

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**STATISTICAL METHODS FOR ASSESSING POWER QUALITY  
INDICATORS IN THE POWER SUPPLY SYSTEMS  
OF SPECIAL-PURPOSE TRANSPORT VEHICLES**

*Д.В. Раджабов, С.А. Хандорин, канд. техн. наук А.А. Сидоренко, д-р техн. наук В.А. Майстренко*

*D.V. Radzhabov, S.A. Khandorin, Ph.D. A.A. Sidorenko, D.Sc. V.A. Maistrenko*

*Филиал ВА МТО им. А.В. Хрулева (г. Омск)*

В настоящее время обеспечение электромагнитной совместимости электрооборудования при разработке новых и модернизации существующих образцов транспортных машин специального назначения является актуальной задачей. Для её решения требуется разработка и совершенствование методов оценки качества напряжения в системе электроснабжения. Показатели качества напряжения могут быть оценены только статистическими методами. В статье, на примере измерения пульсаций напряжения в системе электроснабжения транспортных машин специального назначения, разработаны методы определения кондуктивных электромагнитных помех по гистограммам и закону распределения. Проведена статистическая проверка гипотез кондуктивных электромагнитных помех в системе электроснабжения транспортных машин специального назначения.

**Ключевые слова:** электромагнитная обстановка, система электроснабжения транспортных машин специального назначения, электрооборудование, пульсации напряжения, закон распределения, показатели качества электроэнергии.

Currently, ensuring the electromagnetic compatibility of electrical equipment in the development of new models of special-purpose transport vehicles and modernization of existing is an urgent task. To solve it, it is necessary to develop and improve methods for assessing the quality of voltage in the power supply system. The voltage quality indicators can be estimated only by statistical methods. The article uses the example of measuring voltage ripples in the power supply system of special-purpose transport vehicles to show methods for determining conductive electromagnetic interference by histogram and distribution law. The authors determine the law of distribution of conductive electromagnetic interference in the power supply system of special-purpose transport vehicles.

**Keywords:** electromagnetic environment, power supply system of special-purpose transport vehicles, electrical equipment, voltage ripples, distribution law, voltage quality indicators.

Особенностью разработки перспективных образцов транспортных машин специального назначения (ТМСН) является как необходимость установки мощных нелинейных прием-

ников электроэнергии с вентильными преобразователями, так и приемников электроэнергии, построенных на основе элементов полупроводниковой микроэлектроники, уровень полез-

ного сигнала которых, соизмерим с уровнем пульсаций напряжения, возникающим от работы генератора. Таким образом, пульсации и импульсные отклонения напряжения, возникающие при совместной работе этих устройств, способны оказать существенное негативное влияние на эксплуатационно-технические свойства образца ТМСН [2, 4].

Установка разнообразных радиоэлектронных средств различных подсистем в ограниченном пространстве внутри системы усложняет электромагнитную обстановку (ЭМО), в которой работает электронная аппаратура, и увеличивает вероятность воздействия на среду передачи и обработки информации, что может привести к нарушениям функциональной безопасности образца. Все это привело к проблеме обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) электрооборудования (ЭО) ТМСН, с которой разработчики ранее не сталкивались. Как показывает практика, существующие методы и методики по определению и исследованию показателей качества электроэнергии (ПКЭЭ) в системах электроснабжения (СЭС) в полной мере не отражают данные показатели [4].

Одним из перспективных направлений развития методов и методик, и их совершенствования являются вероятностные методы определения и прогнозирования возникновения не допустимых значений пульсаций напряжения в СЭС ТМСН. В этом случае для при-

нятия и обоснования того или иного технического решения, направленного на обеспечение электромагнитной совместимости электрооборудования ТМСН, возникает необходимость определения по какому закону распределены электромагнитные помехи (ЭМП) в СЭС ТМСН (рис. 1).

Для определения вероятности возникновения ЭМП необходимо иметь измерительное оборудование, позволяющее формировать массивы данных измерений напряжения в исследуемых режимах работы ТМСН, с последующей математической обработкой.

Таким образом, установившиеся отклонения, пульсации, импульсы напряжения и другие величины, характеризующие ПКЭЭ, носят случайный характер и их измерение и последующая обработка должны базироваться на вероятностно-статистических методах.

Рассмотрим такой показатель как пульсация напряжения. Амплитуда пульсации напряжения в бортовой сети (БС) исследуемого объекта ТМСН является случайной величиной, которая зависит от многих факторов:

- оборотов и режима работы двигателя внутреннего сгорания машины;
- степени заряда аккумуляторных батарей;
- конструктивных особенностей генераторной установки;
- параметров бортовой сети и электрических фильтров;

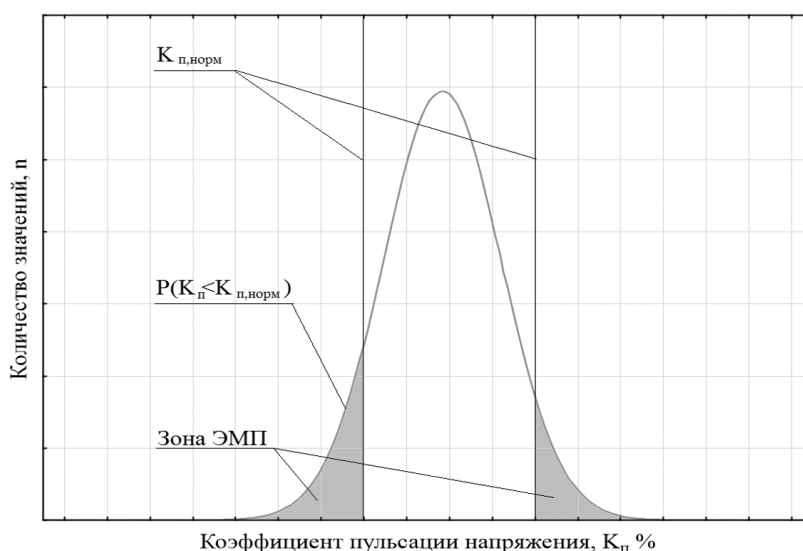


Рис. 1. Определение вероятности появления электромагнитных помех по пульсациям напряжения в СЭС

– искажающей мощности вентильных преобразователей и отношения этой мощности к мощности источников электроэнергии и др.

При выполнении исследования ЭМО в СЭС ТМСН необходимо определить режимы работы СЭС и оценить вероятность появления ЭМП по превышению нормируемых значений, таких как, пульсации напряжения. Одним из вариантов решения данной проблемы является определение вероятности выхода пульсации напряжения за допустимые значения по гистограмме.

Рассмотрим пример исследуемой ТМСН «Исеть-1» в основных эксплуатационных режимах работы опытного образца. При этом резерв мощности генераторной установки составил 56 % от номинальной мощности генератора, обороты двигателя внутреннего сгорания (ДВС) составили 1600 об./мин.

В ходе исследования были выполнены измерения переменной составляющей пульсирующего напряжения  $U_{\text{пул}}$  (рис. 2) на шинах главного распределительного устройства. Получена выборка измерений, равной 4096 значений  $U_{\text{пул}}$  с интервалом  $\Delta t$  равным  $10^{-3}$  с.

Преобразуем полученную выборку значений  $U_{\text{пул}}$  в значения коэффициента пульсации напряжения относительно номинального напряжения 24 В по формуле [3]:

$$K_i = \frac{U_{\text{пул},i}}{24} \cdot 100.$$

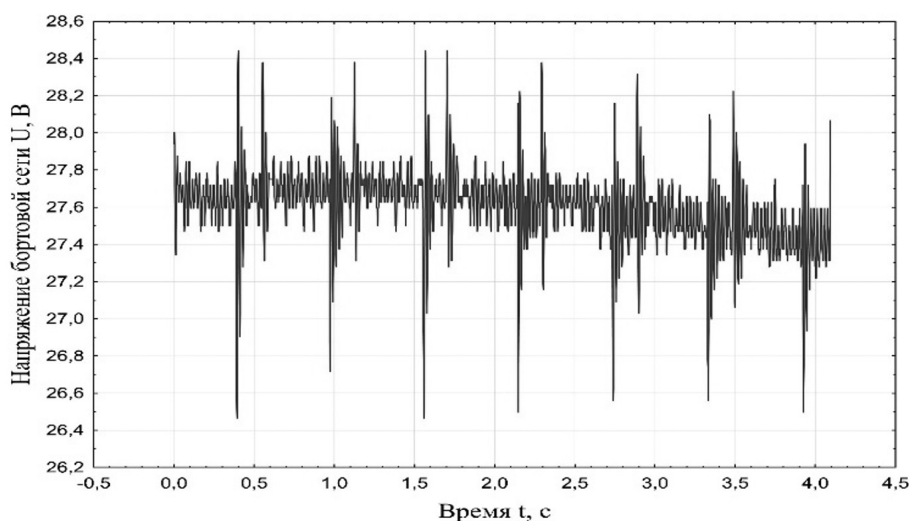


Рис. 2. Измерение переменной составляющей пульсирующего напряжения  $U_{\text{пул}}$

Исходя из полученных значений, выполняется группировка данных и определяется количество интервалов  $k$  по формуле Стерджеса [6]:

$$k \approx 1 + 3,322 \cdot \lg(n), \quad (1)$$

где  $n$  — объем статистической совокупности. При этом следует учитывать, что число интервалов должно находиться в пределах от 8 ... 25 при  $n \geq 50$ .

По формуле (1) определили количество интервалов  $k$ , оно составило 13. Исходя из этого, найдем ширину интервала  $h$  по формуле:

$$h = \frac{(K_{\text{max}} - K_{\text{min}})}{k},$$

где  $K_{\text{max}}$  и  $K_{\text{min}}$  максимальное и минимальное значение группированного признака в совокупности. Определим границы группы исходя из ширины интервала  $h$ . Для каждого значения ряда подсчитаем какое количество  $f_j$  раз оно попадает в тот или иной интервал.

В результате группировки построим гистограмму относительных частот изучаемого признака  $K_i$ , где  $K_i$  —  $i$ -е значение коэффициента пульсации напряжения бортовой сети с интервалом  $\Delta t$ , совмещенную с нормированными значениями коэффициента пульсации напряжения  $K_{\text{п.норм}}$  (рис. 3).

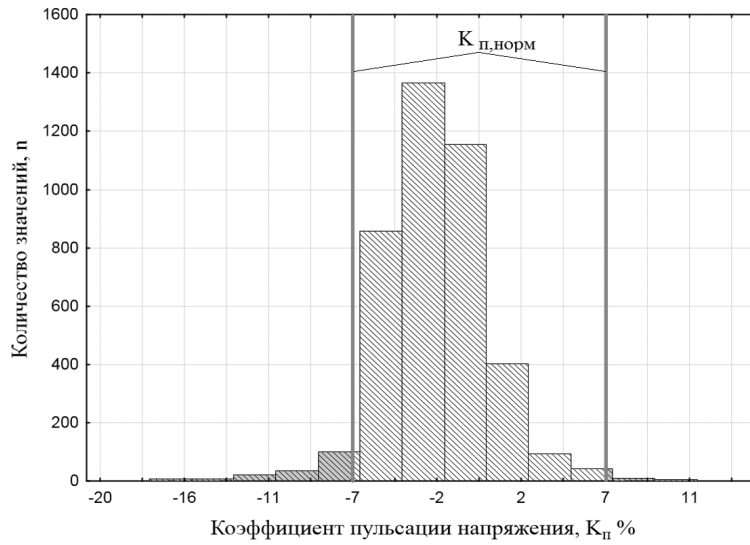


Рис. 3. Гистограмма плотности распределения

Совмещение границы интервала с нормируемым значением выполняется изменением ширины интервала  $h$  по формуле:

$$h_1 = \frac{(K_{\min} - K_{\text{п.норм}})}{k_{\text{гис}}}$$

Исходя из полученных значений, выполняется новая группировка данных и определяется число интервалов  $k_1$  по формуле:

$$k_1 \approx \frac{(K_{\max} - K_{\min})}{h_1}$$

Определим границы группы исходя из ширины интервала  $h_1$ . Для каждого значения ряда подсчитаем какое количество  $f_i$  раз оно попадает в тот или иной интервал. В результате группировки построим гистограмму относительных частот изучаемого признака  $K_i$ , в которой граница интервала совпадает с нормируемым значением рис. 4.

Теперь определим вероятность выхода коэффициента пульсации напряжения за допустимые значения за счет подсчета количества  $f_j$ , которое попало в тот интервал из 5 гистограмм, от общего количества значений  $n$  по формуле:

$$P = \sum_{j=1}^{k_1} f_j \cdot \frac{100}{n}$$

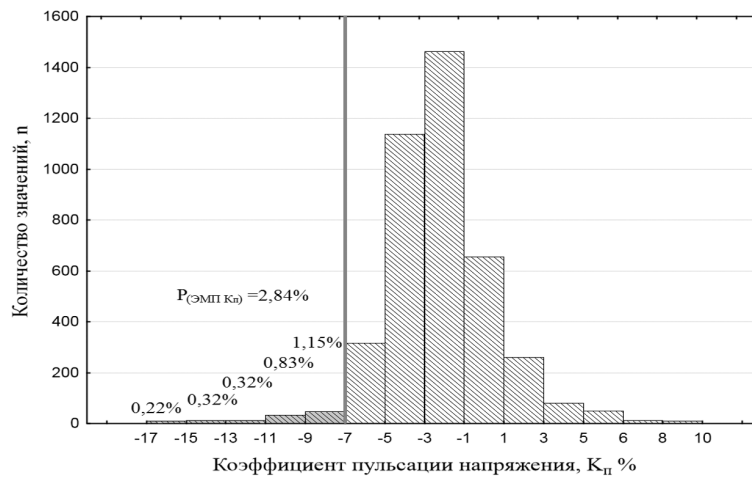


Рис. 4. Гистограмма относительных частот изучаемого признака  $K_i$  и нормируемого значения коэффициента пульсации

Таким образом, мы определили вероятность возникновения ЭМП исследуемой ТМСН в заданных режимах работы  $P_{(\text{ЭМП,КПН})}$  (равно 2,84 %). Но данный способ не дает полного представления о происходящих процессах ограничиваясь памятью осциллографа по сохранённому массиву данных. Тем самым, при рассмотрении теории подавления ЭМП ставится задача о проведении статистической проверки гипотез показателей качества электроэнергии (в частности, коэффициента пульсаций напряжения) и определения его параметров. При наличии установленной связи технических параметров и математического ожидания коэффициента пульсации напряжения (КПН), воздействуя на отдельные параметры, мы можем достичь необходимой помехоустойчивости системы.

Разработка гипотезы о законе распределения случайной величины КПН позволяет определить вероятность возникновения ЭМП, сделать выводы о степени помехоустойчивости элементов СЭС и вероятной величине негативного воздействия на ЭО ТМСН.

Так как данная выборка значений соответствует бесконечному числу независимых факторов, сформируем гипотезу, что выборка значений распределена по нормальному закону распределения. Проверим статистическую гипотезу с использованием критерия согласия Пирсона [6, 7], а также по интервальной оценке нижней и верхней доверительной границе  $\pm 95\%$ , о том,

что эмпирические данные соответствуют нормальному закону распределения.

Построим теоретическую кривую  $P(K)$  нормального распределения (рис. 5) и проверим соответствие эмпирического и теоретического распределений по критерию Пирсона  $\chi^2$ .

Расчеты производились в программе Ststatistica 10 и наименьшее значение  $\chi^2$  составило 835,36 на интервале  $k$ , равном 12. Также при проверке нормального закона распределения с помощью интервальной оценки с нижней и верхней доверительной границей  $\pm 95\%$  видно, что функция нормального закона распределения не попадает в доверительные границы эмпирических значений рис. 6.

Наблюдаемое значение статистики Пирсона  $\chi^2$  попадает в критическую область, поэтому есть основание отвергнуть нулевую гипотезу. Таким образом, на основании проверки распределения, можно сделать вывод, что эмпирические значения переменной  $K_j$  не подчиняются нормальному закону распределения.

Рассматривая эмпирические значения, на рис. 7 видно, что данные значения соответствуют смеси распределения Гаусса, с англ. Gaussian mixture model GMM (это сумма двух вероятностей по нормальному закону распределения) и не попадают в критическую область, поэтому нет оснований отвергать гипотезу [6].

Результат проверки распределения с помощью интервальной оценки с нижней и верхней

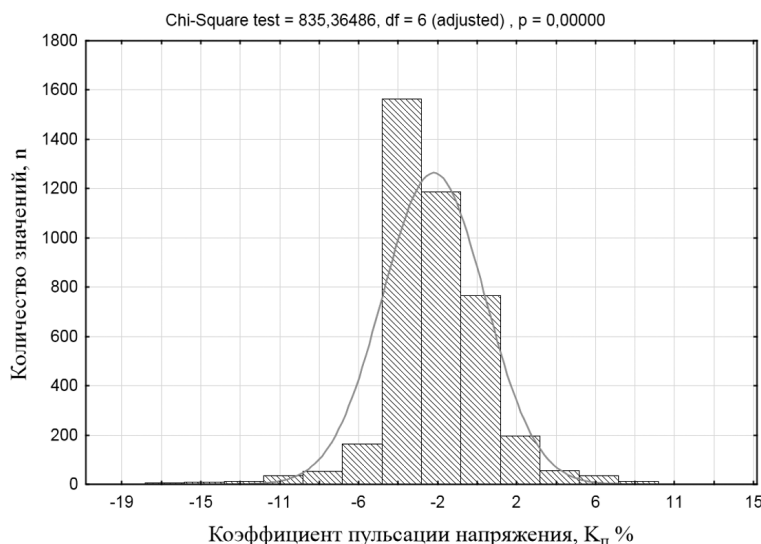


Рис. 5. Функция нормального распределения Гаусса и гистограмма коэффициента пульсации напряжения



Рис. 6. График нижней и верхней границы доверительного интервала с доверительной вероятностью  $\pm 95\%$  относительно эмпирических значений и функции нормального закона распределения, не попавшей в эти границы

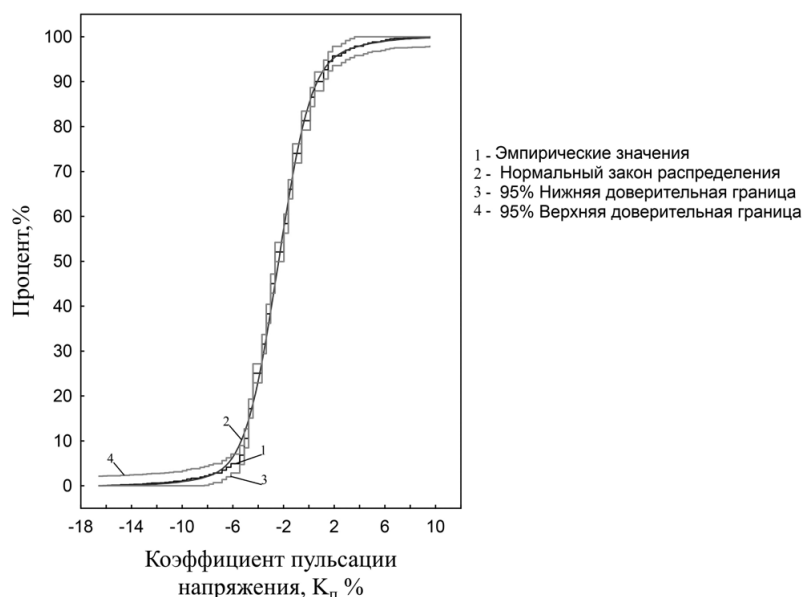


Рис. 7. График нижней и верхней границы доверительного интервала с доверительной вероятностью  $\pm 95\%$  относительно эмпирических значений и функции смешанного закона распределения Гаусса попавшего в эти границы

доверительной границей  $\pm 95\%$  показал, что при большем значении данных эмпирической выборки можно утверждать, что пульсации напряжения соответствуют смеси распределения Гаусса [6], что видно из графиков: функция 2 попадает в доверительные границы эмпирических значений 3, 4 (рис. 7.)

### Выводы

Таким образом, такие показатели качества электроэнергии, как пульсации напряжения в ЭО специальной техники, могут быть определены статистическими методами с определенной доверительной точностью в заданных пределах с

использованием смеси законов распределения Гаусса. Данный метод реализован в программе для ЭВМ «Программа для регистрации и записи пульсаций напряжения в бортовой сети специальной техники» [7, 8]. При установленных связях между техническими параметрами электрооборудования специальной техники (мощность генераторной установки, параметры бортовой сети, фильтров и т.д.) и стохастическими характеристиками случайного процесса появления пульсаций напряжения в ЭО образца специальной техники, становится возможным определение технических параметров ЭО, при которых будут обеспечиваться нормируемые ПКН. Также, возможно обеспечить помехоустойчивость ЭО образца в целом.

### Литература

1. ГОСТ 92-4802-83 Совместимость электромагнитная. Восприимчивость радиоприемных устройств к помехам по цепям питания, коммутации, управления и по электромагнитному полю помимо антенны. Технические требования и методы испытаний // Гос. стандарт. 1983. 54 с.

2. Электромагнитная совместимость автотранспортных средств / Николаев П.А., Кечиев Л.Н. / Под ред. Л.Н. Кечиева. — М.: Грифон. 2015. 424 с.

3. ГОСТ 33991-2016 Электрооборудование автомобильных транспортных средств. Электромагнитная совместимость. Помехи в цепях питания. Требования и методы испытаний: введен 01.02.2018. — М.: Стандартинформ. 2017. 23 с.

4. Семенов А.В. Электромагнитная совместимость приборов электрооборудования вездеходов: дис. канд. техн. наук: 2009: защищена 2009 / Семеновым Алексеем Владимировичем. — М. 2008. 152 с.

5. ГОСТ Р 51317.4.14-2000 Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к колебаниям напряжения электропитания. Требования и методы испытаний // Гос. стандарт. 2000. 12 с.

6. Хамидуллин Р.Я. Теория вероятности и математическая статистика. — М.: Московский финансово-промышленный университет «Синергия». 2020. 276 с.

7. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической

статистики для технических приложений. — М.: Наука. 1969. 512 с.

8. Свид. о гос. рег. Пр ЭВМ 2020664184. Программа для регистрации и записи пульсаций напряжения в бортовой сети специальной техники. / Раджабов Д.В. Сидоренко А.А. [и др.] Заявка 2020663135. Дата заявки: 26.10.2020 г., опубли. 09.11.2020.

### References

1. GOST 92-4802-83. Electromagnetic Compatibility. The Susceptibility of Radio Receivers to Interference in the Power Supply, Switching, Control and Electromagnetic Field Circuits in Addition to the Antenna. Technical Requirements and Testing Methods // Gos. standart. 1983. 54 p.

2. Electromagnetic Compatibility of Motor Vehicles / Nikolaev P.A., Kechiev L.N. / edited by L.N. Kechieva. — M.: Grifon. 2015. 424 p.

3. GOST 33991-2016 Electrical Equipment of Motor Vehicles. Electromagnetic Compatibility. Interference in The Power Supply Circuits. Requirements and Testing Methods: introduced 01.02.2018. — M.: Standartinform. 2017. 23 p.

4. Semenov A.V. Electromagnetic Compatibility of All-Terrain Vehicle Electrical Equipment Devices: dissertation at the Cand. date of Technical Sciences. 2009: defended 2009 / Semenovym Aleksee Vladimirovichem. — M. 2008. 152 p.

5. GOST R 51317.4.14-2000. Electromagnetic Compatibility of Technical Means. Resistance to Power Supply Voltage Fluctuations. Requirements and Testing Methods // Gos. standart. 2000. 12 p.

6. Hamidullin R.Ya. Probability Theory and Mathematical Statistics. — M.: Moskovskiy finansovo-promyshlenny universitet «Sinergiya». 2020. 276 p.

7. Smirnov N.V., Dunin-Barkovskiy I.V. Course of Probability Theory and Mathematical Statistics for Technical Applications. — M.: Nauka. 1969. 512 p.

8. Certificate of the State registration. Pr EVM 2020664184. Program for Detection and Recording Voltage Pulsations in the Onboard Network of Special Equipment / Radzhabov D.V. Sidorenko A.A., et al. № 2020663135. Data: 26.10.2020. Publ. 09.11.2020.