

*А. Е. Набоков, А. Н. Чукарин, И. А. Яицков*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРАЦИЙ ИСТОЧНИКОВ ЗВУКА ПРИ ОБРАБОТКЕ КОНСОЛЬНО ЗАКРЕПЛЕННЫМИ ДИСКОВЫМИ И ГРЕБЕНЧАТЫМИ ФРЕЗАМИ НА РЕЗЬБООБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКАХ

**Аннотация.** Резьбообрабатывающие станки специализируются на нарезания резьб различных типов и размеров, как внутренних, так и наружных, с использованием консольно-закрепленных дисковых и гребенчатых фрез. В статье представлены теоретические исследования и выведены аналитические зависимости уровней звукового давления и звуковой мощности для технологических процессов фрезерования. Полученные аналитические зависимости дают возможность прогнозировать уровень шума на различных стадиях резьбофрезерования и разрабатывать мероприятия по его снижению. К таким мероприятиям относятся оптимизация режимов резания, применение вибродемпфирующих материалов, использование шумозащитных кожухов и экранов, а также превентивное обслуживание станочного оборудования с целью устранения дисбаланса и люфтов. Внедрение предложенных рекомендаций позволит не только повысить точность и качество резьбовых соединений за счет уменьшения вибраций и улучшения стабильности процесса резания. Это, в свою очередь, приведет к снижению брака, повышению производительности и сокращению производственных затрат, но и снизить негативное воздействие шума на операторов станков.

**Ключевые слова:** станочное оборудование, дисковые и гребенчатые фрезы, колебательная система, сила резания, скорость колебаний, уровень звукового давления.

**Для цитирования:** Набоков, А. Е. Исследование частотных характеристик вибраций источников звука при обработке консольно закрепленными дисковыми и гребенчатыми фрезами на резьбообрабатывающих станках / А. Е. Набоков, А. Н. Чукарин, И. А. Яицков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4 – С. 65–70. – DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_4\_65.

### **Введение**

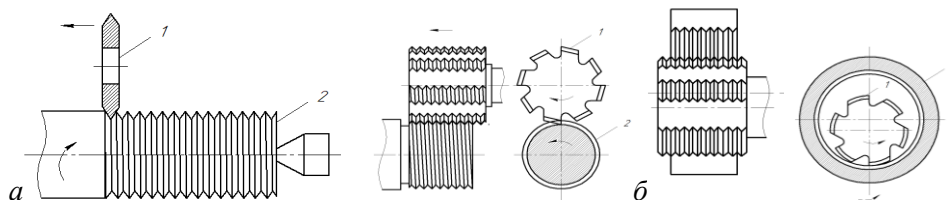
На резьбообрабатывающих станках выполняется широкий спектр операций по обработке. Технологии резьбообработки, применяемые на этих станках, варьируются в зависимости от предъявляемых требований к прецизионности, скорости производства и свойств обрабатываемого металла. Основные способы включают нарезание резьбы с помощью метчиков и плашек, резьбофрезерование, накатка и токарная обработка резьбы. Каждый из упомянутых подходов отличается своими достоинствами и недостатками, а выбор оптимального варианта обуславливается спецификой решаемой задачи.

Исследование частотных характеристик вибраций, издаваемых дисковыми и гребенчатыми фрезами с консольным креплением, применяемыми в резьбообрабатывающем оборудовании, представляет собой сложную задачу, требующую принимать во внимание многочисленные параметры, определяющие динамические свойства инструмента и всей станочной системы. Колебательные процессы, возникающие в процессе резания, оказывают значительное воздействие на точность обработки, качество поверхности резьбы и на срок службы инструмента и оборудования. Поэтому идентификация и изучение частотных характеристик этих колебаний является важным для оптимизации режимов резания, снижения уровня шума и повышения производительности технологического процесса.

Основными источниками вибраций при работе консольно закрепленных дисковых и гребенчатых фрез являются силы резания, изменяющиеся во времени в зависимости от геометрии зуба фрезы, скорости резания, подачи и свойств обрабатываемого материала. Эти переменные силы вызывают колебания инструмента, станка и заготовки, которые в свою очередь генерируют звуковые волны. Структура этих волн, а именно их частотный состав, несет в себе информацию о характере вибраций и, следовательно, о причинах их возникновения [1, 2].

### **Модель и объект исследования**

Дисковые и гребенчатые фрезы устанавливаются на консольной части шпинделя. На рис. 1, 2 представлены расчетные схемы технологического процесса фрезерования гребенчатой фрезой: 1 – наружной и внутренней резьбы; 2 – на длинных заготовках.



**Рис. 1. Расчетная схема фрезерования резьбы:**  
*а* – наружной и *б* – внутренней; *1* – гребенчатая фреза; *2* – заготовка



**Рис. 2. Расчетная схема фрезерования резьбы на длинных заготовках дисковой фрезой**

Исходя из условий закрепления режущего инструмента, заготовок и их геометрических размеров приняты следующие акустические модели источников:

*точечный источник* – гребенчатые фрезы и обрабатываемые заготовки;

*круглая пластина, закрепленная в центре* – дисковые фрезы для фрезерования резьб на длинных заготовках.

Зависимости, определяющие звуковое давление ( $P$ ), звуковую мощность ( $N$ ) и их уровни с учетом исследований, приведенных в работах [1–5], доведены до следующих формул:

– *обрабатываемые заготовки и гребенчатые фрезы при нарезании резьбы*

$$P = 4 \cdot 10^{-4} \frac{D^3 \omega^2 V_K \cos \theta}{r}; \quad L_p = 20 \lg \frac{V_K \cos \theta}{r} + 40 \lg f_c + 60 \lg D + 60, \text{ дБ};$$

$$N = 1,2 \cdot 10^{-10} D^6 f_c^4 V_K^2; \quad L_N = 60 \lg D + 40 \lg f_c + 40 \lg V_K + 52, \text{ дБ}, \quad (1)$$

– *дисковые фрезы для фрезерования резьб на длинных заготовках*

$$P = 3 \cdot 10^3 \frac{D \cdot h \cdot V_K \cdot k}{r}, \quad L_p = 20 \lg \frac{D \cdot h \cdot V_K \cdot k}{r} + 164, \text{ дБ},$$

$$N = 0,1(D \cdot h \cdot V_K \cdot k)^2, \quad L_N = 20 \lg DhV_K k + 110, \text{ дБ}, \quad (2)$$

где  $D$  – диаметр источника, м;  $h$  – толщина резца, м;  $\omega$  – частота образования стружки, р/с;  $V_K$  – скорость колебательного движения, м/с;  $\theta$  – угол излучения;  $r$  – дистанция от источника колебаний до точки измерения, м;  $k$  – коэффициент, задающий собственные частоты колебаний;  $f_c$  – собственная частота колебаний источника, Гц.

Для определения собственных частот колебаний ( $f_c$ ), проявляющихся в процессе нарезания резьбы гребенчатыми фрезами, применяется следующая зависимость между ключевыми параметрами:

$$f_c = \sqrt{\frac{c}{m + \left(\frac{l}{l_1}\right)^3 \rho F}}, \quad (3)$$

$$\text{где } c = \frac{EJ_x}{l^3}.$$

Анализ приведенных уравнений позволяет выявить определяющие факторы, влияющие на собственные частоты колебаний. Для гребенчатых фрез: жесткость системы ( $c$ , Н/м), определяемая модулем упругости ( $E$ , Па) материала шпинделя и фрезы, напрямую влияет на частоту. Увеличение модуля упругости приводит к повышению жесткости и, следовательно, к увеличению собственной частоты. Момент инерции ( $J_x$ , м<sup>4</sup>) характеризует геометрию сечения детали. Чем он выше, тем больше сопротивление изгибу, что также повышает собственную частоту. Длина шпинделя и фрезы ( $l$  и  $l_1$ , м) оказывают обратное воздействие: чем они больше, тем ниже собственная частота колебаний, так как удлинение конструкции снижает ее жесткость. Масса обрабатываемой заготовки или гребенчатой фрезы ( $m$ , кг) также обратно пропорциональна собственной частоте, что логично, поскольку большая масса требует меньшей частоты для возникновения колебаний.  $F$  – площадь поперечного сечения шпинделя, м<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>.

Для дисковых фрез, используемых при фрезеровании резьбы на протяженных заготовках:

$$f_c = \frac{3 \cdot 10^3 \cdot k \cdot h}{D}, \quad (4)$$

где  $h$  – толщина реза, м;  $k$  – коэффициент, определяющий собственные частоты колебаний, определяется экспериментально или теоретически, исходя из конкретной геометрии и материала дисковой фрезы и заготовки;  $D$  – диаметр источника, м. Для дисковых фрез толщина режущей части ( $h$ ) и диаметр источника ( $D$ ) являются ключевыми параметрами, так увеличение толщины режущей части приводит к повышению собственной частоты, так как увеличивается жесткость конструкции, диаметр источника связан с размером диска, вызывающего колебания.

Для анализа частот вибраций применяются различные методы, включая экспериментальные измерения с использованием акселерометров и микрофонов, а также теоретическое моделирование с использованием конечно-элементного анализа.

Для рассматриваемых моделей с выраженным высокочастотным диапазоном частот собственных колебаний динамическое уравнение в векторном представлении записывается как:

$$\overline{F}_u + \overline{F}_d + \overline{F}_y + \overline{P}_p = 0, \quad (5)$$

где  $F_u$ ,  $F_d$ ,  $F_y$ ,  $P_p$  – силы инерции, демпфирования, упругости и резания (соответственно).

Силы, возникающие при резании, зависят от многих факторов, включая скорость резания, глубину резания, подачу, свойства обрабатываемого материала и геометрию реза. В первом приближении можно принять, что эти силы пропорциональны площади срезаемого слоя материала. Площадь срезаемого слоя в свою очередь зависит от текущих отклонений реза по осям  $Y$  и  $Z$ .

Вследствие разной интенсивности действия сил резания вдоль координатных осей  $O_z$  и  $O_y$ , можно утверждать, что:

$$\overline{F}_u = -m \left[ \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} \bar{i} + \frac{\partial^2 z(x,t)}{\partial t^2} \bar{k} \right], \quad (6)$$

где  $m$  – масса реза, кг;  $y$  и  $z$  – отклонение реза по осям  $Y$  и  $Z$ ;  $\bar{i}$  и  $\bar{k}$  – единичные векторы вдоль осей  $Y$  и  $Z$ .

Для более точного моделирования процесса нарезания резьбы необходимо учитывать не только статические параметры, такие как жесткость системы и силы резания, но и динамические характеристики, включая массу режущего инструмента и демпфирующие свойства системы.

$$\overline{F}_d = \varepsilon \left[ \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} \bar{i} + \frac{\partial^2 z(x,t)}{\partial t^2} \bar{k} \right],$$

$$\overline{F}_y = j \left[ y(x,t) \bar{i} + z(x,t) \bar{k} \right], \quad (7)$$

где  $j$  – параметр, характеризующий сопротивление деформации (жесткость) системы «заготовка–фреза», Н/м;  $\varepsilon$  – коэффициент демпфирования, который определяется зависимостью [3–5]:

$$\varepsilon = \frac{2m}{T} \delta_0,$$

где  $m$  – масса фрезы, кг;  $T$  – период колебания, с;  $\delta_0$  – логарифмический показатель уменьшения амплитуды колебаний, имеющий величину  $\delta_0 = 0,32$  для фрезерных и шлифовальных систем [3, 4].

Для представленной модели скорость колебаний вычисляется на основе уравнения:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + \eta_{ob} \frac{dz}{dt} + Cz = P_z(t), \quad m \frac{d^2 y}{dt^2} + \eta_{ob} \frac{dy}{dt} + Cy = 0,4P_z(t),$$

где  $C$  – жесткость системы, Н/м;  $\eta_{ob}$  – обобщенный коэффициент сопротивления, который определяется зависимостью [7, 8]:

$$\eta_{ob} = \frac{2m}{T} \delta_0.$$

Для резьбообрабатывающих станков следует учитывать составляющие силы резания в направлении осей  $O_z$  и  $O_y$ , а также пропорцию сил резания  $P_y = 0,4 P_z$  и механические характеристики фрез. Тогда дифференциальные уравнения колебаний в направлении осей координат примут вид:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{10^{-2} k}{R^3 h^{1.5}} \frac{dz}{dt} + 2 \cdot 10^6 \frac{1}{R^2 h} z = \frac{4 \cdot 10^{-5} P_z}{R^2 h} \cos \left[ 0,1 n z^* t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right],$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{10^{-2} k}{R^3 h^{1.5}} \frac{dy}{dt} + 2 \cdot 10^6 \frac{1}{R^2 h} z = \frac{1,6 \cdot 10^{-5} P_z}{R^2 h} \cos \left[ 0,1 n z^* t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right].$$

Решение уравнений вынужденных колебаний получены в следующем виде:

$$z = \frac{4 \cdot 10^{-5} P_z \cos \left[ 0,1nz^* t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right]}{\sqrt{\left[ 2 \cdot 10^6 \frac{1}{R^2 h} - (0,1nz^* t)^2 \right]^2 + \frac{10^{-4} k}{R^6 h^3}}}$$

$$y = \frac{1,6 \cdot 10^{-5} P_z \cos \left[ 0,1nz^* t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right]}{\sqrt{\left[ 2 \cdot 10^6 \frac{1}{R^2 h} - (0,1nz^* t)^2 \right]^2 + \frac{10^{-4} k}{R^6 h^3}}}$$

Значения скорости колебаний в направлении осей  $Oz$  и  $Oy$  получены в следующем виде:

$$|V_z| = \frac{4 \cdot 10^{-6} P_z n z^* \sin \left[ 0,1nz^* t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right]}{\sqrt{\left[ 2 \cdot 10^6 \frac{1}{R^2 h} - (0,1nz^* t)^2 \right]^2 + \frac{10^{-4} k}{R^6 h^3}}}$$

$$|V_y| = \frac{1,6 \cdot 10^{-6} P_z n z^* \sin \left[ 0,1nz^* t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right]}{\sqrt{\left[ 2 \cdot 10^6 \frac{1}{R^2 h} - (0,1nz^* t)^2 \right]^2 + \frac{10^{-4} k}{R^6 h^3}}}$$

Измерение уровней звукового давления и звуковой мощности основано на вычислении среднеквадратичного значения скоростей колебаний:

$$V_k = \frac{4,3 \cdot 10^{-6} P_z n z^* \sin \left[ 0,1nz^* t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right]}{\sqrt{\left[ 2 \cdot 10^6 \frac{1}{R^2 h} - (0,1nz^* t)^2 \right]^2 + \frac{10^{-4} k}{R^6 h^3}}} + \frac{9 \cdot 10^{-12} P_z l^3}{R^5 h^{0,5}} \sin \frac{1,4 \cdot 10^3}{R h^{0,5}} t.$$

Для практических расчетов следует определять не изменение уровней звукового давления во времени, а их максимальное значение в течение времени обработки

$$0 \leq t \leq \frac{l_u}{S_n},$$

где  $l_u$  – длина резьбы, м;  $S_n$  – скорость продольной подачи, м/с.

$$V_{k \max} = \sqrt{\left( \frac{dz}{dt} \right)_{\max}^2 + \left( \frac{dy}{dt} \right)_{\max}^2}. \quad (8)$$

Анализ акустических свойств системы «фреза – заготовка» фрезерных станков подразумевает определение величин амплитуд колебаний на резонансных частотах источников возбуждения. В качестве подтверждения теоретических расчетов проводились экспериментальные исследования в производственных условиях. Измерения дают возможность получить фактические значения частот вибраций в различных точках станка и режущего инструмента, а теоретическое моделирование – установить собственные частоты колебаний системы. В ходе экспериментов были получены следующие результаты: подтверждены теоретические расчеты частот собственных колебаний; определены фактические уровни звукового давления в различных точках рабочей зоны; выявлены резонансные частоты систем «фреза – обрабатываемая заготовка»; зафиксированы зависимости уровня шума от режимов резания.

Сопоставление результатов экспериментальных исследований и теоретического моделирования позволяет получить более полное представление о динамических процессах, происходящих при резбообработке. Важным аспектом анализа является выявление резонансных частот, на которых амплитуда вибраций значительно возрастает, что может приводить к нестабильности процесса резания и возникновению автоколебаний. Предотвращение резонансных явлений достигается путем изменения параметров режима резания, конструкции инструмента или станка, а также путем применения демпфирующих элементов.

### Заключение

Проведенные исследования дают возможность выявить основные закономерности формирования акустических полей при фрезеровании и разработать акустические модели для расчета уровней шума. Разработанные акустические модели позволяют прогнозировать уровень звукового давления при фрезеровании, что позволяет инженерам и технологам оптимизировать технологические операции на этапе планирования.

### Список литературы

1 Яицкова, Н. М. Снижение шума металлорежущих станков / Н. М. Яицкова, Т. А. Финоченко, И. Г. Переверзев // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 2 (51). – С. 112–115. – ISSN 1818-5509.

### References

1 Yaitskova, N. M. Noise reduction of metal-cutting machines / N. M. Yaitskova, T. A. Finochenko, I. G. Pereverzev // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobcheniya. – 2020. – No. 2 (51). – P. 112–115. – ISSN 1818-5509.

2 **Чукарин, А. Н.** Теория и методы акустических расчетов и проектирования технологических машин для механической обработки / А. Н. Чукарин. – Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2004. – 152 с. – ISBN 5-7890-0326-5.

3 **Балыков, И. А.** Влияние процессов резания на шум фрезерных станков / И. А. Балыков, А. Н. Чукарин, Д. З. Евсеев // Новое в безопасности и жизнедеятельности и экологии : сборник докладов и тезисов докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 14–16 окт. 1996 г. – Санкт-Петербург, 1996. – С. 222–223.

4 **Жарков, И. Г.** Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И. Г. Жарков. – Ленинград : Машиностроение. Ленинградское отделение, 1986. – 184 с.

5 Расчеты на прочность в машиностроении. В 3 т. Т. 1 : Теоретические основы и экспериментальные методы / под редакцией С. Д. Пономарева. – Москва : Машгиз, 1956. – 884 с.

6 Model validation of the acoustic systems "tooth wheels-mandrels" of the vertical gear generator and gear shaping machines / S. Ryzhov, T. Finochenko, A. Chukarin, I. Yaitskov // Akustika. – 2021. – Vol. 41. – P. 90–93. – DOI 10.36336/akustika20214190.

7 **Рыжков, Д. И.** Вибрации при резании металлов и методы их устранения / И. Д. Рыжков. – Москва : Машиностроение, 1961. – 172 с.

8 **Месхи, Б. Ч.** Математическое моделирование шумообразования системы инструмент–заготовка при фрезеровании и шлифовании / Б. Ч. Месхи, В. А. Гергерт // Строительство-2003 : материалы Международной научно-практической конференции / РГСУ. – Ростов-на-Дону, 2003. – С. 50–57. – EDN VIHKAD.

9 **Набоков, А. Е.** Экспериментальные исследования шума на рабочих местах станочников резьбообрабатывающих и шлицефрезерных станков / А. Е. Набоков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 5. – С. 77–84. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-5-77-78.

2 **Chukarin, A. N.** Theory and methods of acoustic calculations and design of technological machines for mechanical processing / A. N. Chukarin. – Rostov-on-Don : Publishing Center DSTU, 2004. – 152 p. – ISBN 5-7890-0326-5.

3 **Balykov, I. A.** Influence of cutting processes on the noise of milling machines / I. A. Balykov, A. N. Chukarin, D. Z. Evseev // New in safety and life and ecology : collection of reports and abstracts of the All-Russian scientific and practical conference with international participation Oct 14–16, 1996. – Saint Petersburg, 1996. – P. 222–223.

4 **Zharkov, I. G.** Vibrations when processing with blade tools / I. G. Zharkov. – Leningrad : Mechanical engineering. Leningrad Department, 1986. – 184 p.

5 Strength calculations in mechanical engineering. In 3 vols. Vol. 1 : Theoretical foundations and experimental methods / edited by S. D. Ponomarev. – Moscow : Mashgiz, 1956. – 884 p.

6 Model validation of the acoustic systems "tooth wheels-mandrels" of the vertical gear generator and gear shaping machines / S. Ryzhov, T. Finochenko, A. Chukarin, I. Yaitskov // Akustika. – 2021. – Vol. 41. – P. 90–93. – DOI 10.36336/akustika20214190.

7 **Ryzhkov, D. I.** Vibrations during metal cutting and methods for eliminating them / D. I. Ryzhkov. – Moscow : Mashinostroenie, 1961. – 172 p.

8 **Meski, B. Ch.** Mathematical modeling of noise generation in the tool-workpiece system during milling and grinding / B.Ch. Meski, V. A. Gergert // Construction-2003 : materials of the International scientific-practical conference / Rostov State University of Civil Engineering. – Rostov-on-Don, 2003. P. 50–57. – EDN VIHKAD.

9 **Nabokov, A. E.** Experimental studies of noise at the workplaces of machine operators of thread-processing and slot-milling machines / A. E. Nabokov // News of the Tula State University. Technical sciences. – 2023. – No. 5. – P. 77–84. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-5-77-78.

*A. E. Nabokov, A. N. Chukarin, I. A. Yaitskov*

#### **STUDY OF THE FREQUENCY CHARACTERISTICS OF SOUND SOURCE VIBRATIONS DURING PROCESSING WITH CANTILEVER-MOUNTED DISC AND COMB MILLING CUTTERS ON THREAD PROCESSING MACHINES**

**Abstract.** Thread milling machines specialize in cutting threads of various types and sizes, both internal and external, using cantilever-mounted disk and comb milling cutters. This article presents theoretical research and derives analytical relationships for sound pressure and sound power levels in milling processes. The resulting analytical relationships make it possible to predict noise levels at various stages of thread milling and develop measures to reduce them.

These measures include optimizing cutting conditions, using vibration-damping materials, employing noise-reducing enclosures and screens, and performing preventive maintenance on machine tools to eliminate imbalances and backlash. Implementing the proposed recommendations will not only improve the accuracy and quality of threaded connections by reducing vibration and improving the stability of the cutting process. This, in turn, will lead to a reduction in defects, increased productivity, and a reduction in production costs, but will also reduce the negative impact of noise on machine operators.

**Keywords:** machine tools, disk and comb milling cutters, oscillatory system, cutting force, oscillation velocity, sound pressure level.

**For citation:** Nabokov, A. E. Study of the frequency characteristics of sound source vibrations during processing with cantilever-mounted disk and comb milling cutters on thread-processing machines / A. E. Nabokov, A. N. Chukarin, I. A. Yaitskov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobsheniya. – 2025. – No. 4. – P. 65–70. – DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_4\_65.

#### Сведения об авторах

##### **Набоков Александр Евгеньевич**

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Строительная механика», старший преподаватель, e-mail: mr.nae@yandex.ru

##### **Чукарин Александр Николаевич**

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Безопасность жизнедеятельности» доктор технических наук, профессор, e-mail: bgd@rgups.ru

##### **Яицков Иван Анатольевич**

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), электромеханический факультет, доктор технических наук, профессор, декан, e-mail: yia@rgups.ru

#### Information about the authors

##### **Nabokov Alexander Evgenievich**

Rostov State Transport University (RSTU), Chair “Structural Mechanics”, Senior Lecturer, e-mail: mr.nae@yandex.ru

##### **Chukarin Alexander Nikolaevich**

Rostov State Transport University (RSTU), Chair “Life Safety”, Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: bgd@rgups.ru

##### **Yaitskov Ivan Anatolievich**

Rostov State Transport University (RSTU), Electromechanical Department Doctor of Engineering Sciences, Professor, Dean, e-mail: yia@rgups.ru