

О точности полиномиальных моделей погружных электродвигателей в составе АСУТП

В.З. Ковалев, Е.А. Годовников, Э.И. Хусаинов, О.В. Архипова,

Е.В. Армян, И.А. Ахмедов

Югорский государственный университет

Аннотация: Характеристики погружного асинхронного электродвигателя, с достаточной для практики достоверностью, описываются теорией многодвигательного электропривода. В этом случае классическая схема замещения погружного асинхронного электродвигателя представляет собой связанную систему из нескольких Т-образных схем замещения. В свою очередь это значительно увеличивает ее вычислительную сложность и снижает быстродействие АСУТП. Предлагается с помощью методов планирования эксперимента построить математическую модель погружного электродвигателя в виде полиномов с существенно большим быстродействием. В области применимости, расхождения в оценке энергетических показателей не превышают 1,1%, между предложенными моделями и классическими Т-образными схемами замещения.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, математическая модель, полином, средняя абсолютная процентная ошибка, вычислительная сложность, методы планирования эксперимента, диаграмма рассеяния, модальный интервал, погружной электродвигатель, пакет ротора.

В автоматизированных системах управления технологическими процессами (АСУТП) используются математические модели объекта управления. Вычислительная сложность данных моделей оказывает влияние на быстродействие АСУТП в целом.

Например, при управлении режимом работы погружного асинхронного электродвигателя [1-3] применяется классическая модель – Т-образная схема замещения [4-6]. Для более точной оценки энергетических показателей ПЭД, необходимых для формирования управляющего воздействия, ПЭД следует рассматривать как многодвигательный электропривод, состоящий из элементарных электрических машин (ЭЭМ) [7, 8] количество которых соответствует количеству пакетов ротора на валу ПЭД. В таком случае, схема замещения ПЭД представляет собой совокупность последовательно соединенных Т-образных схем замещения ЭЭМ. При этом, оценка энергетических показателей по данной модели потребует проведения

большого количества математических операций, что в совокупности с представлением ПЭД в виде многодвигательного электропривода значительно увеличивает вычислительную сложность и время необходимое для формирования управляющего воздействия. Данное обстоятельство может накладывать ограничение на использование классической модели, при решении задач оперативного управления режимом работы ПЭД.

Для решения данной проблемы, с помощью методов планирования эксперимента [9, 10], построена математическая модель ПЭД в виде полиномов, которые содержат меньшее количество математических операций. Математическая модель связывает энергетические показатели ПЭД с величиной активного (R_n) и индуктивного (X_n) сопротивлений пакетов ротора, на примере ПЭД содержащего 4 пакета ротора:

1) результирующий электромагнитный момент ПЭД – M_{em} :

$$M_{em} = 54,9 - 1,2 \cdot x_1 - 1,2 \cdot x_3 - 1,2 \cdot x_5 - 1,2 \cdot x_7 + 0,05 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,05 \cdot x_1 \cdot x_5 + 0,05 \cdot x_1 \cdot x_7 + 0,05 \cdot x_3 \cdot x_5 + 0,05 \cdot x_3 \cdot x_7 + 0,05 \cdot x_5 \cdot x_7. \quad (1)$$

2) коэффициент полезного действия ПЭД – η :

$$\eta = 0,864 - 3,9 \cdot 10^{-4} \cdot x_1 - 6,5 \cdot 10^{-5} \cdot x_2 - 3,9 \cdot 10^{-4} \cdot x_3 - 6,5 \cdot 10^{-5} \cdot x_4 - 3,9 \cdot 10^{-4} \cdot x_5 - 6,5 \cdot 10^{-5} \cdot x_6 - 3,9 \cdot 10^{-4} \cdot x_7 - 6,5 \cdot 10^{-5} \cdot x_8. \quad (2)$$

3) коэффициент мощности ПЭД – $\cos\varphi$:

$$\begin{aligned} \cos\varphi = & 8,5 \cdot 10^{-1} - 3,0 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 - 6,6 \cdot 10^{-4} \cdot x_2 - 3,0 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 - \\ & - 6,6 \cdot 10^{-4} \cdot x_2 - 3,0 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 - 6,6 \cdot 10^{-4} \cdot x_2 - 3,0 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 - \\ & - 6,6 \cdot 10^{-4} \cdot x_2 + 8,7 \cdot 10^{-5} \cdot x_1 \cdot x_3 + 8,7 \cdot 10^{-5} \cdot x_1 \cdot x_3 + \\ & + 8,7 \cdot 10^{-5} \cdot x_1 \cdot x_3 + 8,7 \cdot 10^{-5} \cdot x_1 \cdot x_3 + 8,7 \cdot 10^{-5} \cdot x_1 \cdot x_3 + \\ & + 8,7 \cdot 10^{-5} \cdot x_1 \cdot x_3 - 2,6 \cdot 10^{-4} \cdot x_1^2 - 2,6 \cdot 10^{-4} \cdot x_3^2 - \\ & - 2,6 \cdot 10^{-4} \cdot x_5^2 - 2,6 \cdot 10^{-4} \cdot x_7^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Отметим, что при построении представленных полиномов область планирования эксперимента определена на основании данных испытания генеральной совокупности пакетов ротора ПЭД 117 габарита в количестве 271 штуки, представленных на диаграмме рассеяния (рис.1) [11].

Таблица № 1

Расшифровка обозначений в полиномах.

	ЭЭМ ₁		ЭЭМ ₂		ЭЭМ ₃		ЭЭМ ₄	
Параметр	Rn_1	Xn_1	Rn_2	Xn_2	Rn_3	Xn_3	Rn_4	Xn_4
Фактор	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8

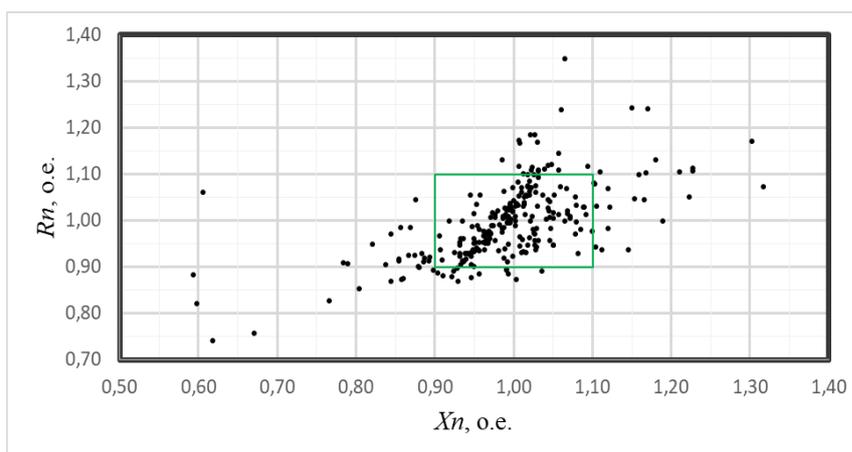


Рис. 1. – Диаграмма рассеяния сопротивлений пакетов ротора.

По диаграмме рассеяния, величина отклонения сопротивлений пакетов ротора превышает 0,3 о.е. (30 %). В качестве области планирования эксперимента принят модальный интервал, составляющий $\pm 0,1$ о.е. – область, в которой содержится наибольшее количество пакетов ротора (68 %) с отклонениями по величине активного (Rn) и индуктивного (Xn) сопротивлений пакетов ротора не более 10 % от среднего.

Учитывая соотношения коэффициентов при Rn и Xn в моделях (1)-(3), для проверки качества моделирования исследуем влияние варьирования величины активного сопротивления Rn с шагом в 1 % от среднего значения из генеральной совокупности и рассчитаем среднюю абсолютную процентную ошибку (МАРЕ) относительно классической модели ПЭД:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100\%. \quad (4)$$

Далее, на рисунках 2-4 приведены построенные в соответствии с (4) графики зависимости $МАРЕ(\eta)$, $МАРЕ(M_{em})$ и $МАРЕ(\cos\varphi)$ от величины отклонения активного сопротивления, в сторону увеличения сопротивления, относительно среднего по генеральной совокупности:

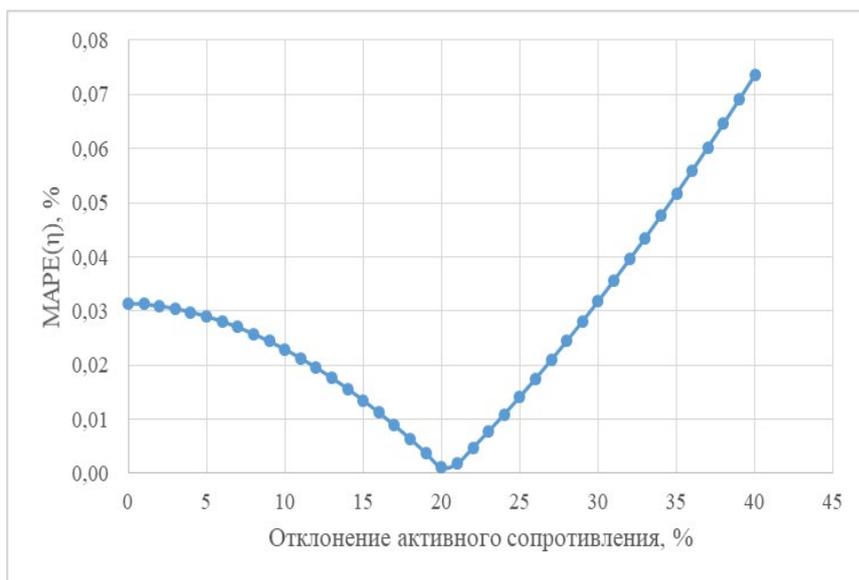


Рис. 2. – График зависимости $МАРЕ(\eta)$ от величины отклонения активного сопротивления пакета ротора в сторону увеличения сопротивления.

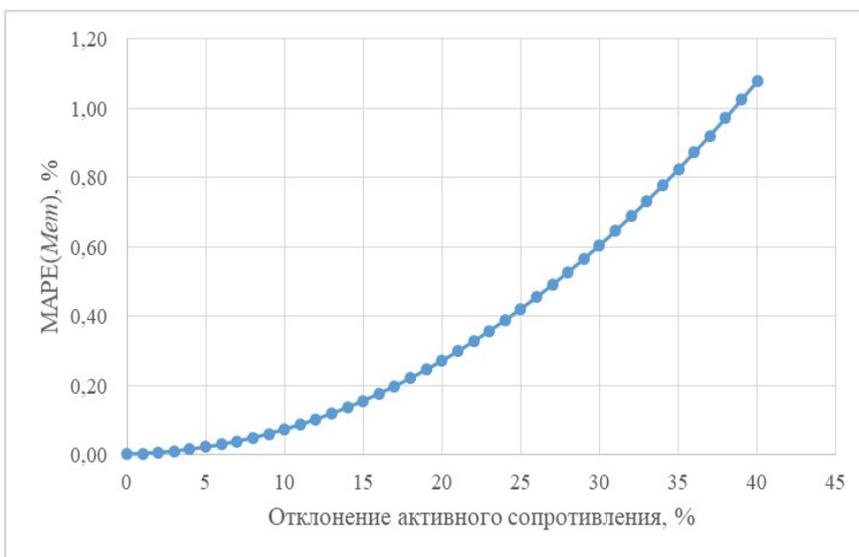


Рис. 3. – График зависимости $МАРЕ(M_{em})$ от величины отклонения активного сопротивления пакета ротора в сторону увеличения сопротивления.

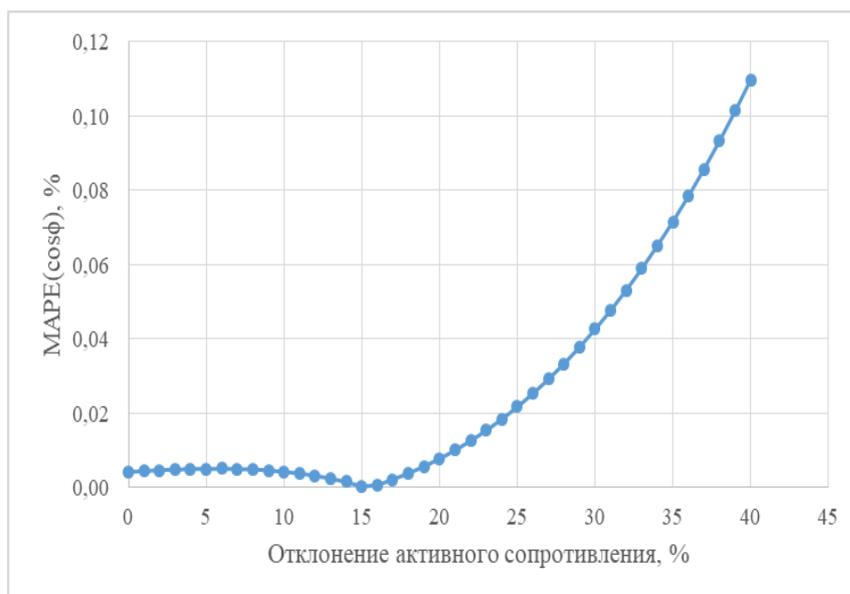


Рис. 4. – График зависимости $MAPE(\cos\varphi)$ от величины отклонения активного сопротивления пакета ротора, в сторону увеличения сопротивления.

Рассмотрим графики (рис. 5-7) зависимости $MAPE(\eta)$, $MAPE(M_{em})$ и $MAPE(\cos\varphi)$ от величины отклонения активного сопротивления, в сторону уменьшения, относительно среднего по генеральной совокупности:

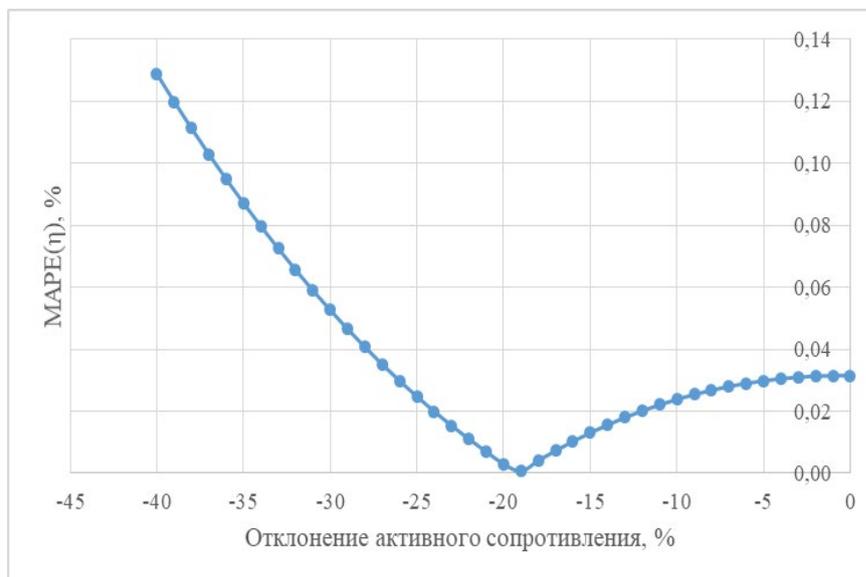


Рис. 5. – График зависимости $MAPE(\eta)$ от величины отклонения активного сопротивления пакета ротора, в сторону уменьшения сопротивления.

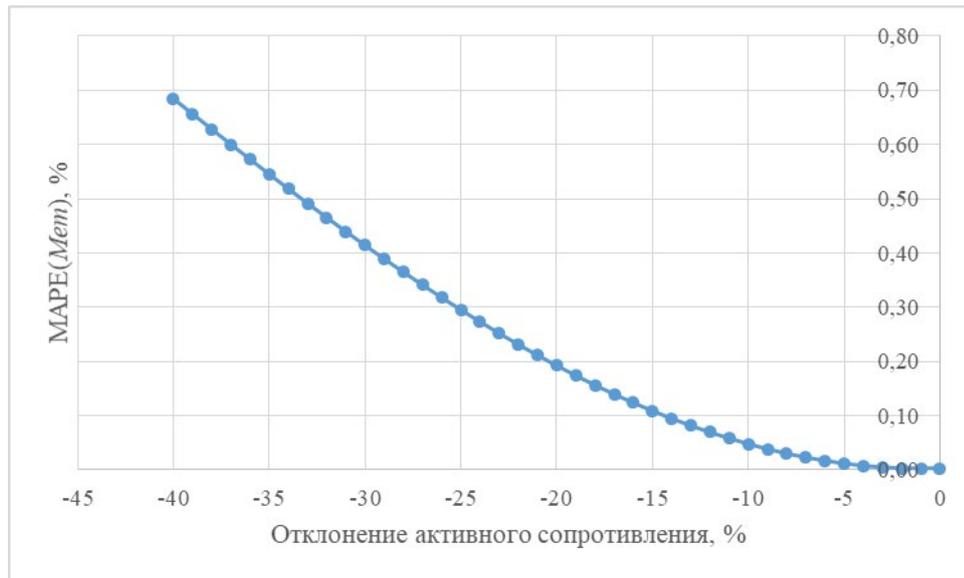


Рис. 6. – График зависимости $MAPE(Mет)$ от величины отклонения активного сопротивления пакета ротора, в сторону уменьшения сопротивления.

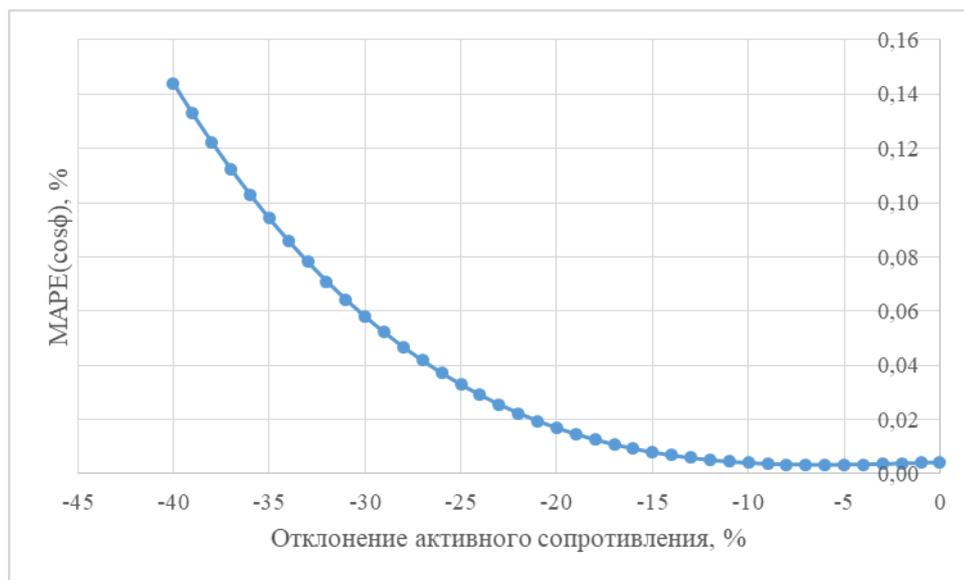


Рис. 7. – График зависимости $MAPE(\cos\varphi)$ от величины отклонения активного сопротивления пакета ротора, в сторону уменьшения сопротивления.

Анализ полученных графиков позволяет сделать выводы:

- 1) В области модального интервала в диапазоне $\pm 0,1$ о.е., по модели, построенной по методу планирования эксперимента, относительно среднего

по генеральной совокупности, ошибки – $МАРЕ(\eta)$, $МАРЕ(Mem)$ и $МАРЕ(\cos\varphi)$ не превышают 0,1 %;

2) При отклонении величины активного сопротивления пакета ротора в диапазоне ± 40 %, относительно среднего по генеральной совокупности, ошибки – $МАРЕ(\eta)$, $МАРЕ(Mem)$ и $МАРЕ(\cos\varphi)$ не превышают 1,1 %;

3) Построенная математическая модель ПЭД применима для оперативного управления режимом его работы в составе АСУТП.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FENG-2023-0001 «Предиктивное управление потоками энергии электрогенерирующих комплексов Арктики и Крайнего Севера, при стохастических характерах потребления и генерации электрической энергии: теория, синтез, эксперимент»).

Литература

1. Уразаков К. Р., Рукин М. В., Борисов А. О. Моделирование тепловых процессов в погружном двигателе электроцентробежного насоса, работающего в периодическом режиме // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334, № 4. С. 62-71. DOI: 10.18799/24131830/2023/4/3959.

2. Копырин В. А., Портнягин А. Л., Хамитов Р. Н. Пути повышения эффективности установок электроцентробежных насосов добычи нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 11. С. 155-162. DOI: 10.18799/24131830/2019/11/2361. EDN: AXOUUK.

3. Abulfaz H. I., Malik A. S. Evaluation of the inter-repair operation period of electric submersible pump units // Eureka: Physics and Engineering. 2020. No. 1. P. 79-86. DOI: 10.21303/2461-4262.2020.001105. EDN: UBYSYK.

4. Соловьев И. Г., Константинов И. В., Говорков Д. А. Ресурсно-энергетическая эффективность обустройства скважин с частотно-

регулируемой подачей насоса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 6. С. 60-72. DOI: 10.18799/24131830/2021/06/3236. EDN: FLRRMU.

5. Копырин В. А., Смирнов О. В., Портнягин А. Л., Хамитов Р. Н. Влияние внутрискважинного компенсатора на падение напряжения в элементах электротехнического комплекса добывающей скважины // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 9. С. 117-124. DOI: 10.18799/24131830/2018/9/2094. EDN: GOPZPY.

6. Кузнецов Е. М., Ковалев А. Ю., Аникин В. В. Энергетические показатели погружного асинхронного электродвигателя при вариациях электромагнитных параметров пакета ротора // Динамика систем, механизмов и машин. 2017. Т. 5, № 3. С. 58-62. DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-3-58-62.

7. Архипова О. В., Чертов Р. А., Денисенко А. В., Крохалев М. А., Хусаинов Э. И., Балыклов Е. С. Математическая модель погружного асинхронного двигателя как электротехнического комплекса // Инженерный вестник Дона. 2020. № 12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6702.

8. Volkov D. V., Stashinov Y. P. Equalization of Torques in Multi Motor Electric Drives with Estimation of Motors Parameters // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, Vladivostok. EN: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. P. 8602838. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602838. EDN: JVT LAU.

9. Архипова О. В., Хусаинов Э. И., Ковалев В. З. Сравнительный анализ подходов построения математической модели погружного электродвигателя на основе методов планирования эксперимента // Развитие науки и практики в глобально меняющемся мире в условиях рисков: Сборник материалов XXIV Международной научно-практической конференции, Москва, 27

декабря 2023 года. Москва: ООО "Издательство АЛЕФ", 2023. С. 340-349.
DOI: 10.34755/IROK.2023.98.58.005. EDN: EMXGZE.

10. Montgomery D.C. Design and analysis of experiments. Eight edition.
John Wiley & Sons, Inc., 2012. 757 p.

11. Ковалев В. З., Хусаинов Э. И., Архипова О. В. Статистический анализ экспериментальных электромагнитных характеристик пакетов роторов погружного электродвигателя // Инженерный вестник Дона. 2024. № 9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2024/9475.

References

1. Urazakov K. R., Rukin M. V., Borisov A. O. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2023. V. 334, № 4. pp. 62-71. DOI: 10.18799/24131830/2023/4/3959.

2. Kopyrin V. A., Portnyagin A. L., Khamitov R. N. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2019. V. 330, № 11. pp. 155-162. DOI: 10.18799/24131830/2019/11/2361. EDN: AXOUUK.

3. Abulfaz H. I., Malik A. S. Eureka: Physics and Engineering. 2020. No. 1. pp. 79-86. DOI: 10.21303/2461-4262.2020.001105. EDN: UBYSYK.

4. Solov'yev I. G., Konstantinov I. V., Govorkov D. A. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2021. V. 332, № 6. pp. 60-72. DOI: 10.18799/24131830/2021/06/3236. EDN: FLRRMU.

5. Kopyrin V. A., Smirnov O. V., Portnyagin A. L., Khamitov R. N. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2018. V. 329, № 9. pp. 117-124. DOI: 10.18799/24131830/2018/9/2094. EDN: GOPZPY.

6. Kuznetsov E. M., Kovalev A. YU., Anikin V. V. Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. 2017. V. 5, № 3. pp. 58-62. DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-3-58-62.



7. Arkhipova O. V., Chertov R. A., Denisenko A. V., Krokhaev M. A., Khusainov E. I., Balyklov E. S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. № 12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6702.

8. Volkov D. V., Stashinov Y. P. 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, Vladivostok. EN: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. P. 8602838. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602838. EDN: JVT LAU.

9. Arkhipova O. V., Khusainov E. I., Kovalev V. Z. Razvitiye nauki i praktiki v global'no menyayushchemsya mire v usloviyakh riskov: Sbornik materialov XXIV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 27 dekabrya 2023 goda. Moskva: OOO "Izdatel'stvo ALEF", 2023. pp. 340-349. DOI: 10.34755/IROK.2023.98.58.005. EDN: EMXGZE.

10. Montgomery D.C. Design and analysis of experiments. Eight edition. John Wiley & Sons, Inc., 2012. 757 p.

11. Kovalev V. Z., Khusainov E. I., Arkhipova O. V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. № 9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2024/9475.

Дата поступления: 9.06.2025

Дата публикации: 25.07.2025