

УДК 004.896
DOI: 10.18799/29495407/2023/4/40

Оптимизация работы компрессорной установки с применением технологий искусственного интеллекта

А.Е. Власов^{1✉}, Л.В. Лазарева²

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Россия, г. Москва

² ООО «Автоматика-сервис», Россия, 109429, г. Москва

✉ a.alexander.vlasov@yandex.ru

Аннотация. В работе была рассмотрена возможность использования нейронных сетей и алгоритмов машинного обучения для оптимизации расхода топливного газа компрессорной установкой. Были исследованы зависимости предложенных данных с автоматизированной системы управления технологическим процессом компрессорной станции и их влияние на расход агрегатом топливного газа. Примененные методы корреляционного анализа и изучение технологического процесса перекачки газа позволили выделить 18 признаков, имеющих наибольшее влияние на целевой параметр, которые далее были использованы для построения имитационной модели – нейронной сети, позволяющей по входным данным предсказывать расход топливного газа. На основе модели был построен оптимизатор с применением градиентного спуска, который при установленных ограничениях входных данных находит оптимальные параметры работы компрессорной установки в заданных диапазонах, минимизирующих расход топливного газа. Разработанный алгоритм позволяет снизить расход газа единичного агрегата на 2 %.

Ключевые слова: нейронные сети, алгоритмы машинного обучения, оптимизация работы, компрессорная установка

Для цитирования: Власов А.Е., Лазарева Л.В. Оптимизация работы компрессорной установки с применением технологий искусственного интеллекта // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2023. – Т. 1 – № 4. – С. 28–33. DOI: 10.18799/29495407/2023/4/40

UDC 004.896
DOI: 10.18799/29495407/2023/4/40

Optimization of compressor unit operation using artificial intelligence technologies

A.E. Vlasov^{1✉}, L.V. Lazareva²

¹ National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russian Federation

² Avtomatika-service LLC, Moscow, Russian Federation

✉ a.alexander.vlasov@yandex.ru

Abstract. The work examined the possibility of using neural networks and machine learning algorithms to optimize fuel gas consumption by a compressor unit. The authors have studied the dependences of the proposed data from the automated process control system of the compressor station and their impact on fuel gas consumption of the unit. The applied methods of correlation analysis and the study of the technological process of gas pumping made it possible to identify 18 features that have the greatest impact on the target parameter. These features were then used to build a simulation model – a neural network, which allows predicting fuel gas consumption based on input data. Based on the model, an optimizer was built using gradient descent, which, under established input data restrictions, finds the optimal operating parameters of the compressor unit in specified ranges that minimize fuel gas consumption. The developed algorithm allows reducing the gas consumption of a single unit by 2 %.

Keywords: neural networks, machine learning algorithms, operation optimization, compressor installation

For citation: Vlasov A.E., Lazareva L.V. Optimization of compressor unit operation using artificial intelligence technologies. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics*, 2023, vol. 1, no. 4, pp. 28–33. DOI: 10.18799/29495407/2023/4/40

Введение

Компрессорная установка – устройство, повышающее давление газа при прохождении через него. Упрощенная схема её устройства представлена на рис. 1. Такая установка, как правило, состоит из нескольких ступеней повышения давления. В нашем случае этих ступеней две.

На входе в установку газ проходит через компрессор низкого давления (КНД) – 2, после чего подается на компрессор высокого давления (КВД) – 4 и на выход установки. Каждый из компрессоров имеет собственный коэффициент повышения давления, отображающий, в какое количество раз увеличивается давление, проходя через агрегат. Коэффициент можно регулировать двумя способами:

- изменением угла открытия клапанов – 1.1 и 2.1, возвращающих часть газа на прошлую ступень и снижающих за счет этого коэффициент повышения давления;
- изменением скорости вращения вала компрессоров.

Первый способ позволяет регулировать каждый компрессор отдельно, второй влияет на оба одновременно. Это вызвано соединением валов компрессоров низкого давления и высокого давления через редуктор – 3. Всю установку в движение приводит газотурбинная установка (ГТУ) – 1, скорость вращения ротора которой прямо влияет на скорость вращения компрессоров. Частота вращения ГТУ

зависит от расхода топливного газа и нескольких других внешних параметров. Основным топливно-энергетическим ресурсом, расходуемым ГТУ, является газ.

Парки компрессорных установок чаще всего используются на газопроводах для перекачки газа на большие расстояния или в хранилищах газа с целью поддержания давления, загрузки и разгрузки ресурса. Оптимизация работы будет рассмотрена на примере установки для перекачки газа, однако алгоритм применим и для второго типа компрессорных станций.

Целью работы является создание программного обеспечения для оптимизации работы компрессорной установки, которое поможет снизить затраты энергоресурсов на обеспечение её работы, так как делать это вручную с сохранением достаточного уровня надежности невозможно [1].

Описание алгоритма работы

Начальным этапом работы являлся первичный анализ имеющихся данных – показаний автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП) с различных узлов учета компрессорной установки. Предоставленные компанией данные представляют собой временные ряды показателей, получаемых каждую минуту с контрольно-измерительных приборов (КИП). На рис. 2 представлен график целевой переменной – расхода топливного газа.

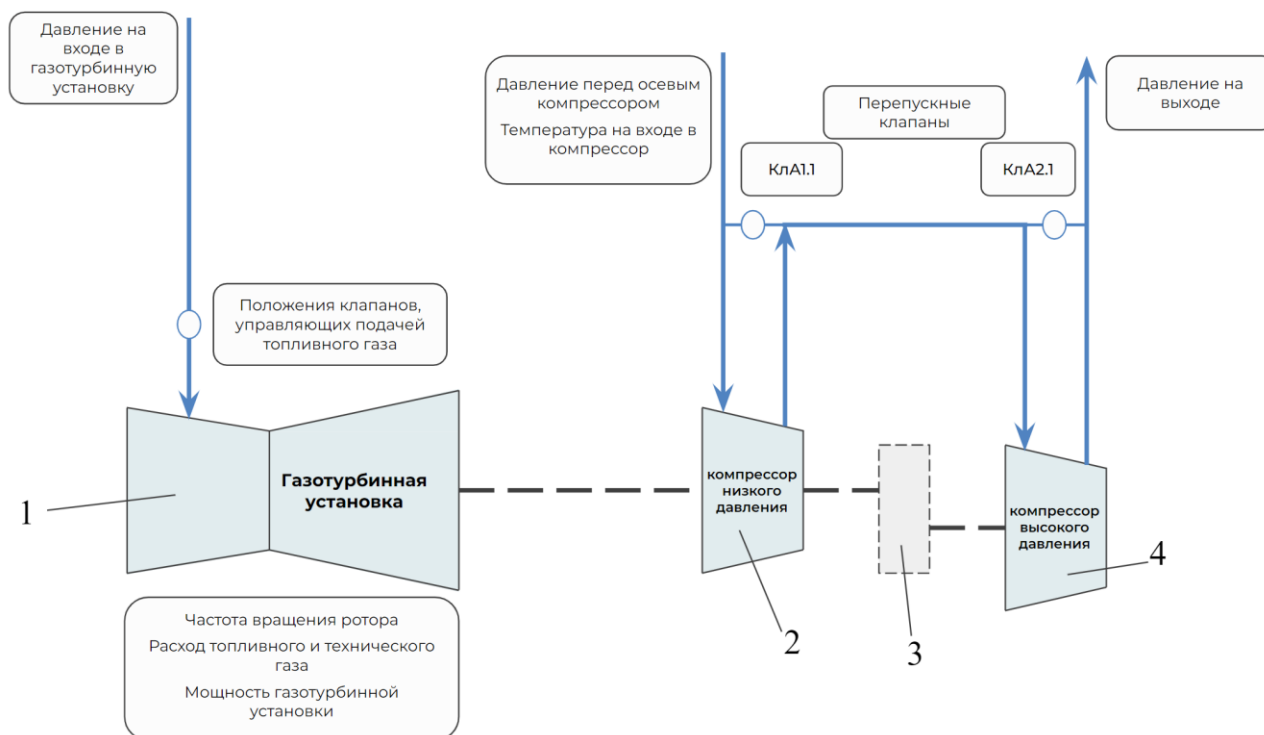


Рис. 1. Упрощенная схема компрессорной установки

Fig. 1. Simplified diagram of a compressor installation

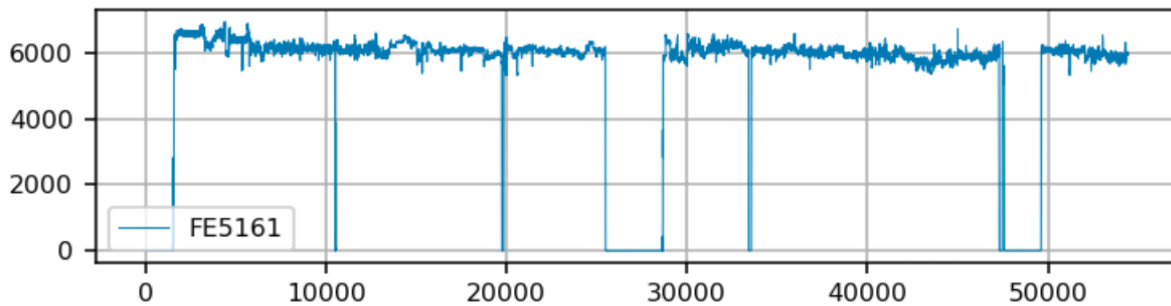


Рис. 2. График расхода топливного газа
Fig. 2. Fuel gas consumption graph

На графике видно, что в имеющихся данных есть аномалии – значения расхода 0. В ходе подготовки данных было принято решение не удалять подобные аномалии, поскольку они также характеризуют технологический процесс работы газоперекачивающих агрегатов (ГПА), и остальные временные ряды имеют схожие значения в этих промежутках, соответственно, это отдельные режимы работы установки. Однако стоит отметить, что именно заметное влияние переменного режима работы на КПД ГТУ приводит к повышенному расходу газа на нужды компрессорной станции [2].

Подход, который может дать результаты при работе с данными АСУТП, – корреляционный анализ: проводится расчет коэффициента корреляции одним из методов – Пирсона, Кендалла либо Спирмена [3].

$$K_{\text{кор}} = \frac{\sum(x - \bar{x}) \times (y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \times \sum(y - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

где x – значение признака; y – значение целевой переменной; $\bar{x}$ – среднее арифметическое значение признака; $\bar{y}$ – среднее арифметическое значение признака.

В работе был использован расчет корреляции с помощью коэффициента Пирсона, рассчитанному (1), основываясь на предположении, что наибольшее влияние на расход топливного газа должны иметь признаки, имеющие линейную связь с целевой переменной. В результате данного этапа работы из 128 признаков было выделено 56, имеющих коэффициент корреляции с целевой переменной более 0,6.

Для исключения из списка возможных предикторов признаков, имеющих сильную корреляцию друг с другом, в ходе расчета коэффициента мультиколлинеарности было удалено ещё 16 признаков. Это было сделано, чтобы избежать ошибок при построении модели.

Проведенный корреляционный анализ был далее подтвержден анализом технологического процесса, кратко описанного выше, а также из 40 при-

знаков были выделены 18 признаков для построения модели, среди которых есть давление на выходе ГТУ, положение входного направляющего агрегата, температура на входе компрессора. Места расположения съёма данных также представлены на рис. 1.

Второй этап – построение модели компрессорной установки, которая будет на основе входящих параметров предсказывать расход топливного газа. Для этого были рассмотрены 4 основных варианта:

- линейная регрессия;
- нейронная сеть;
- бустинг;
- случайный лес.

Для дальнейшей работы была выбрана нейронная сеть, поскольку именно эта архитектура может наиболее точно выявить линейные и нелинейные связи параметров с целевой переменной [4]. На основе изученных материалов была выбрана архитектура нейронной сети, состоящая из нескольких полносвязных слоев и функции активации ReLU [5]. Для построения модели была использована библиотека PyTorch [6].

Архитектура модели представлена на рис. 3.

В результате получилась модель компрессорной установки, цифровой двойник, который на основе изменяющихся входных параметров может предсказывать потребление газа со средней погрешностью 0,03 %. На рис. 4 представлено сравнение работы модели с датчиком расхода топливного газа.

Следующим этапом работы является оптимизация построенной модели. Для этого нам необходимо выделить среди всех предикторов только те, на которые мы можем непосредственно влиять, не нарушая нормального режима работы оборудования, а также выявить пределы их регулирования. Этими предикторами и их пределами регулирования являются:

- клапаны 1.1 и 2.1 – 60–100 % поворота;
- скорость вращения ротора ГТУ – 5600–6000 об/мин.

Целевым параметром оптимизации был выбран расход топливного газа. Целевые значения – 5600–6000 м³/ч.

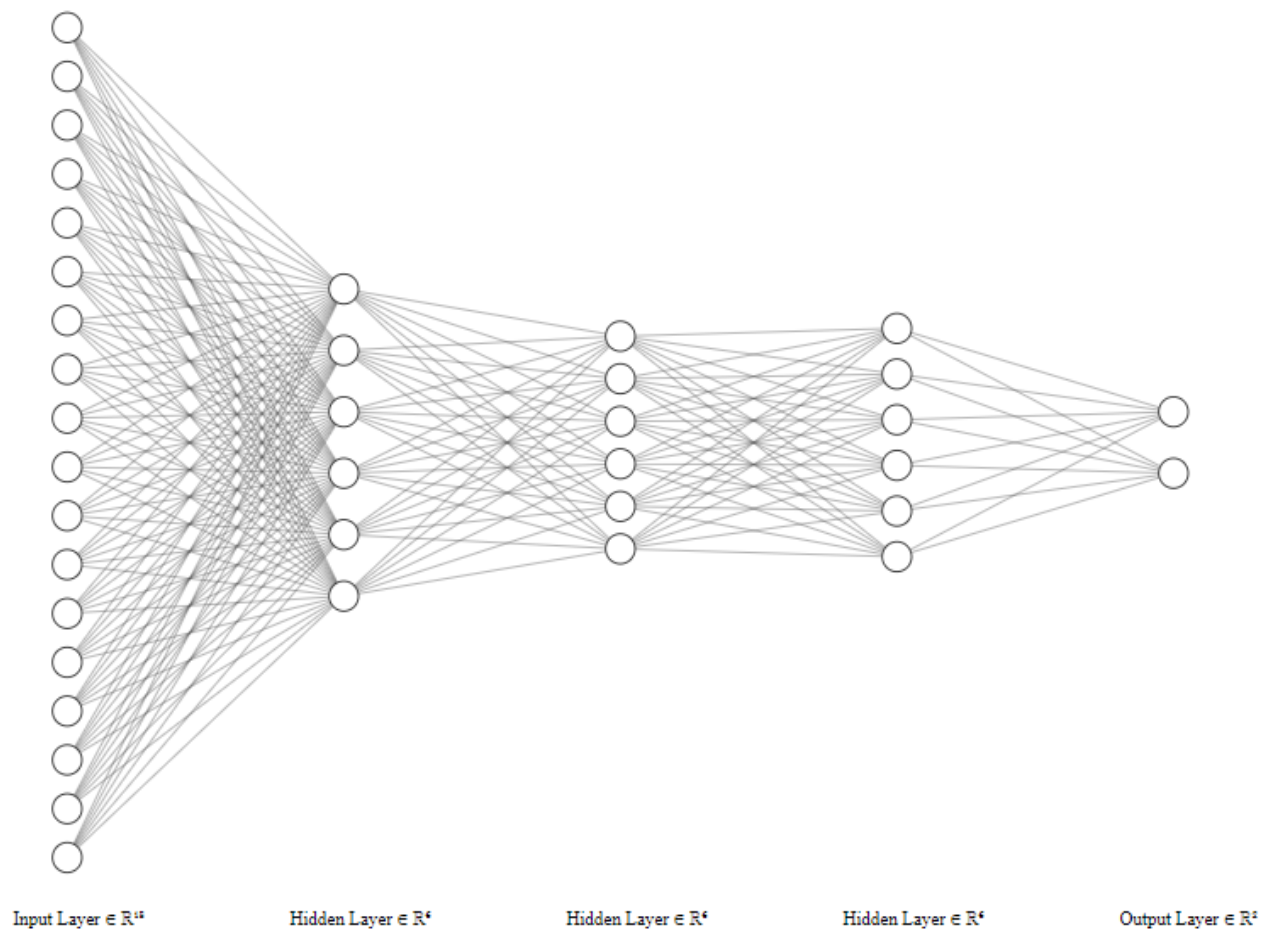


Рис. 3. Архитектура нейронной сети
Fig. 3. Neural network architecture



Рис. 4. Модель компрессорной установки: черный – исходные данные; синий – показания модели
Fig. 4. Compressor unit model: black – initial data; blue – model readings

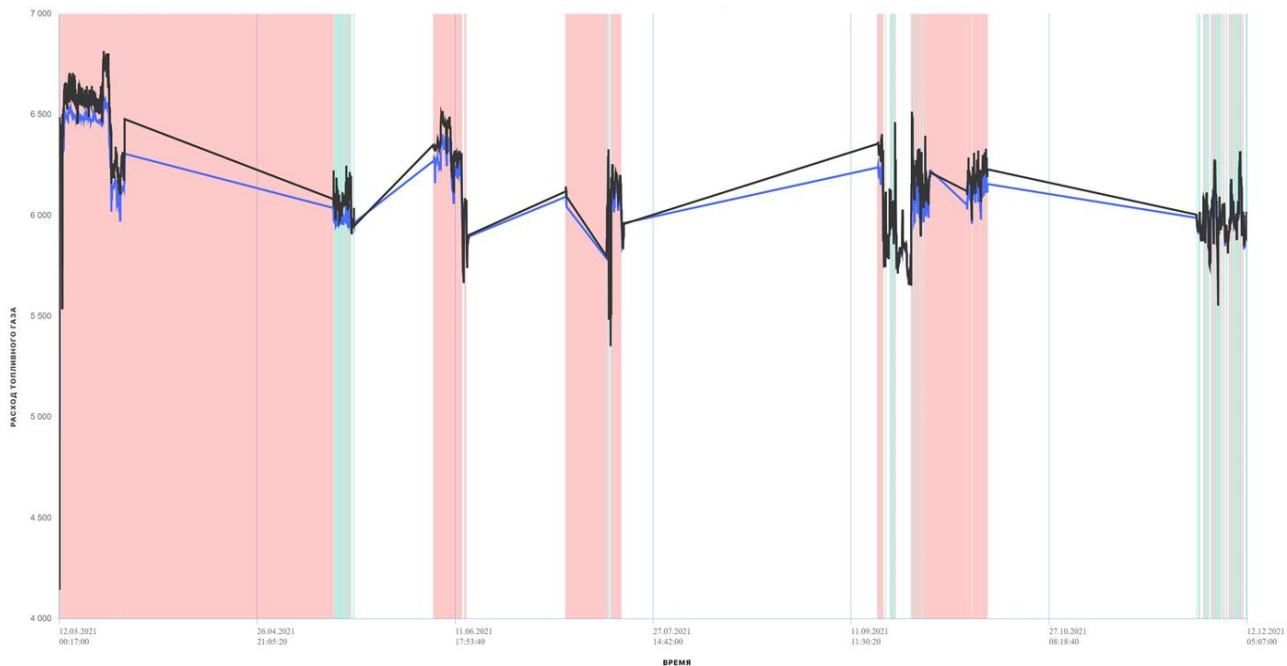


Рис. 5. Результат работы оптимизатора

Fig. 5. Result of the optimizer operation

Для оптимизации был выбран алгоритм градиентного спуска, который часто применяется в задачах поиска минимума функции (рис. 5) [7].

Зеленым выделены интервалы, в рамках которых оптимизатор смог достичь целевых значений, красным – интервалы, где снижение расхода не позволило достичь целевых значений. Невозможность достижения оптимальных режимов работы обусловлена минимальной необходимой производительностью установки, влиять на которую можно только с целью снижения количества перекачиваемого газа.

Таким образом, оптимизация работы компрессорной установки позволяет экономить более 2 %

топливного газа, что можно считать хорошим результатом. В масштабах парка компрессоров такой результат позволит значительно сократить затраты на работу всех установок [8].

Заключение

В результате работы была создана имитационная модель компрессорной установки, на основе которой был построен алгоритм для оптимизации расхода топлива. Сокращение потребления газа для работы установки составило более 2 %, что является хорошим результатом работы. Планируется подача проекта на грант УМНИК для дальнейшего развития и проработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техническая эксплуатация газотурбинных компрессорных станций на магистральных газопроводах / В.Г. Дубинский, Б.Л. Житомирский, А.С. Лопатин, В.А. Михалеяко. – М.: Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) И.М. Губкина, 2019. – 78 с.
2. Бердник А.Н. Компрессорные станции магистральных газопроводов. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2019. – 48 с.
3. Пичуев А.В., Карпенко С.М., Садридинов А.Б. Энергоемкость технологических процессов. – М.: ИД НИТУ «МИСиС», 2020. – 14 с.
4. Фарухшина Р.Р. Обеспечение энергетической эффективности работы компрессорных станций с газотурбинным приводом при эксплуатации и реконструкции: дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2018. – 98 с.
5. Байков И.Р., Китаев С.В., Шаммазов И.А. Применение нейронных сетей для прогнозирования добычи углеводородного сырья // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2005. – № 3. – С. 60–64.
6. Антига Л., Виман Т., Стивенс Э. PyTorch. Освещая глубокое обучение. – СПб.: Питер, 2022. – 576 с.
7. Байков И.Р., Китаев С.В., Шаммазов И.А. Методы повышения энергетической эффективности трубопроводного транспорта природного газа. – СПб.: Недра, 2008. – 440 с.
8. Калинин А.Ф., Коновалов А.А. Оценка эффективности работы компрессорного цеха // Транспортировка нефти и газа. – 2011. – № 12. – С. 86–87.

Информация об авторах

Власов Александр Евгеньевич, студент Горного института Национального исследовательского технологического университета «МИСИС», Россия, 119049, г. Москва, Ленинский пр., 4, стр. 1. a.alexander.vlasov@yandex.ru

Лазарева Любовь Владимировна, инженер ООО «Автоматика-сервис», Россия, 109429, г. Москва, Капотня, 38, стр. 1. bereshka@list.ru

Поступила в редакцию: 21.11.2023

Поступила после рецензирования: 20.12.2023

Принята к публикации: 30.12.2023

REFERENCES

1. Dubinsky V.G., Zhitomirsky B.L., Lopatin A.S., Mikhaleyko V.A. *Technical operation of gas turbine compressor stations on main gas pipelines*. Moscow, Russian State University of Oil and Gas (NRU) I.M. Gubkin Publ., 2019. 78 p. (In Russ.)
2. Berdnik A.N. *Compressor stations of main gas pipelines*. Khabarovsk, Pacific State University Publ. House, 2019. 48 p. (In Russ.)
3. Pichuev A.V., Karpenko S.M., Sadridinov A.B. *Energy intensity of technological processes*. Moscow, NUST MISIS Publ. house, 2020. 14 p. (In Russ.)
4. Farukhshina R.R. *Ensuring the energy efficiency of compressor stations with gas turbine drives during operation and reconstruction*. Cand. Dis. Ufa, 2018. 98 p. (In Russ.)
5. Baykov I.R., Kitaev S.V., Shammazov I.A. Application of neural networks for forecasting hydrocarbon production. *News of higher educational institutions. Oil and gas*, 2005, no. 3, pp. 60–64. (In Russ.)
6. Antiga L., Wiman Th., Stevens A. *PyTorch. Covering deep learning*. St. Petersburg, Piter Publ., 2022. 576 p. (In Russ.)
7. Baykov I.R., Kitaev S.V., Shammazov I.A. *Methods for increasing the energy efficiency of pipeline transport of natural gas*. St. Petersburg, Nedra Publ., 2008. 440 p. (In Russ.)
8. Kalinin A.F., Konovalov A.A. Assessing the efficiency of the compressor shop. *Transportation of oil and gas*, 2011, no. 12, pp. 86–87. (In Russ.)

Information about the authors

Alexander E. Vlasov, Student, National University of Science and Technology «MISIS», 4, bld. 1, Leninsky avenue, Moscow, 119049, Russian Federation. a.alexander.vlasov@yandex.ru

Lyubov V. Lazareva, Engineer, Avtomatika-service LLC, 38, bld. 1, Kapotnya, Moscow, 109429, Russian Federation. bereshka@list.ru

Received: 21.11.2023

Revised: 20.12.2023

Accepted: 30.12.2023