дрейф [5]. Фильтр Калмана и его модификации эффективны, если можно задать модель динамики и ковариации шумов [6], а байесовские фильтры частиц позволяют учитывать негауссову природу помех [7].

Анализ литературы показывает, что медианная фильтрация остается оправданным базовым методом для очистки данных, когда помехи представлены короткими выбросами, а система должна работать с минимальной вычислительной задержкой. Однако, как показал предварительный обзор, недостаточно проработанным остается вопрос выбора размера сглаженного окна для реальных телеметрических рядов коммунальной инфраструктуры, где избыточное сглаживание может привести к пропуску аварийных событий.

Методы исследования

Объект исследования и подготовка исходных данных

Объектом исследования является одна из повысительных насосных станций системы централизованного водоснабжения г. Гомеля. В целях публикационной этики объект в исследовании обозначен обобщенно, без привязки к точному адресу. На станции установлены датчики давления и оборудование телеметрической регистрации, передающее значения в диспетчерскую систему с минутным шагом. Вблизи измерительных цепей расположены частотные преобразователи, работа которых может формировать электромагнитные наводки и приводить к импульсным отклонениям показаний датчиков. На рис. 1 приведен график исходных данных давления.

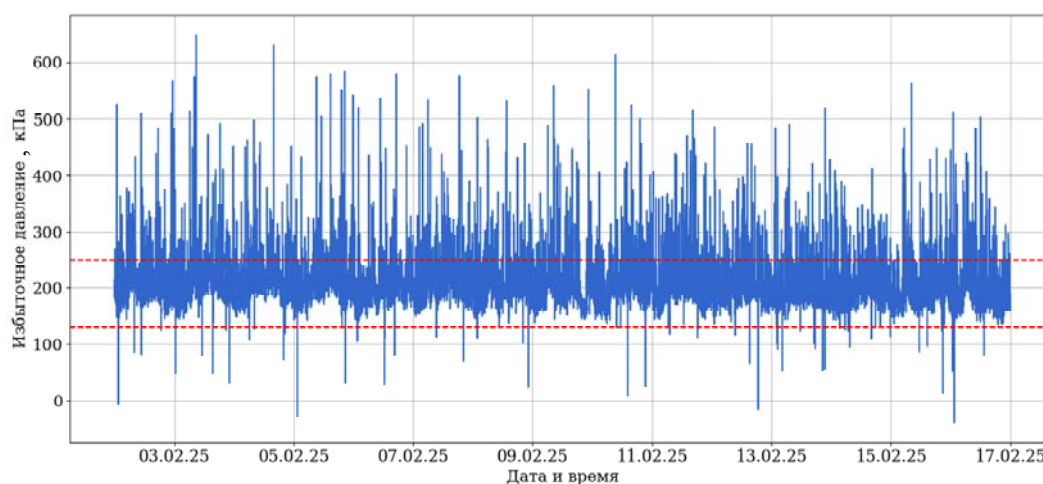


Рис. 1. Исходный телеметрический сигнал давления с границами допустимого диапазона:

----- – минимальное значение – 130; ----- – максимальное значение – 250

Исходный массив включал более 21 484 измерений, зарегистрированных в течение двух недель. В качестве допустимого рабочего диапазона давления использовался интервал 130–250 кПа. Значения, выходящие за эти границы, рассматривались как кандидаты на импульсные помехи или технологические отклонения, требующие дополнительной проверки. В исходном ряду таких помех было около 5,45 %. Важно подчеркнуть, что выход значения за допустимые границы сам по себе не доказывает наличие помехи; в реальной эксплуатации такое событие может быть как одиночным аппаратным выбросом, так и началом технологического нарушения. Поэтому в исследовании медианная фильтрация рассматривается как предварительный этап очистки потока данных.

Математический аппарат медианной фильтрации

Пусть x_i – исходное значение телеметрического сигнала в момент времени i , а $y_i^{(N)}$ – значение после медианной фильтрации с размером окна N . В работе использовалось одностороннее скользящее окно, состоящее из текущего и предыдущих отсчетов. Для текущего момента i в окно попадают последние N измерений: $x_{i-N+1}, x_{i-N+2}, \dots, x_i$. Будущие значения x_{i+1}, x_{i+2} при расчете не используются, поэтому алгоритм может применяться в режиме потоковой обработки данных [9]:

$$y_i^{(N)} = \text{med}(x_{i-N+1}, x_{i-N+2}, \dots, x_i), \quad (1)$$

где $y_i^{(N)}$ – выходное значение (отфильтрованный сигнал) с окном длины N ; x – входной сигнал (исходная последовательность значений).

Например, при размере окна $N = 5$ выходное значение для текущего отсчета определяется выражением

$$y_i^{(5)} = \text{med}(x_{i-4}, x_{i-3}, x_{i-2}, x_{i-1}, x_i). \quad (2)$$

На рис. 2 представлен принцип действия медианной фильтрации.

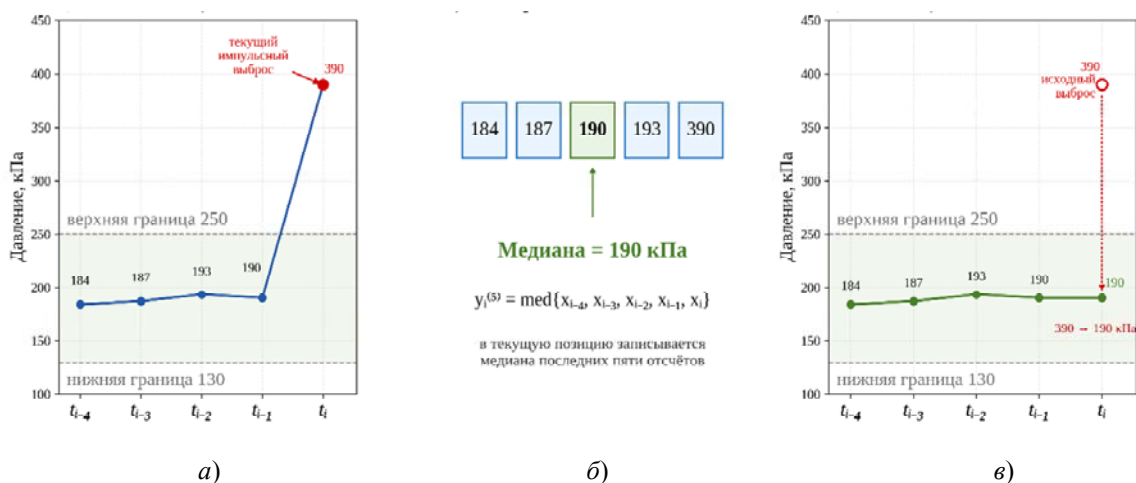


Рис. 2. Принцип медианной фильтрации на примере одиночного импульсного выброса:
 а – окно $N = 5$ до текущего отсчета; б – ранжирование значений окна; в – замена текущего значения

Таким образом, при медианной фильтрации текущее значение телеметрического сигнала заменяется медианой окна, включающего текущий и несколько предыдущих отсчетов, соответствующих окну N .

Погрешность и доля шумов

Качество фильтрации оценивалось по трем показателям: доле остаточных выбросов, степени подавления выбросов и относительной средней абсолютной ошибке. Доля остаточных выбросов после фильтрации окном N рассчитывалась по формуле

$$p_N = (m_N / n) 100 \%, \quad (3)$$

где n – общее число измерений; m_N – количество отсчетов после фильтрации, выходящих за допустимые границы 130–250 кПа. Для исходного ряда $p_0 = 5,45 \%$.

Степень подавления выбросов определялась относительно исходного уровня:

$$S_N = (1 - p_N / p_0) 100 \%. \quad (4)$$

Средняя абсолютная ошибка использовалась для оценки искажения полезной части сигнала при увеличении окна. Поскольку независимый эталонный ряд давления отсутствовал, в качестве опорной части ряда рассматривались исходные значения, находящиеся внутри рабочего диапазона. Относительная ошибка нормировалась на ширину допустимого диапазона давления:

$$MAE_N = \frac{\sum_{i \in V} y_i^{(N)} - x_i}{n_V (p_{\max} - p_{\min})}, \quad (5)$$

где V – множество исходных отсчетов в пределах 130–250 кПа; n_V – количество значений в рабочем диапазоне; p_{\max} , p_{\min} – минимальная и максимальная границы рабочего диапазона.

Критерий выбора окна

Для практического применения фильтра необходимо учитывать две противоположные задачи: снижать число ложных срабатываний и одновременно не маскировать реальные технологические отклонения. Поэтому оптимальный размер окна выбирался по компромиссу между минимальным $MAPE$ при достаточно малой доле остаточных выбросов. Для того чтобы медианная фильтрация не подавляла истинные аварийные события, предложено применение совместно с правилом подтверждения события оператором. Одиночный выход исходного значения за границу диапазона должен фиксироваться как предварительное предупреждение. Аварийное событие рекомендуется подтверждать, если нарушение сохраняется в нескольких последовательных исходных отсчетах, либо если после медианной фильтрации значение также выходит за допустимый диапазон. Для минутного шага регистрации практически применим порог подтверждения 3–5 последовательных отсчетов, который должен уточняться технологическим регламентом объекта. На рис. 3 показан фрагмент классификации события с учетом длительности и глубины отклонения давления от заданных порогов.

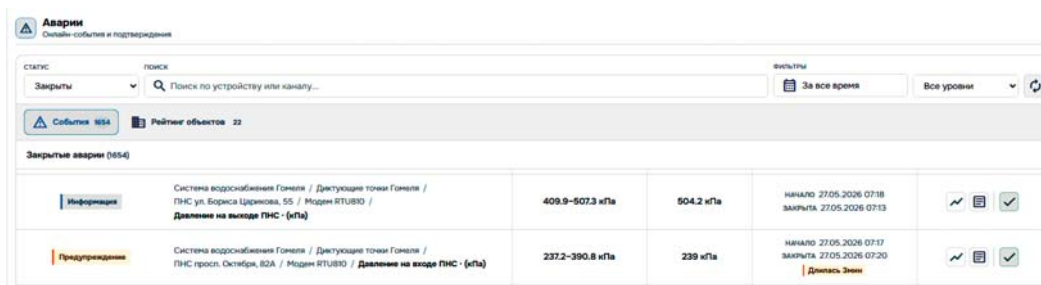


Рис. 3. Фрагмент диспетчерской платформы с динамической классификацией события по глубине и длительности аварии

Рассмотренная классификация основана на глубине отклонения давления от допустимого диапазона и длительности события. В рассматриваемом примере выделены три уровня: информационный, предупредительный и критический. Информационный уровень используется для фиксации кратковременных, прошедших через фильтр, и связан с одиночными выбросами телеметрического сигнала. Предупредительный уровень соответствует более выраженным и устойчивым нарушениям, требующим внимания оператора. Критический уровень формируется при значительном и длительном отклонении давления, когда возрастает вероятность реального технологического нарушения.

Результаты и обсуждения

Медианная фильтрация была выполнена для нечетных размеров окна от $N = 3$ до $N = 17$. В исходном ряду доля отсчетов за пределами рабочего диапазона составляла 5,45 %. Минимальное окно $N = 3$ существенно снизило число выбросов, при этом уровень помех уменьшился на 84,22 %, а относительная MAE составляет 5,24 %. Однако при таком окне сохранялась часть одиночных отклонений, поэтому риск ложных срабатываний остается существенным. При размере окна $N = 5$ доля остаточных выбросов снизилась до 0,13 %, а подавление импульсных помех достигла уровня в 97,69 %. Для двухнедельного массива это означает переход от 1 171 потенциально ошибочного отсчета к единичным остаточным событиям, которые могут быть дополнительно обработаны правилом подтверждения. На рис. 4 приведен телеметрический сигнал после медианной фильтрации с размером окна $N = 5$.

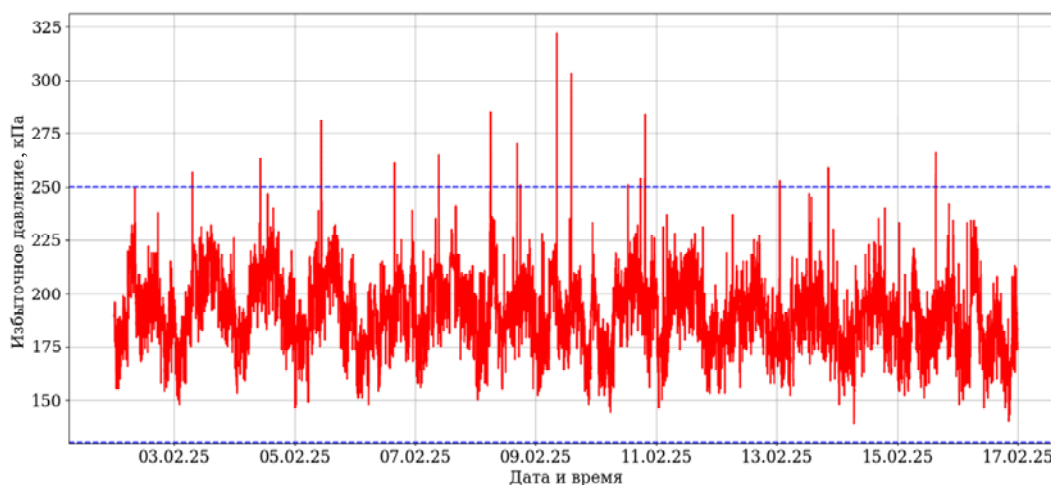


Рис. 4. Телеметрический сигнал после медианной фильтрации с окном $N = 5$:
 — после медианной фильтрации (окно 5); — — — — минимальное значение – 130; — — — — максимальное значение – 250

Увеличение окна до $N = 11$ позволяет удалить все отсчеты, выходящие за границы диапазона, т. е. получить $p_N = 0$ %. С точки зрения чистоты данных такой результат выглядит наиболее эффективным, однако он достигается за счет сильного сглаживания, после которого реальная технологическая динамика может сильно исказиться. Поэтому окна большой длины не следует использовать в общем блоке настройки аварийной сигнализации. Результат фильтрации при $N = 11$ показан на рис. 5.

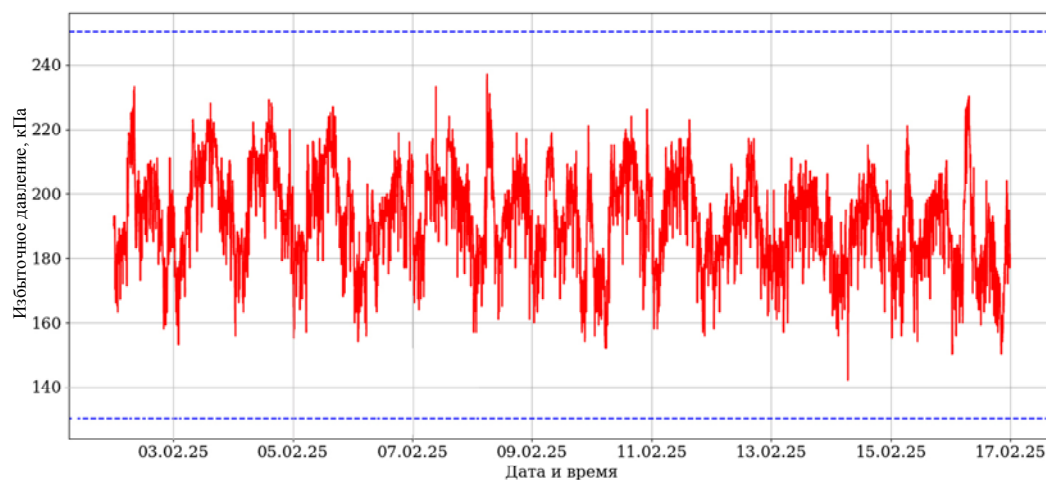


Рис. 5. Телеметрический сигнал после медианной фильтрации с окном $N = 11$

— после медианной фильтрации (окно 11); --- — минимальное значение – 130; --- — максимальное значение – 250

В таблице приведены результаты сравнения фильтрации с окнами различной длины.

Сравнение ключевых режимов медианной фильтрации

Размер окна N	Остаточные выбросы, %	Подавление шума, %	MAE , %	Практическая эффективность
3	0,86	84,22	5,24	Сохраняет динамику сигнала, но оставляет заметное число единичных выбросов
5	0,13	97,69	5,9	Целесообразный режим для оперативного мониторинга с подавлением почти всех выбросов и сохранением кратковременной динамики временного ряда
11	0,00	100,00	7,2	Подходит для ретроспективного сглаживания и использования в моделях машинного обучения, но существенно искажает короткие аварийные события

Динамика MAE при увеличении окна показана на рис. 6. График подтверждает монотонный рост ошибки и наглядно показывает, что, чем больше размер окна, тем сильнее фильтр подавляет не только выбросы, но и естественные кратковременные колебания давления. Поэтому полный нулевой уровень остаточных выбросов не является достаточным основанием для выбора максимального размера окна.

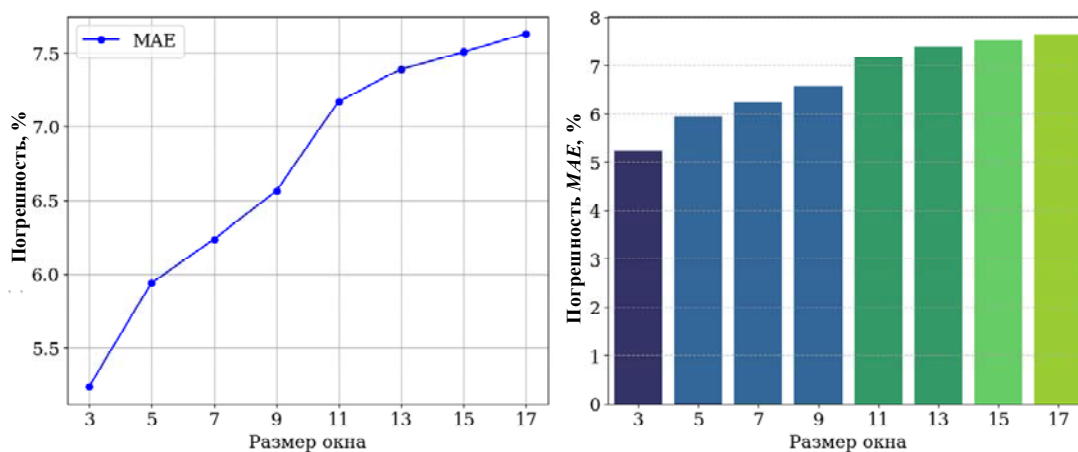


Рис. 6. Изменение относительной MAPE при увеличении размера окна медианного фильтра

С учетом полученных результатов рабочим компромиссом для оперативного мониторинга является медианная фильтрация с окном $N = 5$, которая почти полностью устраняет импульсные помехи, но сохраняет большую часть кратковременной динамики сигнала и не требует ожидания будущих измерений. Окна с размером $N = 11$ и выше допустимы для ретроспективной подготовки архивных данных, построения отчетных графиков и визуального анализа тенденций.

Заключение

На основе реального массива телеметрических данных повысительной насосной станции объемом 21 484 измерения показано, что медианная фильтрация является эффективным инструментом предварительной очистки сигналов давления от импульсных помех. В исходном ряду доля значений за пределами допустимого диапазона 130–250 кПа составляла 5,45 %. Сравнение размеров окна $N = 3$ –17 подтвердило наличие компромисса между чистотой данных и сохранением информативности сигнала. Окно $N = 3$ обеспечивает низкую относительную ошибку (5,24 %) и снижает уровень выбросов на 84,22 %, но оставляет часть одиночных помех. Медианное окно $N = 5$ снижает долю остаточных выбросов до 0,13 % и подавляет 97,69 % импульсных помех, поэтому рассматривается как основной режим для оперативного мониторинга. Для предотвращения пропуска аварий фильтр должен дополняться логикой подтверждения события и классификацией аварийных режимов по глубине и длительности. Дальнейшее развитие исследования связано с проверкой предложенного правила на размеченных аварийных эпизодах и исследованием применения медианной фильтрации с методами экспоненциального сглаживания.

Литература

1. Li, C. A Review of Communication Technologies in Mud Pulse Telemetry Systems / C. Li, Z. Xu // Electronics. – 2023. – Vol. 12, N 18. – Art. 3930. – DOI 10.3390/electronics12183930
2. Kusumo, L. A. Implementation of Median Filter in Data Processing of Temperature and Humidity Monitoring System with DHT 11 and DHT 22 Sensors / L. A. Kusumo // Jurnal Krisnadana. – 2025. – Vol. 4, N 2. – P. 103–110. – DOI 10.58982/krisnadana.v4i2.723
3. Червяков, Н. И. Два метода адаптивной медианной фильтрации импульсного шума на изображениях / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, А. Р. Оразаев // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 4. – С. 667–678. – DOI 10.18287/2412-6179-2018-42-4-667-678

4. Design of MEMS Pressure Sensor Anti-Interference System Based on Filtering and PID Compensation / B. Li, G. Sun, H. Zhang [et al.] // *Sensors*. – 2024. – Vol. 24, N 17. – Art. 5765. – DOI 10.3390/s24175765
5. Signal Denoising Method Based on EEMD and SSA Processing for MEMS Vector Hydrophones / P. Wang, J. Dong, L. Wang, S. Qiao // *Micromachines*. – 2024. – Vol. 15, N 10. – Art. 1183. – DOI 10.3390/mi15101183
6. Improved Kalman Filter Method for Measurement Noise Reduction in Multi Sensor RFID Systems / K. H. Eom, S. J. Lee, Y. S. Kyung [et al.] // *Sensors*. – 2011. – Vol. 11, N 11. – P. 10266–10282. – DOI 10.3390/s111110266
7. Zientarski, T. The usability of Bayesian filters in noise reduction across interdisciplinary data / T. Zientarski, J. Kozar, K. Pietrak // *Advances in Science and Technology Research Journal*. – 2025. – Vol. 19, N 12. – P. 420–435. – DOI 10.12913/22998624/209887
8. Белим, С. В. Фильтрация импульсного шума на изображении на основе алгоритма выявления сообществ на графах / С. В. Белим, С. Б. Ларионов // *Информационно-управляющие системы*. – 2017. – № 3. – С. 18–24. – DOI 10.15217/issn1684-8853.2017.3.18
9. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений: преобразования и медианные фильтры : пер. с англ. / под ред. Т. С. Хуанга. – М. : Радио и связь, 1984. – 224 с.

References

1. Li C., Xu Z. A Review of Communication Technologies in Mud Pulse Telemetry Systems. *Electronics*, 2023, vol. 12, no. 18, art. 3930. <https://doi.org/10.3390/electronics12183930>
2. Kusumo L. A. Implementation of Median Filter in Data Processing of Temperature and Humidity Monitoring System with DHT 11 and DHT 22 Sensors. *Jurnal Krisnadana*, 2025, vol. 4, no. 2, pp. 103–110. <https://doi.org/10.58982/krisnadana.v4i2.723>
3. Chervjakov N. I., Ljahov P. A., Orazaev A. R. Two methods of adaptive median filtering of impulse noise in images. *Komp'yuternaya optika = Computer Optics*, 2018, vol. 42, no. 4, pp. 667–678 (In Russian). <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2018-42-4-667-678>
4. Li B., Sun G., Zhang H., Dong L., Kong Y. Design of MEMS Pressure Sensor Anti-Interference System Based on Filtering and PID Compensation. *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 17, art. 5765. <https://doi.org/10.3390/s24175765>
5. Wang P., Dong J., Wang L., Qiao S. Signal Denoising Method Based on EEMD and SSA Processing for MEMS Vector Hydrophones. *Micromachines*, 2024, vol. 15, no. 10, art. 1183. <https://doi.org/10.3390/mi15101183>
6. Eom K. H., Lee S. J., Kyung Y. S., Lee C. W., Kim M. C., Jung K. K. Improved Kalman Filter Method for Measurement Noise Reduction in Multi Sensor RFID Systems. *Sensors*, 2011, vol. 11, no. 11, pp. 10266–10282. <https://doi.org/10.3390/s111110266>
7. Zientarski T., Kozar J., Pietrak K. The usability of Bayesian filters in noise reduction across interdisciplinary data. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2025, vol. 19, no. 12, pp. 420–435. <https://doi.org/10.12913/22998624/209887>
8. Belim S. V., Larionov S. B. Image impulse noise filtering based on graph community detection algorithm. *Informacionno-upravljajushhie sistemy = Information and Control Systems*, 2017, no. 3, pp. 18–24 (In Russian). <https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2017.3.18>
9. Ed. Huang T. S. *Fast algorithms in digital image processing: transformations and median filters*. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1984. 224 p. (in Russian).

Поступила 02.06.2026 г.