

УДК 004.413

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ РАСЧЕТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА НА СТАБИЛЬНОСТЬ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМОБИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА

© 2023 А.С. Саксонов, В.Н. Козловский, К. В. Киреев

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 15.05.2023

В статье представлены результаты разработки вероятностного расчетно-статистического инструментария для оценки влияния стабильности технологического процесса изготовления автомобильного генератора на вариабельность его электротехнических характеристик.

Ключевые слова: конкурентоспособность, качество, автосборочное производство, электрокомпоненты.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-3-84-89

EDN: LGJNGV

Автомобильный генератор (АГ) продукт, выпускающийся массово, на который во время осуществления технологического процесса оказывает влияние группа случайных факторов, под действием которых возникают технологические погрешности геометрических размерных параметров, определяющих формирование несоосности статора и ротора. [1, 2]. Важным является то, что ни один из влияющих на технологический процесс факторов не вносит решающего вклада в формирование несоосности статора и ротора [3].

На возникновение технологических погрешностей геометрических размерных параметров, определяющих формирование несоосности статора и ротора, оказывает влияние стабильность технологического процесса [4, 5]. Из этого следует, что с учетом массовости производства для прогнозирования стабильности основных электротехнических и электромеханических характеристик АГ в зависимости от стабильности технологического процесса, необходимо использовать методы математической статистики [6, 7]. Одним из наиболее удобных методов оценки случайных процессов выступает метод Монте-Карло в силу его простоты и универсальности. Метод Монте-Карло сводится к оцениванию плотности распределения некоторой случайной величины, определенной на вероятностном пространстве с использованием интеграла типа Лебега-Стилтьеса:

$$I = \int f(x)\mu dx, \quad (1)$$

где $f(x)$ – плотность распределения оцениваемого параметра; μ – сигма-конечная мера.

В рамках исследования следует прибегнуть к использованию метода Монте-Карло в его упрощенном виде, когда вышеописанный интеграл оценивается средним арифметическим плотностей распределения:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(x_i), \quad (2)$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(y_i), \quad (3)$$

где N – размер выборки; $f(x_i)$ – плотность распределения входной случайной величины с i -ой относительной частотой; x_i – входная случайная оцениваемая величина; $f(y_i)$ – плотность распределения выходной случайной величины с i -ой относительной частотой; y_i – выходная случайная оцениваемая величина.

Для того, чтобы выполнять оценку распределения случайных величин, необходимо знать, какому закону распределения подчиняется разброс этих случайных величин [8, 9]. В рамках исследования предполагается отталкиваться от нормального закона распределения, в силу ряда причин: во-первых, на процесс изготовления АГ воздействует группа случайных факторов, во-вторых, ни один из них не вносит решающего вклада, значит, плотности распределения параметров несоосности статора и ротора и основных электротехнических и электромеханических характеристик оцениваются формулами:

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma_\varepsilon \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\varepsilon - \varepsilon_{cp})^2}{2\sigma_\varepsilon^2}}, \quad (4)$$

$$f(U_{m\phi}) = \frac{1}{\sigma_{U_{m\phi}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(U_{m\phi} - U_{m\phi_{cp}})^2}{2\sigma_{U_{m\phi}}^2}}, \quad (5)$$

Саксонов Александр Сергеевич, аспирант.

E-mail: a.s.saksonoff@yandex.ru

Козловский Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой.

E-mail: Kozlovskiy-76@mail.ru

Киреев Кирилл Владимирович, кандидат технических наук, доцент. E-mail: cir-cir@lenta.ru

$$f(\vec{f}_{\text{рез}}) = \frac{1}{\sigma_{\vec{f}_{\text{рез}}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\vec{f}_{\text{рез}} - \vec{f}_{\text{рез, ср}})^2}{2\sigma_{\vec{f}_{\text{рез}}}^2}}, \quad (6)$$

где σ_{ε} – среднеквадратичное отклонение величины смещения геометрической оси ротора, м; $\varepsilon_{\text{ср}}$ – среднее значение величины смещения геометрической оси ротора по выборке АГ, м; $\sigma_{U_{\text{мф}}}$ – среднеквадратичное отклонение величины амплитудного значения фазного статорного напряжения, В; $U_{\text{мф, ср}}$ – среднее значение величины амплитудного значения фазного статорного напряжения, В; $\sigma_{\vec{f}_{\text{рез}}}$ – среднеквадратичное отклонение величины амплитудного значения результирующей силы, воздействующей на подшипниковые узлы АГ, Н; $\vec{f}_{\text{рез, ср}}$ – среднее значение величины амплитудного значения результирующей силы, воздействующей на подшипниковые узлы АГ.

Для установления взаимосвязи стабильности технологического процесса и стабильности основных электротехнических и электромеханических характеристик АГ следует оценивать плотности распределения величин смещения геометрической оси ротора и основных электротехнических и электромеханических характеристик:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(\varepsilon), \quad (7)$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(U_{\text{мф}}), \quad (8)$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(\vec{f}_{\text{рез}}), \quad (9)$$

где $f(U_{\text{мф}})$ – плотность распределения величин амплитудного значения фазного статорного напряжения выборки АГ; $f(\vec{f}_{\text{рез}})$ – плотность распределения величин значений результирующей силы, воздействующей на подшипниковые узлы АГ.

Автомобильный генератор – продукт, выпускаемый массово, воздействие группы факторов, влияющих на возникновение технологических погрешностей во время процесса производства индивидуально для каждого отдельно взятого АГ. Повышение стабильности технологического процесса, путем перехода от 8 качества к 7 качеству (сужение поля допуска на посадку подшипников автомобильного генератора (АГ) до 50 % относительно существующего значения) позволит повысить стабильность основных электротехнических и электромеханических характеристик АГ, а значит и повысить вероятность безотказной работы подшипниковых узлов.

Проведем вероятностного расчетно-статистический эксперимент по методу Монте-Карло. Для этого разработана программа расчета основных электротехнических характеристик автомобильного генератора, в которую интегрирована подпрограмма генератора случайных

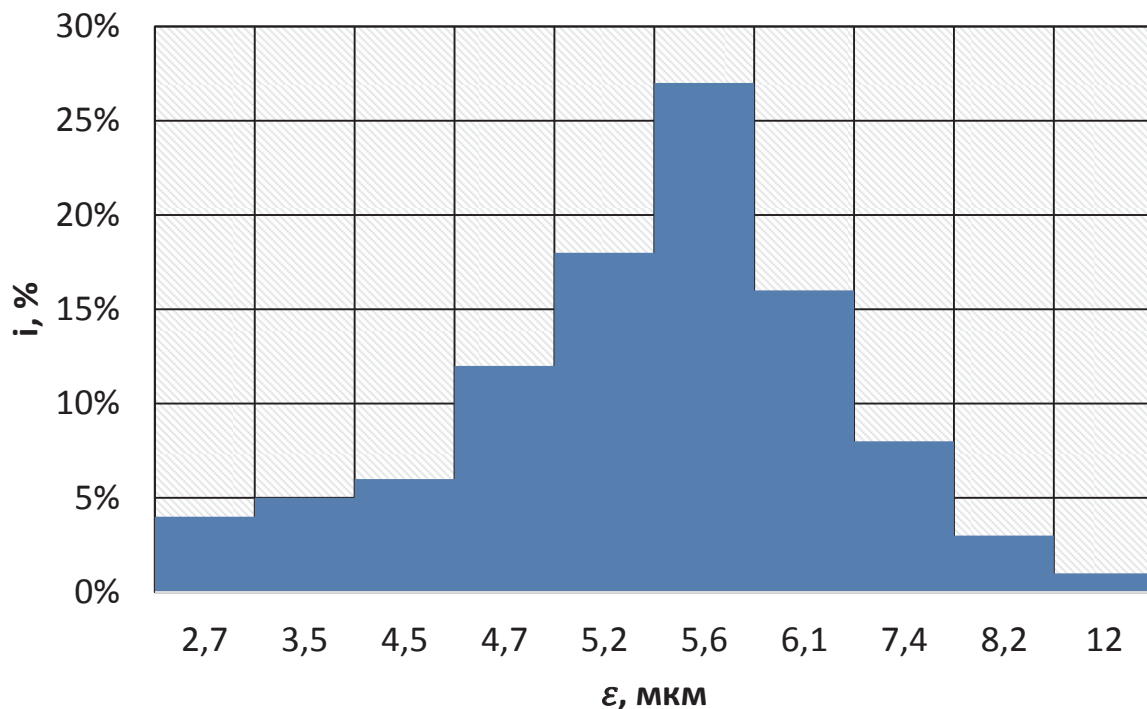


Рисунок 1 – Гистограмма диапазона значений смещений геометрической оси вращения ротора относительно статора первой выборки АГ

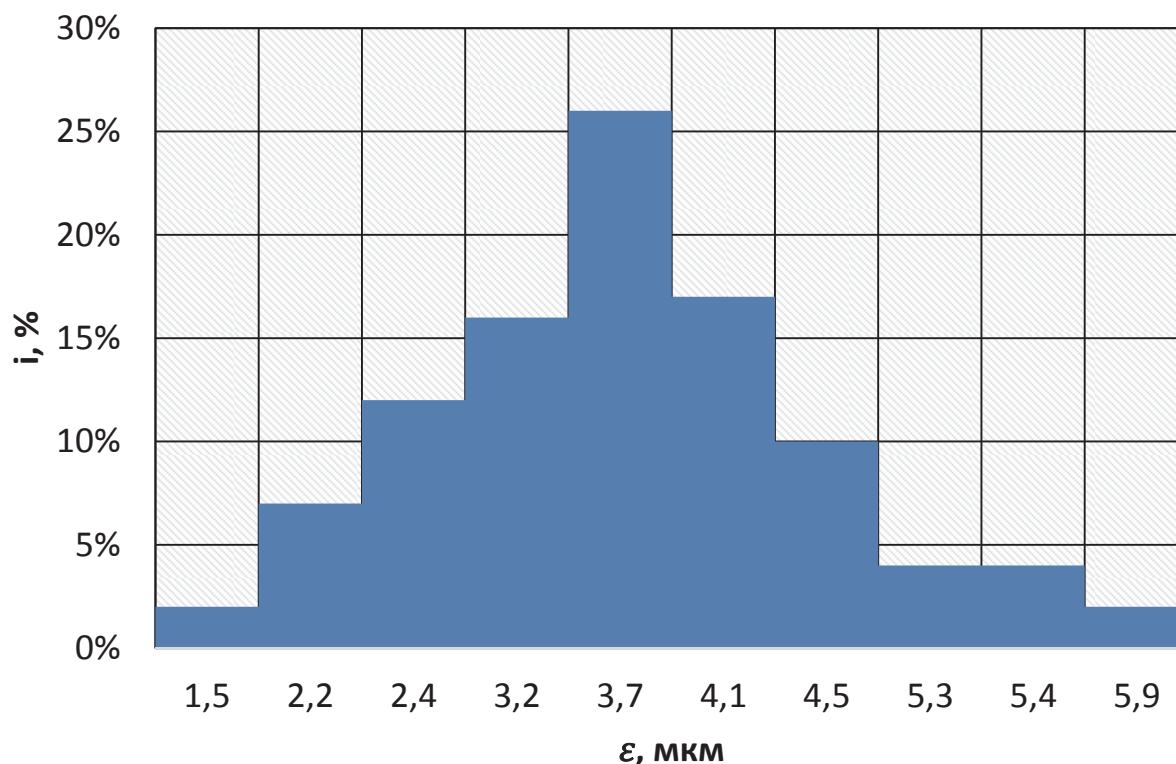


Рисунок 2 – Гистограмма диапазона значений смещений геометрической оси вращения ротора относительно статора второй выборки АГ

чисел, реализующая нормальный закон распределения.

Подпрограмма генератора случайных чисел создает две выборки АГ с различными значениями смещения геометрической оси ротора, значения первой выборки лежат в диапазоне установленного в ТУ поля допуска на посадку подшипников в щиты, значения второй – в диапазоне суженого на 50 % поля допуска на посадку подшипников в щиты. Число АГ в каждой выборке – 100 штук.

Теперь следует выполнить оценку результатов, полученных в ходе вероятностного расчетно-статистического эксперимента по методу Монте-Карло (рисунки 1, 2).

В результате анализа рисунков 1 и 2, установлено, что первая выборка АГ имеет меньшую суммарную плотность распределения величин смещения геометрической оси ротора сравнительно со второй выборкой АГ. Суммарная плотность распределения величин смещения геометрической оси ротора первой выборки АГ равна 0,7513, второй – 0,80. Большая суммарная плотность распределения величин смещения геометрической оси ротора АГ свидетельствует о том, что при суженом на 50 % поле допуска на посадку подшипников в щиты технологический процесс становится более стабильным.

При повышении стабильности технологического процесса должна повышаться стабильность основных электротехнических и электро-механических характеристик.

Управлять стабильностью процесса изготовления АГ возможно путем изменения ширины поля допуска на посадку подшипников в щиты. Для оценки влияния стабильности технологического процесса на стабильность основных электротехнических и электро-механических характеристик АГ следует ввести количественный критерий, показывающий степень влияния входного параметра на выходные параметры [10]. В качестве инструмента оценки следует использовать коэффициент влияния, который в общем виде выражается формулой:

$$C_{ij} = \frac{\Delta f(x_1 \dots x_j)}{\Delta x_j} \cdot \frac{x_j}{f(x_1 \dots x_j)}, \quad (10)$$

где $\Delta f(x_1 \dots x_j)$ – приращение выходного параметра; Δx_j – приращение входного параметра; x_j – номинальное значение входного параметра; $f(x_1 \dots x_j)$ – номинальное значение выходного параметра.

В контексте исследования входным параметром выступает смещение геометрической оси ротора, а выходными параметрами – основные электротехнические и электро-механические характеристики АГ:

$$C_{ij1} = \frac{\Delta U_{m\phi}}{\varepsilon} \cdot \frac{\delta_{ном}}{U_{m\phi}}, \quad (11)$$

$$C_{ij2} = \frac{\Delta f_{рез}}{\varepsilon} \cdot \frac{\delta_{ном}}{f_p}, \quad (12)$$

где $\Delta U_{m\phi}$ – приращение амплитудного значения фазного статорного напряжения, В; ε –

смещение геометрической оси ротора, m ; $\Delta f_{рез}$ – приращение результирующей силы, воздействующей на подшипниковые узлы АГ, Н.

Коэффициент влияния выступает в качестве универсального инструмента оценки весомости влияния входного параметра на формирование выходных параметров. Анализируя формулу коэффициента влияния для общего случая видно, что малое приращение выходного параметра к малому приращению входного параметра даст малое значение коэффициента. Таким же образом, большое приращение выходного параметра к большому приращению входного параметра даст большое значение коэффициента, а значит, оценка весомости влияния параметров несоосности статора и ротора на основные электротехнические и электромеханические характеристики будет иметь однозначный характер.

Для прогнозирования стабильности технологического процесса производства генератора в зависимости от установленной ширины поля допуска на посадку подшипников в щиты следует использовать подпрограмму генератора случайных чисел. Генератор случайных чисел создает выборку величин смещения геометрической оси ротора в пределах установленного поля допуска на посадку подшипников в щиты, затем программа выполняет расчет основных электротехнических и электромеханических характеристик генератора, а также вероятность безотказной работы подшипниковых узлов в

течение заданного промежутка времени при каждом значении смещения геометрической оси ротора. Используя полученные результаты расчетов определяются значения коэффициентов влияния величин смещения геометрической оси ротора на основные электротехнические и электромеханические характеристики. По полученным результатам строятся графики зависимостей коэффициентов влияния от амплитудных значений фазного статорного напряжения и результирующей силы, воздействующей на подшипниковые узлы. Затем определяется разница между крайними значениями коэффициента влияния для той или иной характеристики генератора, чем меньше разница – тем стабильнее технологический процесс и соответственно стабильнее основные электротехнические и электромеханические характеристики генератора.

В графическом формате концепция методики прогнозирования и управления качеством генератора по ключевым параметрам, охватывающая предлагаемые вероятностные и расчетно-статистические инструменты может быть представлена в виде схемы (рисунок 3).

Применение разработанного инструментария в практике проектирования и производства автомобильных генераторов обеспечивает возможности для своевременной корректировки разрабатываемой конструкции, с точки зрения обеспечения стабильности требуемых характеристик.

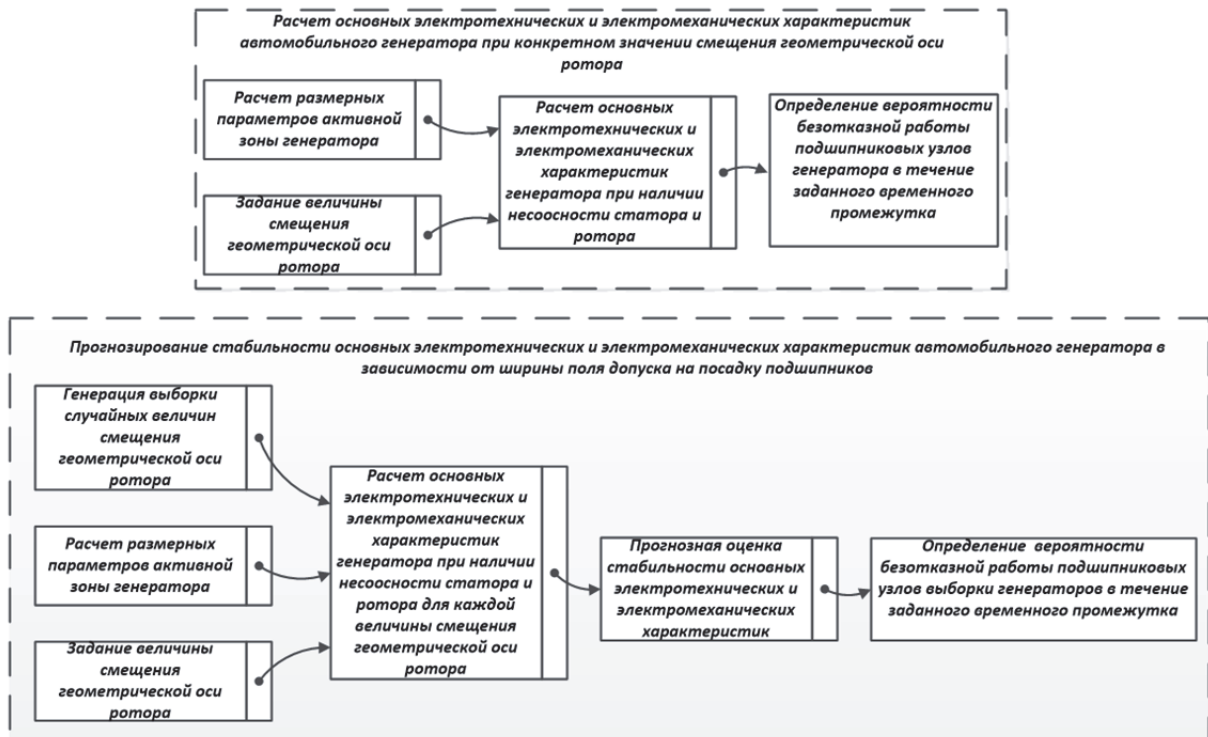


Рисунок 3 – Концепция методики обеспечения качества АГ по параметрам несоосности статора и ротора

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козловский, В.Н. Компьютерное моделирование влияния технологических особенностей формирования эллипсности статора на электромеханические характеристики автомобильной синхронной генераторной установки / В.Н. Козловский, А.С. Саксонов // Вопросы электротехнологии. – 2021. – № 3(32). – С. 74-80.
2. Саксонов, А.С. Расчетно-статистический эксперимент по методу Монте-Карло как основа инструмента управления качеством транспортных электромеханических преобразователей / А.С. Саксонов, В.Н. Козловский, А.В. Крицкий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 6. – С. 286-292.
3. Калабро С.Р. Принципы и практические вопросы надежности / С.Р. Калабро. – Москва: Машиностроение, 1966. 376 с.
4. Козловский В.Н. Методология анализа и прогнозирования качества автомобилей в эксплуатации / В.Н. Козловский, Д.В. Антипов, А.В. Зятров // Актуальные проблемы экономики. – 2016. – Т.186 – №12. – С. 387-398.
5. Козловский, В.Н. Обеспечение качества и надежности электрооборудования автомобилей: монография / В.Н. Козловский. – Тольятти: ТГУ, 2009. – 273 с.
6. Карасев, В.А. Теория вероятностей и математическая статистика. Математическая статистика: Практикум / В. А. Карасев, Г. Д. Левшина. – Москва: Издательский Дом МИСиС, 2016. – 120 с.
7. Трофимова Е.А. Теория вероятностей и математическая статистика / Е.А. Трофимова, Н.В. Кисляк, Д.В. Гилев. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2018, 164 с.
8. Козловский, В.Н. Обеспечение качества и надежности системы электрооборудования автомобилей / В.Н. Козловский // автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Моск. гос. автомобил.-дорож. ин-т (техн. ун-т). – Тольятти, 2010
9. Козловский, В.Н. Перспективные системы диагностики управления автономным транспортным объектом / В.Н. Козловский, В.В. Дебелов, О.И. Деев, А.Ф. Колбасов, С.В. Петровский, А.П. Новикова // Грузовик. – 2017. – № 6. – С. 21-28.
10. Козловский, В.Н. Развитие проектов электромобилей и автомобилей с комбинированной энергоустановкой / В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров, М.М. Васильев, В.В. Дебелов // Грузовик. – 2018. – № 6. – С. 18-21.

PROBABILISTIC CALCULATION AND STATISTICAL TOOL FOR ASSESSING THE INFLUENCE OF A TECHNOLOGICAL PROCESS ON THE STABILITY OF THE MAIN ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF A VEHICLE GENERATOR

© 2023 A.S. Saxonov, V.N. Kozlovsky, K.V. Kireev

Samara State Technical University, Samara, Russia

The article presents the results of the development of probabilistic calculation and statistical tools for assessing the impact of the stability of the technological process of manufacturing an automobile generator on the variability of its electrical characteristics.

Keywords: competitiveness, quality, car assembly production, electrical components.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-3-84-89

EDN: LGJNGV

REFERENCES

1. Kozlovskij, V.N. Komp'yuternoe modelirovanie vliyaniya tekhnologicheskikh osobennostej formirovaniya ellipsnosti statora na elektromekhanicheskie harakteristiki avtomobil'noj sinhronnoj generatornoj ustanovki / V.N. Kozlovskij, A.S. Saksonov // Voprosy elektrotekhnologii. – 2021. – № 3(32). – С. 74-80.
2. Saksonov, A.S. Raschetno-statisticheskij eksperiment po metodu Monte-Karlo kak osnova instrumenta upravleniya kachestvom transportnyh elektromekhanicheskikh preobrazovatelej / A.S. Saksonov, V.N. Kozlovskij, A.V. Krickij // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2022. – № 6. – С. 286-292.
3. Kalabro S.R. Principy i prakticheskie voprosy nadezhnosti / S.R. Kalabro. – Moskva: Mashinostroenie, 1966. 376 s.
4. Kozlovskij V.N. Metodologiya analiza i prognozirovaniya kachestva avtomobilej v ekspluatatsii / V.N. Kozlovskij, D.V. Antipov, A.V. Zayatrov // Aktual'nye problemy ekonomiki. – 2016. – Т.186. – №12. – С. 387-398.
5. Kozlovskij, V.N. Obespechenie kachestva i nadezhnosti elektrooborudovaniya avtomobilej: monografiya / V.N. Kozlovskij. – Tol'yatti: TGU, 2009. – 273 s.
6. Karasev, V.A. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika. Matematicheskaya statistika: Praktikum / V. A. Karasev, G. D. Levshina. – Moskva: Izdatel'skij Dom MISiS, 2016. – 120 s.
7. Trofimova E.A. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika / E.A. Trofimova, N.V. Kislyak, D.V. Gilev. – Ekaterinburg: Ural'skij federal'nyj universitet, 2018, 164 s.
8. Kozlovskij, V.N. Obespechenie kachestva i nadezhnosti sistemy elektrooborudovaniya avtomobilej / V.N.

- Kozlovskij // avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk / Mosk. gos. avtomobil.-dorozh. in-t (tekh. un-t). – Tol'yatti, 2010
9. Kozlovskij, V.N. Perspektivnye sistemy diagnostiki upravleniya avtonomnym transportnym ob'ektom / V.N. Kozlovskij, V.V. Debelov, O.I. Deev, A.F. Kolbasov, S.V. Petrovskij, A.P. Novikova // Gruzovik. – 2017. – № 6. – S. 21-28.
10. Kozlovskij, V.N. Razvitie proektov elektromobilej i avtomobilej s kombinirovannoj energoustanovkoj / V.N. Kozlovskij, D.V. Ajdarov, M.M. Vasil'ev, V.V. Debelov // Gruzovik. – 2018. – № 6. – S. 18-21.

Alexander Saxonov, PhD Student.
E-mail: a.s.saksonoff@yandex.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University
Vladimir Kozlovsky, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department. E-mail: Kozlovskiy-76@mail.ru
Kirill Kireev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. E-mail: cir-cir@lenta.ru