

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ ОТ УТЕЧКИ ПО АКУСТИЧЕСКИМ И ВИБРОАКУСТИЧЕСКИМ КАНАЛАМ

О.Ю. Кутепова<sup>1</sup>, В.К. Зольников<sup>1</sup>, С.А. Сазонова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»

**Аннотация.** В статье рассматриваются основные теоретические сведения по акустическим и виброакустическим каналам. Рассмотрен экспериментально-расчетный метод оценки разборчивости речи. Приведены характеристика и классификация утечки акустической (речевой) информации по техническим каналам. Рассмотрена принятая в России методика оценки речевой разборчивости.

**Ключевые слова:** методы защиты информации, утечка информации, акустические и виброакустические каналы, технические каналы, аппаратура акустической защиты речи.

## ANALYSIS OF INFORMATION PROTECTION METHODS AGAINST LEAKAGE THROUGH ACOUSTIC AND VIBROACOUSTIC CHANNELS

O.Y. Kutepova<sup>1</sup>, V.K. Zolnikov<sup>1</sup>, S.A. Sazonova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

**Abstract.** The article discusses the basic theoretical information on acoustic and vibroacoustic channels. An experimental computational method for assessing speech intelligibility is considered. The characteristics and classification of acoustic (speech) information leakage through technical channels are given. The method of speech intelligibility assessment adopted in Russia is considered.

**Key words:** information protection methods, information leakage, acoustic and vibroacoustic channels, technical channels, acoustic speech protection equipment.

Теория разборчивости речи основана на гипотезе о формантной структуре звуков речи и на общих положениях теории вероятности. Все звуки речи отличаются друг от друга формантами, т.е. областями максимумов в их спектрах. Фор-

манты не представляют собой чистых тонов, а содержат достаточно большое количество спектральных составляющих, усиленных резонаторами речевого органа в определённой области частотного диапазона, с максимумом усиления на определённой частоте, которая и принимается за частоту характеризующую формант. Разборчивость формант обладает свойством аддитивности, т.е. суммируемости по частоте. Это означает, что сумма разборчивостей формант, полученных при раздельном пропускании полос частот, будет равна разборчивости формант при одновременном пропускании тех же полос частот.

Применяются два способа деления частотного спектра:

- деление на равные по ширине расчётные полосы, при этом для каждой полосы вероятность появления формант  $P_\Phi$  будет различной;
- деление на различные по ширине расчётные полосы, но так, чтобы величина  $P_\Phi$  была бы одинакова для каждой полосы.

Второй способ находит большее применение: речевой диапазон частот  $\Delta F = 200 \div 7000$  Гц делят на 20 полос равной разборчивости, с вероятностью появления формант в каждой полосе равной  $P_\Phi = 0,05$ . Суммарная вероятность приема формант называется разборчивостью формант

$$A_\Phi = \sum_{i=1}^{20} 0,05 \cdot \omega_{\Phi_i} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{20} \omega_{\Phi_i},$$

где  $\omega_{\Phi_i}$  - коэффициент разборчивости, зависимый от уровня ощущения формант Е для каждой расчётной полосы, например, при граничных значениях Е равных (-12 dB) и 36 dB значение  $\omega_{\Phi_i}$  равно 0,010 и 1,0 соответственно.

По суммарной разборчивости формант определяется величина разборчивости  $I_\Phi, \%$ , которая может принимать значения от 5 % до 90 %. Речь не прослушивается или маскируется шумами, если  $A_\Phi \leq 0,05$  или  $I_\Phi \leq 17\%$ .

Звуки имеют несколько формант и свою индивидуальную спектральную огибающую (рисунок 1).

Рассмотрим экспериментально-расчетный метод оценки разборчивости речи. Формант обладает свойством аддитивности:

$$A_\Phi = \sum_i^n A_{\Phi_i} = \sum_i^n g_i \cdot P_i \quad (1.1)$$

где  $g_i$  – вклад i-й частотной полосы в суммарную разборчивость  $A_\Phi$ ;  $P_i$  – коэффициент восприятия формант человеческим ухом в i-й полосе частот.

Вклад  $g_i$  каждой i-й частотной полосы в суммарную разборчивость формант можно оценить формантному распределению (рисунок 2).

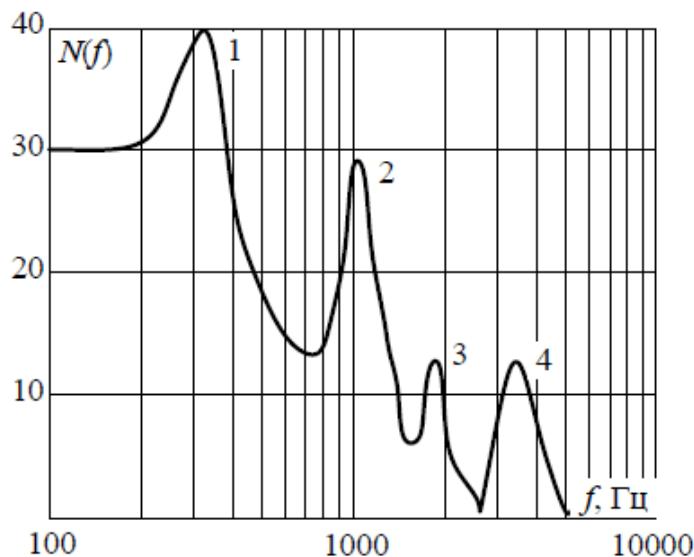


Рисунок 1 – Спектр фонемы «3»

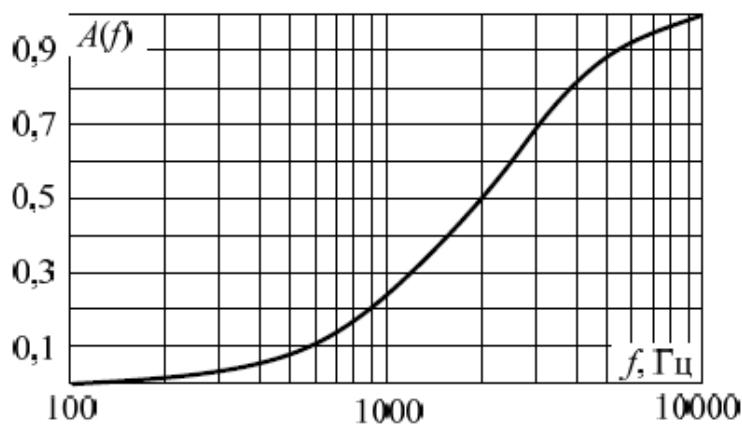


Рисунок 2 – Формантное распределение

Разборчивость равна 1 при полной разборчивости речи:

$$A_{\phi} = \sum_i^n A_{\phi i} = 1$$

Уровень ощущения Е находим из выражения

$$E = B'_p - b - B_{ш} \quad (1.2)$$

где  $B'_p$  – спектральная плотность формант;  $b$  – коэффициент затухания тракта «источник-приемник»;  $B_{ш}$  – спектральная плотность шума.

На рисунке 3 показаны усредненные спектры русской речи и  $B_p$  соответствующий спектр формант  $B'_p$ , а на рисунке 4 отображена разность этих спектров  $\Delta B$ . На рисунке 5 отображена зависимость коэффициента восприятия Р от уровня ощущений Е.

Из (1.2) получим:

$$E' = (B_p - \Delta B) - B_{\text{Ш}} - b = (B_p - B_{\text{Ш}}) - \Delta B - b. \quad (1.3)$$

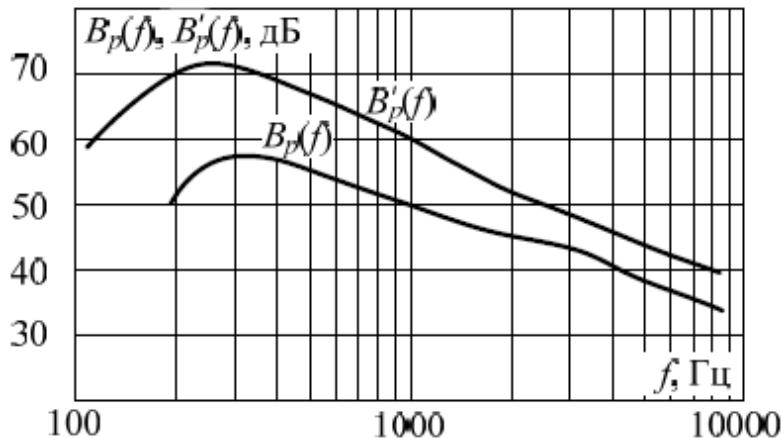


Рисунок 3 – Усредненные спектры русской речи и формант

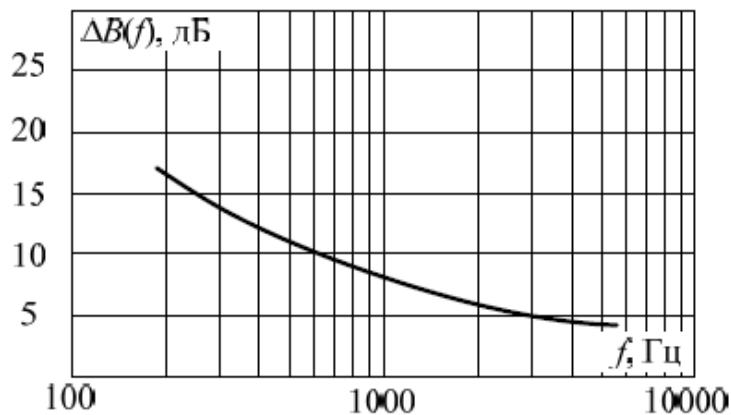


Рисунок 4 – Разница между спектром речи и формант

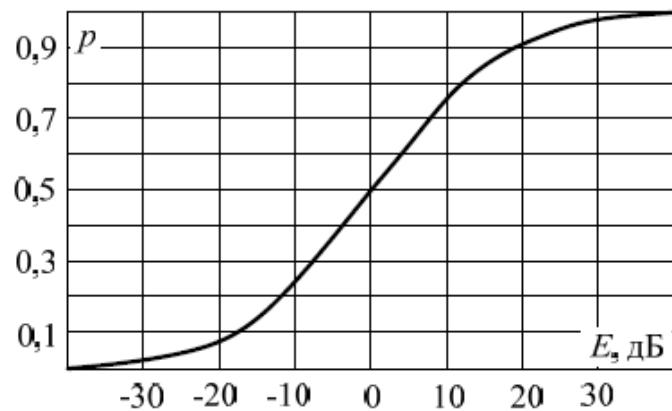


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента восприятия от уровня ощущений

В России принята методика оценки речевой разборчивости осуществлено Железняком В.К., Макаровым Ю.К., Хоревым А.А. Для нее существуют соотношения аппроксимируют графики на рисунках 2-5 и имеют следующий вид:

$$\Delta A_i = \begin{cases} 200 \cdot f^{0,43} - 0,37, & \text{если } f \leq 1000 \text{ Гц}, \\ 1,37 \cdot \frac{1000}{f^{0,69}}, & \text{если } f > 1000 \text{ Гц}, \end{cases} \quad (1.4)$$

$$k_f = \begin{cases} 2,57 \cdot 10^{-8} \cdot f^{2,4}, & \text{если } 100 < f \leq 400 \text{ Гц}, \\ 1 - 1,074 \cdot \exp(-10^{-4} \cdot f^{1,18}), & \text{если } 400 < f \leq 10000 \text{ Гц}, \end{cases} \quad (1.5)$$

$$P_i = \begin{cases} \frac{0,78 + 5,46 \cdot \exp[-4,3 \cdot 10^{-3} \cdot (27,3 - |Q_i|)^2]}{1 + 10^{0,1|Q_i|}}, & \text{если } Q_i \leq 0, \\ 1 - \frac{0,78 + 5,46 \cdot \exp[-4,3 \cdot 10^{-3} \cdot (27,3 - |Q_i|)^2]}{1 + 10^{0,1|Q_i|}}, & \text{если } Q_i > 0, \end{cases} \quad (1.6)$$

где  $Q_i = (L_{ci} - \Delta A_i) - L_{Шi} = q_i - \Delta A_i$ ;  $L_{Шi}$  – уровень шума (помехи) в месте измерения в  $i$ -й спектральной полосе, дБ;  $q_i = L_{ci} - L_{Шi}$  – отношение «уровень речевого сигнала/уровень шума», дБ;  $R_i = P_i \cdot k_i$ ,

$$R = \sum_{i=1}^N R_i \quad (1.7)$$

$$S = \begin{cases} 4 \cdot R^{1,43}, & \text{если } R \leq 0,15; \\ 1,1 \cdot [1 - 1,17 \cdot \exp(-2,9 \cdot R)], & \text{если } 0,15 < R \leq 0,7; \\ 1,01 \cdot [1 - 9,1 \cdot \exp(-6,9 \cdot R)], & \text{если } R > 0,7; \end{cases} \quad (1.8)$$

$$W = 1,05 \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{6,15 \cdot S}{1 + S}\right) \right] \quad (1.9)$$

$$W = \begin{cases} 1,54 \cdot R^{0,25} \cdot [1 - \exp(-11 \cdot R)], & \text{если } R < 0,5 \\ 1 - \exp\left(\frac{11 \cdot R}{1 + 0,7 \cdot R}\right), & \text{если } R \geq 0,15 \end{cases} \quad (1.10)$$

На рисунках 6 и 7 приведены необходимые для расчетов графики. При разработке данной работы использовались материалы исследований [1-18].

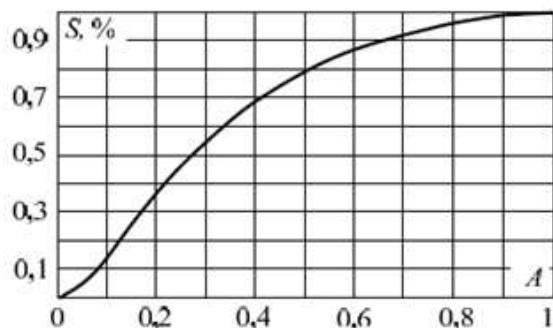


Рисунок 6 – Зависимость слоговой разборчивости  $S$  от интегрального индекса артикуляции  $A$

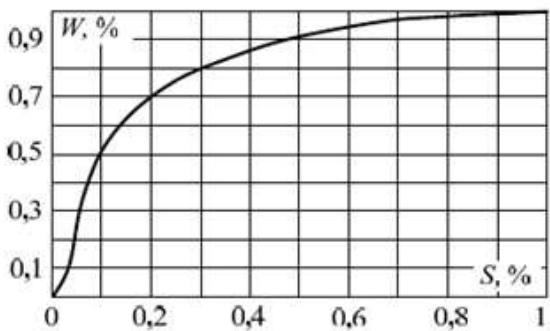


Рисунок 7 – Зависимость словесной разборчивости  $W$  от интегрального индекса артикуляции  $A$

### Список литературы

1. Компьютерное моделирование работоспособности электрической схемы в системах автоматизации проектирования / В. К. Зольников, С. В. Стоянов, Е. В. Шмаков, Н. Н. Литвинов // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17, № 3. – С. 26-36. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-24-34. – EDN EJKJP.
2. Епифанов, Е. Н. Системный анализ акустических свойств речевых оповещателей / Е. Н. Епифанов, В. Ф. Асминин, С. А. Сазонова // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17, № 4. – С. 42-53. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-17-4-42-53. – EDN BMZBYL.
3. Создание средств проверки электрической схемы с использованием схемы тестовых внешних воздействий / К. В. Зольников, Д. В. Шеховцов, К. В. Литвинов, М. А. Солодилов // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17, № 3. – С. 36-44. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-34-42. – EDN EAGO00.
4. Формализация верификации топологии и электрической схемы для систем автоматизированного проектирования / Т. В. Скворцова, К. В. Зольников, А. М. Плотников, И. В. Скоркин // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17, № 3. – С. 61-70. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-59-68. – EDN DUYQHJ.
5. Зольников, К. В. Моделирование и оптимизация конструкции полосового фильтра на основе коаксиального резонатора / К. В. Зольников, Д. А. Ачкасов // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17, № 2. – С. 43-50. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-17-2-43-50. – EDN POHLTW.
6. Николенко, С. Д. Моделирование возникновения внутренних напряжений в сложной структуре материала / С. Д. Николенко, С. П. Козодаев, С. А. Сазонова // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17, № 2. – С. 50-61. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-17-2-50-61. – EDN DIXFHX.

7. Алгоритм диагностики утечек целевого продукта в условиях неопределенности для гидравлической системы / С. А. Сазонова, А. Н. Кошель, И. Н. Пантелейев [и др.] // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17, № 2. – С. 71-82. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-17-2-71-82. – EDN HDRQPC.

8. Повышение формализации задач верификации топологии и электрической схемы для систем автоматизированного проектирования / А. В. Полуэктов, К. В. Зольников, А. В. Ачкасов, Ю. А. Чевычелов // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17, № 1. – С. 102-111. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-17-1-102-111. – EDN QIKKRO.

9. Сазонова, С. А. Моделирование процесса диагностики утечек на основе двухальтернативной гипотезы с учетом помех от стохастичности потребления в гидравлической системе / С. А. Сазонова, И. В. Щербакова, Г. И. Сметанкина // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17, № 1. – С. 111-120. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-17-1-111-120. – EDN CSKRIZ.

10. Полуэктов, А. В. Моделирование влияния электромагнитных полей на микросхемы / А. В. Полуэктов, Р. Ю. Медведев, К. В. Зольников // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17, № 1. – С. 129-136. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-17-1-129-136. – EDN HWPUXU.

11. Полуэктов, А. В. Моделирование ослабления ионизирующего излучения за счет защитного корпуса микросхем / А. В. Полуэктов, Р. Ю. Медведев, А. И. Заревич // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17, № 2. – С. 93-100. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-17-2-93-100. – EDN QQRQXE.

12. Diagnostics of leaks with unknown amplitudes against the background of interference caused by accidental consumption in the hydraulic system for the forest complex / S. Sazonova, K. Zolnikov, T. Skvortsova [et al.] // BIO Web of Conferences. – 2024. – Т. 145. – С. 04016. – DOI: 10.1051/bioconf/202414504016. – EDN: SQXQKY.

13. Асминин, В.Ф. Экспериментальные исследования вибровозбужденных тонкостенных элементов конструкций станков дискретными виброремпифириующими вставками / В.Ф. Асминин, С.А. Сазонова, А.С. Самофалова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 525-529. – DOI: 10.24412/2071-6168-2024-3-525-526. – EDN: CBJRSA.

14. Николенко, С.Д. Улучшение качества материала промышленных полов для повышения ударной стойкости при воздействии машиностроительного оборудования / С.Д. Николенко, С.А. Сазонова, В.Ф. Асминин // Известия Тульского

государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 495-498. – DOI: 10.24412/2071-6168-2024-3-495-496. – EDN: SBVFRO.

15. Перцев, В.Т. Повышение качества бетона путем применения металлических фибр / В.Т. Перцев, С.Д. Николенко, С.А. Сазонова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 480-484. – DOI: 10.24412/2071-6168-2024-3-480-481. – EDN: TJXBCE.

16. Asminin, V.F. Evaluation of the sound insulation properties of a lightweight panel with an internal diamond-shaped structure based on computer modeling of the process of passage and absorption of sound energy in it / V.F. Asminin, E.V. Druzhinina, S.A. Sazonova // Noise Theory and Practice. – 2024. – Т. 10. – № 1 (36) . – С. 82-96. – EDN: OZLOHG.

17. Samofalova, A.S. Damping of vibration-damping thin-walled steel structures with discrete rubber inserts / A.S. Samofalova, V.F. Asminin, S.A. Sazonova // Noise Theory and Practice. – 2024. – Т. 10. – № 1 (36). – С. 69-81. – EDN: FLGZTH.

18. Асминин, В.Ф. Защита от шума вибровозбужденных тонкостенных элементов конструкций станков дискретными вибродемптирующими вставками / В.Ф. Асминин, С.А. Сазонова, А.С. Самофалова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. № 12. – С. 161-169. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-12-161-162. – EDN: XBSGJY.

## References

1. Computer simulation of the operability of an electrical circuit in design automation systems / V. K. Zolnikov, S. V. Stoyanov, E. V. Shmakov, N. N. Litvinov // Modeling of systems and processes. – 2024. – Vol. 17, No. 3. – pp. 26-36. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-24-34. – EDN EJKJP.
2. Epifanov, E. N. System analysis of acoustic properties of speech annunciators / E. N. Epifanov, V. F. Asminin, S. A. Sazonova // Modeling of systems and processes. – 2024. – Vol. 17, No. 4. – pp. 42-53. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-17-4-42-53. – EDN BMZBYL.
3. Creation of means of checking an electrical circuit using a circuit of test external influences / K. V. Zolnikov, D. V. Shekhovtsov, K. V. Litvinov, M. A. Solodilov // Modeling of systems and processes. – 2024. – Vol. 17, No. 3. – pp. 36-44. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-34-42. – EDN EAGO00.
4. Formalization of topology verification and electrical circuit for computer-aided design systems / T. V. Skvortsova, K. V. Solnikov, A.M. Plotnikov, I. V. Skorkin

// Modeling of systems and processes. – 2024. – Vol. 17, No. 3. – pp. 61-70. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-59-68. – EDN DUYQHJ.

5. Zolnikov, K. V. Modeling and optimization of the design of a polar filter based on a coaxial resonator / K. V. Zolnikov, D. A. Achkasov // Modeling of systems and processes. – 2024. – Vol. 17, No. 2. – pp. 43-50. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-17-2-43-50. – EDN POHLTW.

6. Nikolenko, S. D. Modeling of the occurrence of internal stresses in a complex material structure / S. D. Nikolenko, S. P. Kozodaev, S. A. Sazonova // Modeling of systems and processes. – 2024. – Vol. 17, No. 2. – pp. 50-61. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-17-2-50-61. – EDN DIXFHX.

7. The algorithm for diagnosing leaks of the target product in uncertain conditions for the hydraulic system / S. A. Sazonova, A. N. Koshel, I. N. Panteleev [et al.] // Modeling of systems and processes. – 2024. – Vol. 17, No. 2. – pp. 71-82. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-17-2-71-82. – EDN HDRQPC.

8. Increasing the formalization of topology and electrical circuit verification tasks for computer-aided design systems / A.V. Poluektov, K. V. Zolnikov, A.V. Achkasov, Yu.A. Chevychelov // Modeling of systems and processes. – 2024. – Vol. 17, No. 1. – pp. 102-111. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-17-1-102-111. – EDN QIKKRO.

9. Sazonova, S. A. Modeling of the leak diagnosis process based on a two-alternative hypothesis, taking into account interference from stochastic consumption in the hydraulic system / S. A. Sazonova, I. V. Shcherbakova, G. I. Smetankina // Modeling of systems and processes. – 2024. – Vol. 17, No. 1. – pp. 111-120. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-17-1-111-120. – EDN CSKRIZ.

10. Poluektov, A.V. Modeling the influence of electromagnetic fields on microcircuits / A.V. Poluektov, R. Y. Medvedev, K. V. Zolnikov // Modeling of systems and processes. – 2024. – Vol. 17, No. 1. – pp. 129-136. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-17-1-129-136. – EDN HWPUXU.

11. Poluektov, A.V. Modeling the attenuation of ionizing radiation due to the protective housing of microcircuits / A.V. Poluektov, R. Y. Medvedev, A. I. Zarevich // Modeling of systems and processes. – 2024. – Vol. 17, No. 2. – pp. 93-100. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-17-2-93-100. – EDN QQRQXE.

12. Diagnostics of leaks with unknown amplitudes against the background of interference caused by accidental consumption in the hydraulic system for the for-est complex / S. Sazonova, K. Zolnikov, T. Skvortsova [et al.] // BIO Web of Confer-ences. – 2024. – Vol. 145. – p. 04016. – DOI: 10.1051/bioconf/202414504016. – EDN: SQXQKY.

13. Asminin, V.F. Experimental studies of vibro-excited thin-walled structural elements of machine tools with discrete vibration damping inserts / V.F. Asminin, S.A. Sazonova, A.S. Samofalova // Extracts from Tula State University. Technical sciences. – 2024. – No. 3. – pp. 525-529. – DOI: 10.24412/2071-6168-2024-3-525-526. – EDN: CBJRSA.
14. Nikolenko, S.D. Improving the quality of the material of industrial floors to increase impact resistance when exposed to machine-building equipment / S.D. Nikolenko, S.A. Sazonova, V.F. Asminin // Proceedings of Tula State University. Technical sciences. – 2024. – No. 3. – pp. 495-498. – DOI: 10.24412/2071-6168-2024-3-495-496. – EDN: SBVFRO.
15. Pertsev, V.T. Improving the quality of concrete by using metallic fibers / V.T. Pertsev, S.D. Nikolenko, S.A. Sazonova // Proceedings of Tula State University. Technical sciences. – 2024. – No. 3. – pp. 480-484. – DOI: 10.24412/2071-6168-2024-3-480-481. – EDN: TJXBCE.
16. Asminin, V.F. Evaluation of the sound insulation properties of a light-weight panel with an internal diamond-shaped structure based on computer modeling of the process of passage and absorption of sound energy in it / V.F. Asminin, E.V. Druzhinina, S.A. Sazonova // Noise Theory and Practice. – 2024. – T. 10. – № 1 (36). – Pp. 82-96. – EDN: OZLOHG.
17. Samofalova, A.S. Damping of vibration-damping thin-walled steel structures with discrete rubber inserts / A.S. Samofalova, V.F. Asminin, S.A. Sazonova // Noise Theory and Practice. – 2024. – Vol. 10. – № 1 (36). – Pp. 69-81. – EDN: FLGZTH.
18. Asminin V.F., Sazonova S.A., Samofalova A.S. Protection from noise of vibrationally excited thin-walled structural elements of machine tools with discrete vibration damping inserts // Proceedings of Tula State University. Technical sciences. – 2023. No. 12. – pp. 161-169. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-12-161-162. – EDN: XBSGJY.