

УДК 004.62

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ В ЗНАЧЕНИЯХ ТЕКУЩИХ ПОКАЗАНИЙ ПАЦИЕНТА ПРИ ИСКУССТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ЛЕГКИХ

С.Г. Климанов¹, А.В. Крянев^{1,2*}, В.А. Трикозова¹, Д.Д. Царева¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия,

*e-mail: AVKryanev@mephi.ru

Поступила в редакцию: 10.02.2024

После доработки: 18.02.2024

Принята к публикации: 20.02.2024

Искусственная вентиляция легких (ИВЛ) считается одним из важнейших методов интенсивной терапии, входящим в комплекс мер по поддержанию жизненно важных функций организма в критических состояниях. В связи с созданием интеллектуальных режимов вентиляции легких, повышающих эффективность управления аппаратами ИВЛ, необходимо разработать и применить различные вычислительные схемы обработки данных значений текущих показателей пациента при ИВЛ. В статье рассматривается проблема выявления аномальных выбросов и нивелирования их отрицательного влияния на выделяемые значимые характеристики рассчитываемых показателей, необходимых для принятия оптимальных значений параметров вентиляционного потока, обеспечивающих наиболее эффективное лечение пациента. Для решения поставленной задачи в статье рассматриваются и применяются несколько так называемых робастных методов и основанных на них вычислительных схем выделения аномальных выбросов в значениях показателей состояния пациента и определения их будущих значений.

Ключевые слова: аномальные выбросы, выявление аномальных выбросов, метрический анализ, робастные методы, искусственная вентиляция легких, показания пациента.

DOI: 10.26583/vestnik.2024.319

EDN ORGLAD

ВВЕДЕНИЕ

Важной задачей длительной ИВЛ является постоянное поддержание оптимальных режимов вентиляции [1, 2].

Еще одной проблемой, связанной с длительной ИВЛ, является необходимость постоянного подбора и изменения режимов аппаратной вентиляции в сторону повышения дыхательной активности пациента в случае постепенного восстановления у него самостоятельного дыхания [3].

Конечной целью исследований в этой области является разработка модуля программного обеспечения аппарата ИВЛ, решающего в динамическом режиме задачу выбора оптимальных значений параметров вентиляционного потока в зависимости от текущего состояния пациента, находящегося в режиме ИВЛ.

Целью настоящей работы является решение части вышеуказанной конечной цели, связанной с предварительной обработкой исходных дан-

ных, в частности выявление аномальных выбросов в значениях текущих показаний пациента при искусственной вентиляции легких.

РОБАСТНЫЕ МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ

Одной из основных задач вычислительного комплекса программного обеспечения (ПО) ИВЛ является определение оптимальных значений параметров вентилирующего потока аппарата ИВЛ в зависимости от значений параметров, характеризующих текущее состояние пациента.

Одними из математических методов, решающих эту задачу, выбраны методы интерполяции, экстраполяции и прогнозирования, основанные на метрическом анализе [4].

Методы метрического анализа позволяют восстанавливать многомерную функциональную зависимость с максимально возможной точностью на основе даже небольшого набора

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ В ЗНАЧЕНИЯХ ТЕКУЩИХ ПОКАЗАНИЙ ПАЦИЕНТА ПРИ ИСКУССТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ЛЕГКИХ

статистических данных, в том числе с учетом дополнительных данных, полученных в процессе лечения конкретного пациента, что позволяет реализовать работу алгоритма выбора оптимальных значений параметров вентиляционного потока для конкретного пациента в адаптационном режиме.

Ниже приведены части алгоритмов, реализующих решение вышеуказанной основной вычислительной задачи.

В исходных данных о текущем состоянии пациента могут быть так называемые аномальные выбросы, причинами которых может быть как неправильная фиксация значений показателей (и тогда это сигнализирует о подкритическом или критическом состоянии пациента), либо сбой в показаниях датчиков (причиной которых, как правило, является смещение крепления датчиков или другое обстоятельство аналогичного характера). Ясно, что такого рода фиксации аномальных показаний датчиков должны выявляться онлайн и сообщаться в автоматическом режиме дежурному врачу (медицинской сестре), а также и учитываться при принятии решения по подбору оптимальных значений параметров вентиляционного потока.

Ниже приведены математическая схема и алгоритм выявления и фильтрации такого рода аномалий [4–8]. Математически эта задача сводится к выделению из совокупности зашумленных значений исследуемой функциональной зависимости аномальных выбросов. Представлен универсальный метод, который позволяет выделять из рассматриваемой совокупности значений аномальные выбросы, в том числе в динамическом режиме.

Пусть рассматриваемый показатель состояния пациента Y принимает значения Y_i для $i = 1, \dots, n$. Обозначим нормальные значения этого показателя для пациента \hat{Y}_i .

Определим вектор $\vec{Y}^{(1)}$ по формулам:

$$Y_i^{(1)} = \begin{cases} Y_i, & \text{если } i \in I_0^{(1)}, \\ Y_i - K\sigma_i, & \text{если } i \in I_+^{(1)}, \\ Y_i + K\sigma_i, & \text{если } i \in I_-^{(1)}, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} I_0^{(1)} &= \{i : |Y_i - \hat{Y}_i| \leq K\sigma_i\}, \\ I_+^{(1)} &= \{i : Y_i - \hat{Y}_i > K\sigma_i\}, \\ I_-^{(1)} &= \{i : Y_i - \hat{Y}_i < -K\sigma_i\}, \end{aligned} \quad (2)$$

K – так называемый параметр Хьюбера, значение которого зависит от доли больших выбросов, и в данной работе $K = 1.8$.

Реализуем итерационный процесс:

$$Y_i^{(l+1)} = \begin{cases} Y_i^{(l)}, & \text{если } i \in I_0^{(l+1)}, \\ Y_i^{(l)} - K\sigma_i, & \text{если } i \in I_+^{(l+1)}, \\ Y_i^{(l)} + K\sigma_i, & \text{если } i \in I_-^{(l+1)}, \end{cases} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} I_0^{(l+1)} &= \{i : |Y_i^{(l)} - \hat{Y}_i^{(l)}| \leq K\sigma_i\}, \\ I_+^{(l+1)} &= \{i : Y_i^{(l)} - \hat{Y}_i^{(l)} > K\sigma_i\}, \\ I_-^{(l+1)} &= \{i : Y_i^{(l)} - \hat{Y}_i^{(l)} < -K\sigma_i\}. \end{aligned} \quad (4)$$

На основании «подправленных» начальных данных $Y_i^{(l+1)}$ находим $\hat{Y}_i^{(l+1)}$.

Введем норму в пространстве E^n :

$$\|\vec{Y}\| = \max_{i=1, \dots, n} |Y_i|. \quad (5)$$

Тогда, задав приемлемый уровень допустимой погрешности $\varepsilon > 0$, продолжаем описанный итерационный процесс, пока не будет выполнено условие

$$\|\vec{Y}^{(l+1)} - \vec{Y}^{(l)}\| < \varepsilon. \quad (6)$$

Аналогичные итерационные робастные схемы используются для выделения с помощью робастных методов временных трендов при наличии аномальных выбросов в значениях показателей [4–7].

ПРИМЕНЕНИЕ РОБАСТНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ В ЗНАЧЕНИЯХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ПАЦИЕНТА

Под ИВЛ понимают перемещение воздуха между внешней средой и альвеолами под влиянием внешней силы. ИВЛ применяется только при наличии клинически значимой дыхательной недостаточности.

Аппарат ИВЛ получает информацию о значениях всех основных показателей текущего состояния пациента и показателей вентиляционного потока.

Таковыми показателями являются:

1. Максимальное давление в дыхательных путях во время вдоха;
2. Минутная вентиляция легких (л/мин);
3. Объем выдоха (мл);
4. Парциальное давление углекислого газа в дыхательных путях в конце выдоха (мм. рт. ст.);

5. Общее количество дыхательных циклов;
6. Объем вдоха (мл);
7. Количество самостоятельных вдохов;
8. Сопротивление дыхательных путей вдоху ($\text{см}^3 \text{H}_2\text{O}/\text{л}/\text{с}$);
9. Сопротивление дыхательных путей выдоху ($\text{см}^3 \text{H}_2\text{O}/\text{л}/\text{с}$);
10. Податливость легких и грудной стенки на высоте вдоха ($\text{мл}/\text{см}^3 \text{H}_2\text{O}$);
11. Индекс быстрого поверхностного дыхания (количество вдохов/объем выдоха в литрах);
12. Работа дыхания (Дж/мин);
13. Экспираторная временная константа (с);
14. Давление в дыхательных путях в период инспираторной паузы;
15. Среднее давление в дыхательных путях;
16. Давление в дыхательных путях в конце выдоха;
17. Объем самостоятельного выдоха (мл);
18. Отношение объема выдоха к индексу массы тела;

19. Минутная спонтанная вентиляция (л/мин);
20. Минутная величина утечки (л/мин);
21. Количество принудительных вдохов;
22. Податливость легких, измеренная в период инспираторной паузы ($\text{мл}/\text{см}^3 \text{H}_2\text{O}$);
23. Концентрация кислорода.

Ниже представлены результаты фильтрации аномальных выбросов для некоторых значимых вышеуказанных показателей. На всех рисунках (рис. 1–8) по оси абсцисс отложена продолжительность времени наблюдения состояния пациента в минутах.

На рис. 1 представлены исходные фиксируемые значения во времени показателя «Максимальное давление в дыхательных путях во время вдоха» ($P_{\text{пик}}$).

На рис. 2 – отфильтрованные значения во времени показателя «Максимальное давление в дыхательных путях во время вдоха» ($P_{\text{пик}}$), представленные на рис. 1.

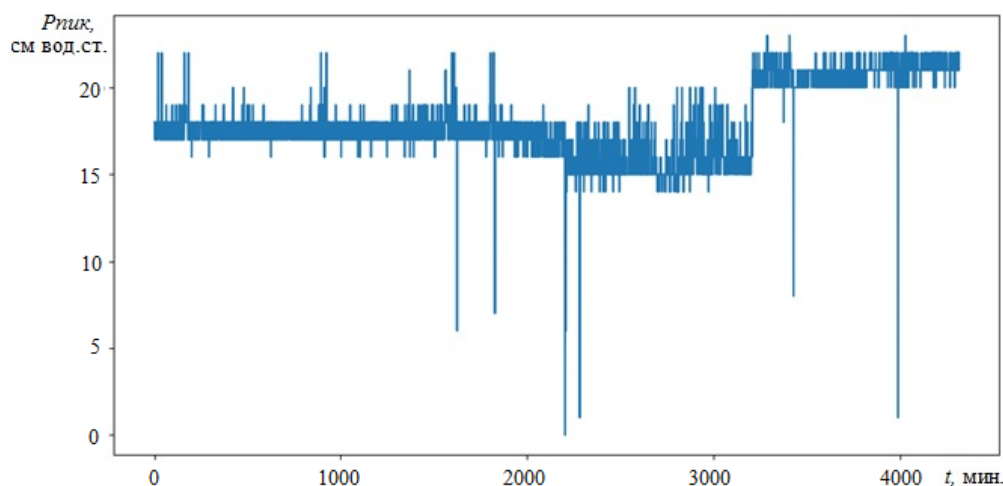


Рис. 1. Показатель «Максимальное давление в дыхательных путях во время вдоха» ($P_{\text{пик}}$)

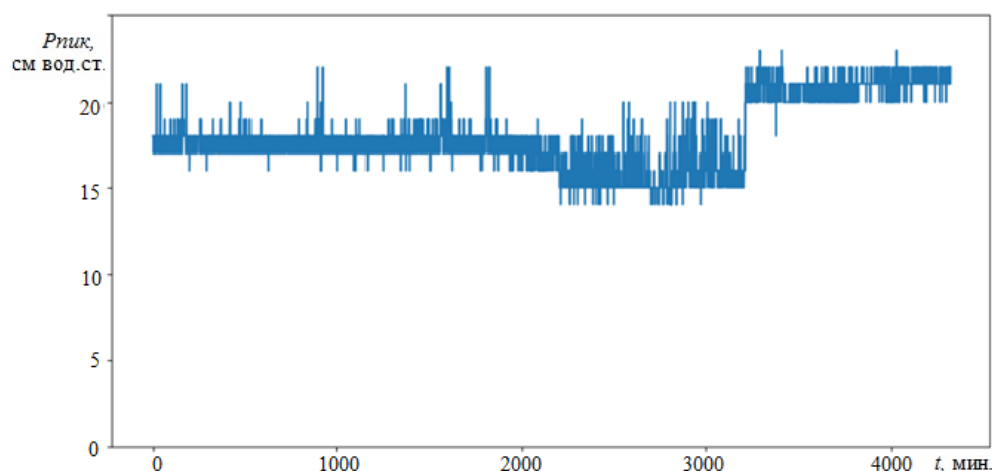


Рис. 2. Показатель « $P_{\text{пик}}$ » после фильтрации аномальных выбросов

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ
В ЗНАЧЕНИЯХ ТЕКУЩИХ ПОКАЗАНИЙ ПАЦИЕНТА ПРИ ИСКУССТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ЛЕГКИХ

На рис. 3 представлены исходные фиксируемые значения во времени показателя «Объем выдоха» (TVe).

На рис. 4 – отфильтрованные значения во времени показателя «Объем выдоха» TVe , (мл), представленные на рис. 3.

На рис. 5 представлены исходные фиксируемые значения во времени показателя «Объем вдоха» TVi , мл.

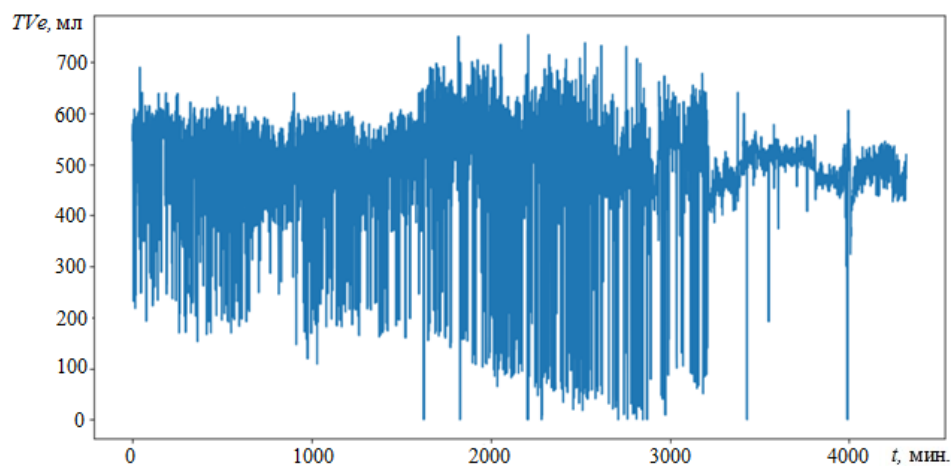


Рис. 3. Показатель «Объем выдоха» (TVe)

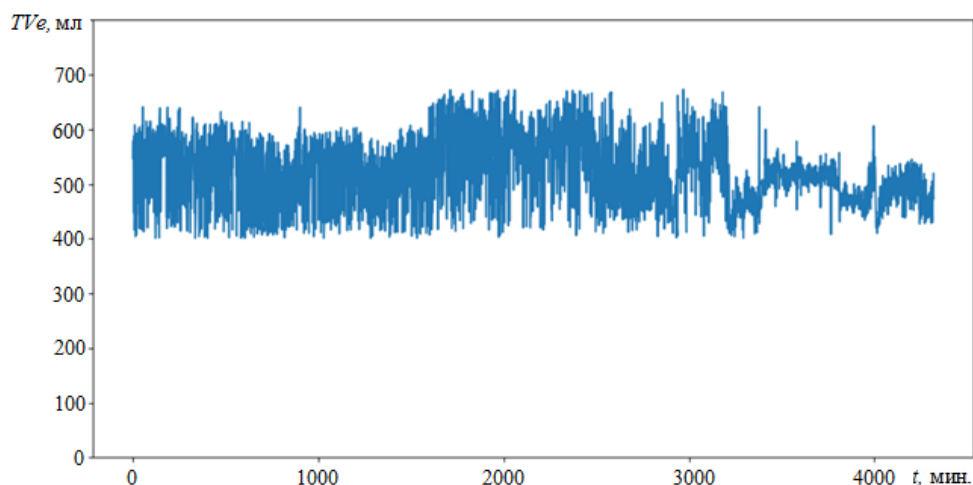


Рис. 4. Показатель TVe после фильтрации аномальных выбросов

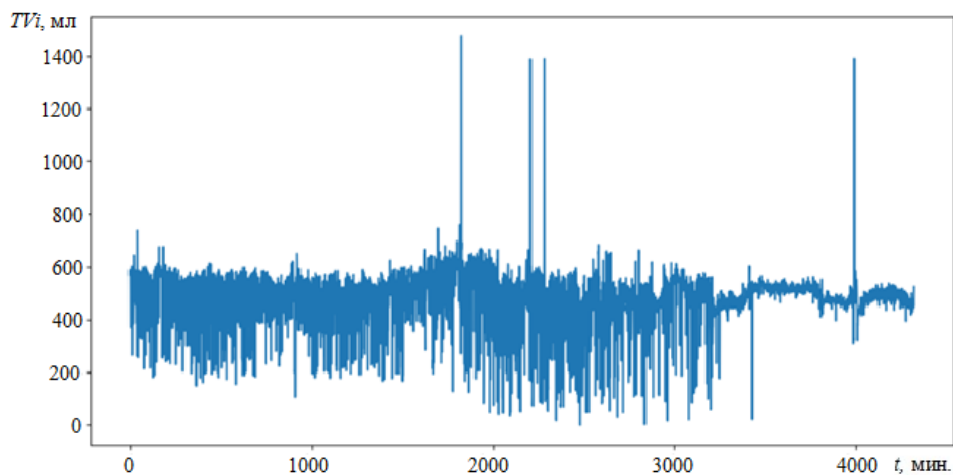


Рис. 5. Показатель «Объем вдоха» (TVi)

На рис. 6 – отфильтрованные значения во времени показателя «Объем вдоха» TVi , представленные на рис. 5.

На рис. 7 представлены исходные фиксируемые значения во времени показателя «Общее количество дыхательных циклов» ($f_{\text{общ}}$) в минуту.

На рис. 8 – отфильтрованные значения во времени показателя «Общее количество дыха-

тельных циклов» ($f_{\text{общ}}$), представленные на рис. 7.

Представленные на рис. 2, 4, 6, 8 отфильтрованные значения динамики показателей пациента демонстрируют эффективность используемой вычислительной схемы фильтрации аномальных выбросов для этих показателей.

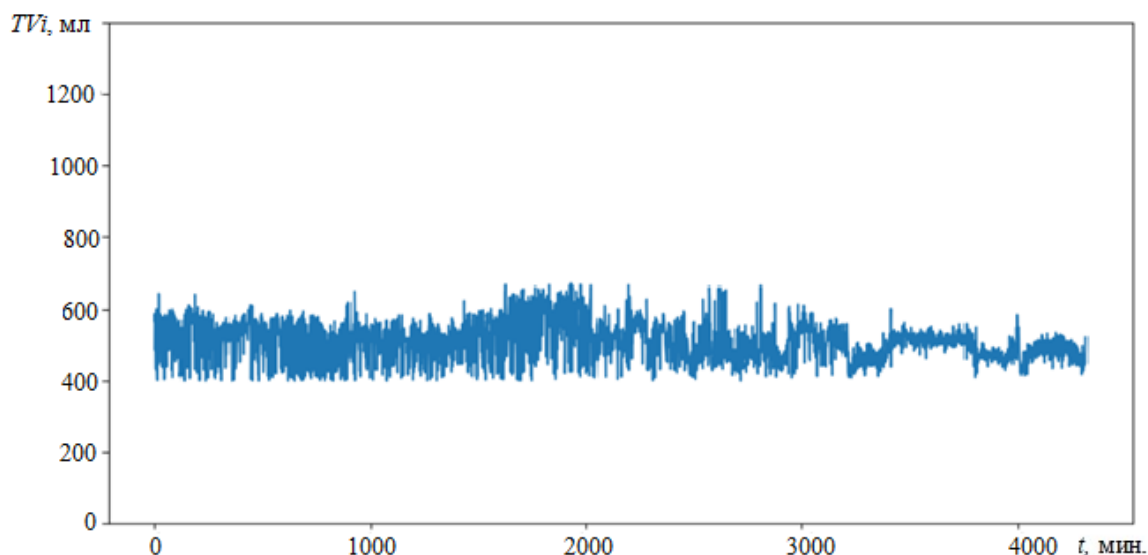


Рис. 6. Показатель TVi после фильтрации аномальных выбросов

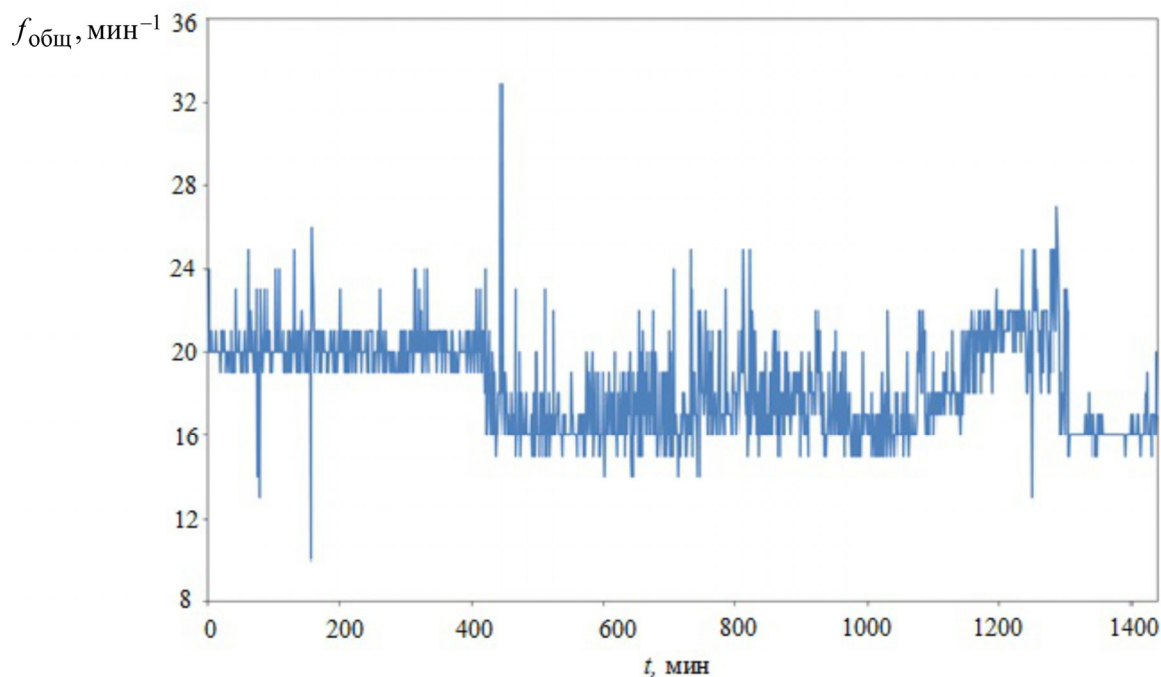


Рис. 7. Показатель «Общее количество дыхательных циклов» ($f_{\text{общ}}$)

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ В ЗНАЧЕНИЯХ ТЕКУЩИХ ПОКАЗАНИЙ ПАЦИЕНТА ПРИ ИСКУССТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ЛЕГКИХ

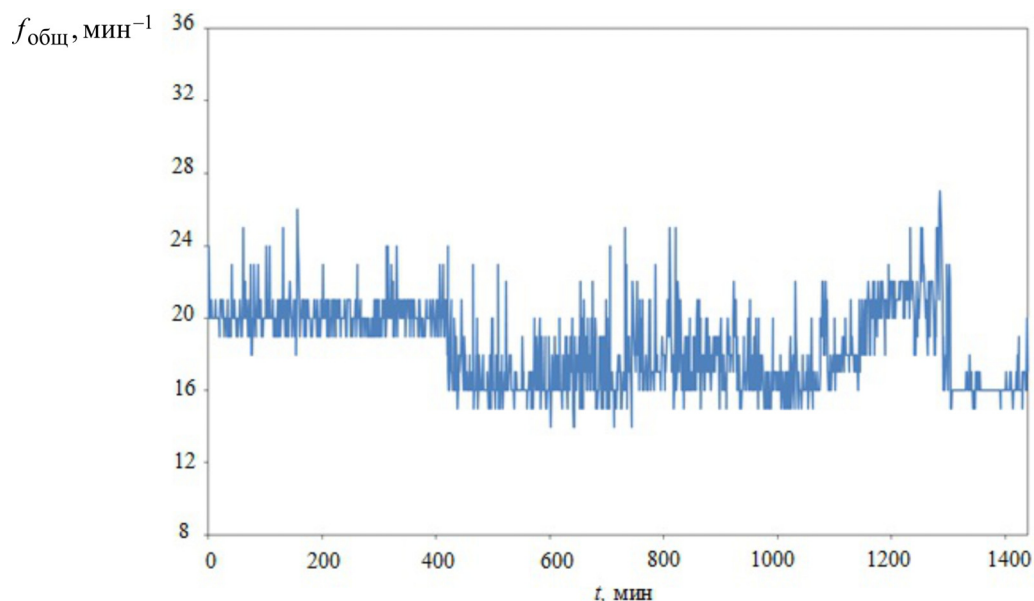


Рис. 8. Показатель $f_{\text{общ}}$ после фильтрации аномальных выбросов

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Методы и алгоритмы метрического анализа и робастные методы выявления аномальных выбросов и устойчивых трендов, разработанные в НИЯУ МИФИ, позволяют, на основе сформированной в создаваемом комплексе базы данных клинического опыта лечения пациентов на аппаратах ИВЛ, устанавливать зависимость между совокупностью значений показателей текущего состояния пациента и оптимальными значениями регулируемых параметров вентиляционного потока аппарата ИВЛ и прогнозировать будущее состояние пациента.

Авторы выражают благодарность доктору медицинских наук, профессору, декану медицинского факультета Обнинского филиала МИФИ Котлярову Андрею Александровичу и доктору медицинских наук, профессору Тимербаеву Владимиру Хамидовичу за предоставленные данные значений показателей пациентов, находящихся на лечении с применением аппаратов ИВЛ, и за консультации, касающиеся медицинских сторон процессов их лечения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект государственного задания № FSWU-2023-0031).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананьев Е.П., Полупан А.А., Мацковский И.В. и др. Использование режима IntelliVent-ASV для поддержания целевого диапазона EtCO₂ у пациентов с тяжелой ЧМТ // Журнал «Вопросы нейрохирургии» имени Н.Н. Бурденко. 2017. Т. 81 (5). С. 63–68.
2. Artificial intelligence and machine learning show promise in cancer diagnosis and treatment // Medical Xpress. [Электронный ресурс]. URL: <https://medicalxpress.com/news/2022-03-artificial-intelligence-machine-cancer-diagnosis.html> (дата обращения 20.12.2023).
3. Ивахно Н.В., Минаков Е.И., Федоров С.С., Анцибор С.В. Математическое моделирование процессов в биотехническом комплексе «Аппаратура корректирующего воздействия – дыхательная система человека» // Вестник новых медицинских технологий (электронное издание), 2015. № 4.
4. Крянев А.В., Лукин Г.В., Удумын Д.К. Метрический анализ и обработка данных. М.: Физматлит, 2012. 308 с.
5. Kryanev A.V., Udumyan D.K. Metric analysis, properties and applications as a tool for interpolation // International Journal of Mathematical Analysis, 2014. V. 8. № 45. Pp. 2221–2228.
6. Kryanev A.V., Udumyan D. K. Metric Analysis, Properties and Applications as a Tool for Forecasting // International Journal of Mathematical Analysis, 2014. V. 8. № 60. Pp. 2971–2978.
7. Ivanov V.V., Kryanev A.V., Udumyan D.K., Lukin G.V. Metric Analysis Approach for Interpolation and Forecasting of Time Processes. Applied Mathematical Sciences, 2014. V. 8. № 22. Pp. 1053–1060.
8. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ. М.: Мир, 1980. 456 с.

COMPUTING SCHEMES FOR DETECTING ANOMALIC EMISSIONS IN THE VALUES OF CURRENT PATIENT INDICATIONS DURING ARTIFICIAL VENTILATION

S.G. Klimanov¹, A.V. Kryanov^{1,2*}, V.A. Trikozova¹, D.D. Tsareva¹

¹National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, 115409, Russia,

²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980, Russia,

**e-mail: AVKryanov@mephi.ru*

Received February 10, 2024; revised February 18, 2024; accepted February 20, 2024

Artificial pulmonary ventilation (ALV) is considered one of the most important methods of intensive care, part of a set of measures to maintain the vital functions of the body in critical conditions. In connection with the creation of intelligent ventilation modes that increase the efficiency of control of ventilators, it is necessary to develop and apply various computational schemes for processing data on the values of the patient's current indicators during mechanical ventilation. The paper discusses the problem of identifying abnormal emissions and leveling their negative impact on the identified significant characteristics of the calculated indicators necessary for adopting optimal values of ventilation flow parameters that ensure the most effective treatment of the patient. To solve this problem, the article discusses and applies several so-called robust methods and computational schemes based on them for identifying anomalous outliers in the values of indicators of the patient's condition and determining their future values.

Keywords: abnormal emissions, detection of abnormal emissions, robust methods, artificial ventilation, patient indications.

REFERENCES

1. *Ananyev E.P., Polupan A.A., Matskovsky I.V., et al.* Using the IntelliVent-ASV mode to maintain the target EtCO₂ range in patients with severe TBI. *Journal of Neurosurgery named after N.N. Burdenko*, 2017. Vol. 81(5). Pp. 63–68 (in Russian).
2. Artificial intelligence and machine learning show promise in cancer diagnosis and treatment // *Medical Xpress*. Available at: <https://medicalxpress.com/news/2022-03-artificial-intelligence-machine-cancer-diagnosis.html> (accessed 20.12.2023).
3. *Ivakhno N.V., Minakov E.I., Fedorov S.S., Antsi-bor S.V.* Matematicheskoe modelirovanie processov v biotekhnicheskom komplekse «Apparatura korrek-tiruyushchego vozdeystviya – dyhatel'naya sistema che-loveka» [Mathematical modeling of processes in the biotechnical complex «Corrective influence equipment – human respiratory system»]. *Vestnik novykh medicinskih tekhnologij (elektronnnoe izdanie)*, 2015. No. 4 (in Russian).
4. *Kryanov A.V., Lukin G.V., Udumyan D.K.* Metric analysis and data processing. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012. 308 p.
5. *Kryanov A.V., Udumyan D.K.* Metric analysis, properties and applications as a tool for interpolation. *International Journal of Mathematical Analysis*, 2014. Vol. 8. No. 45. Pp. 2221–2228.
6. *Kryanov A.V., Udumyan D. K.* Metric Analysis, Properties and Applications as a Tool for Forecasting. *International Journal of Mathematical Analysis*, 2014. Vol. 8. No. 60. Pp. 2971–2978.
7. *Ivanov V.V., Kryanov A.V., Udumyan D.K., Lukin G.V.* Metric Analysis Approach for Interpolation and Forecasting of Time Processes. *Applied Mathematical Sciences*, 2014. Vol. 8. No. 22. Pp. 1053–1060.
8. *Seber J.* Linejnyj regressionnyj analiz [Linear regression analysis]. Moscow, Mir Publ., 1980. 456 p.