

ты приборов М-типа, которые дадут возможность уменьшить уровень шумов и побочных колебаний и тем самым обеспечить выполнение современных требований к ЭМС радиоэлектронных средств.

Аналогичные теоретические результаты до настоящего времени отсутствовали. Экспериментальные спектры колебаний электронного потока в магнетронных диодах, наподобие приведенных в работе [9] и ей подобных, не позволяют выяснить физическую природу лежащих в их основе механизмов.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на поиск способов устранения данных эффектов или снижения их влияния на качество спектра выходного сигнала приборов М-типа.

**Литература:** 1. *Побочные колебания в электронных приборах СВЧ* / Под ред. М.Б. Цейтлина. М.: Радио и связь, 1984. 152 с. 2. *MacGregor D.M.* Computer modeling of crossed-field tubes // *Appl. of Surface Sci.* 1981. V. 8. P. 213-224. 3. *Грицунов А.В., Шейн А.Г.* Моделирование на ЭВМ переходных процессов при взаимодействии электронного потока с обратной волной в усилителях М-типа с распределенной эмиссией // *Радиотехника.* 1983. Вып. 65. С. 93-99. 4. *Грицунов А.В.* Моделирование нестационарных режимов СВЧ-усилителей типа М с распределенной эмиссией // *Радиотехника.* 1984. Вып. 70. С. 90-100. 5. *Gritsunov A.V., Nikitenko O.M.* Probable sources of a noise in crossed-field devices. I. Non-generating tubes // *Proc. Fourth IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC 2003).* Seoul. 2003. P. 246-247. 6. *Gritsunov A.V., Nikitenko O.M.* Probable sources of a noise in crossed-field devices. II. Generating tubes // *Ibid.* P. 248-249. 7. *Грицунов А.В.* О спектральном подходе к моделированию СВЧ-приборов // *Радиотехника и электроника.* 2004. Т. 49, № 7. С. 882-885. 8. *Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями.* Т. 1. Основные элементы приборов / Под ред. М.М. Федорова. М.: Мир, 1961. 556 с. 9. *Yamamoto K., Kuronuma H., Koinuma T., Tashiro N.* A study of magnetron noise // *IEEE Trans. Electron Dev.* 1987. V. ED-34. P. 1223-1226. 10. *Калинин В.И.* Генерирование дециметровых и сантиметровых волн. М.: Связьиздат, 1948. 278 с. 11. *Грицунов А.В.* Адаптивный метод комплексных амплитуд в спектральных моделях СВЧ-приборов // *Материалы 11-й междунар. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2001).* Севастополь: «Вебер». 2001. С. 224-227. 12. *Gritsunov A.V.* The

spectral approach to solving of EMC problems at microwave tubes simulation // *Proc. 16th Int. Wroclaw Symp. and Exhibition on Electromagnetic Compatibility.* V. 1. Wroclaw. 2002. P. 139-144. 13. *Glass R.C., Sims G.D., Stainsby A.G.* Noise in cut-off magnetrons // *Proc. IEE.* 1955. V. 102, part B. P. 81-86. 14. *Грицунов А.В., Галаган А.В.* О группировке электронного потока в скрещенных полях // *Тез. докл. науч.-техн. конф. «Электронное приборостроение».* Новосибирск: НЭТИ. 1988. С. 62. 15. *Байбурин В.Б., Терентьев А.А., Сысуев А.В. и др.* «Нулевой» ток в приборах М-типа и самоподдерживающиеся электронные сгустки // *Письма в ЖТФ.* 1998. Т. 24. Вып. 12. С. 57-62. 16. *Агафонов А.В., Тараканов В.П., Федоров В.М.* Динамика нарушения магнитной изоляции и самоорганизация электронного потока в магнетронном диоде // *Журнал техн. физики.* 2004. Т. 74. Вып. 1. С. 93-103. 17. *Паньшин В.В.* О фазовом механизме нарастания вторично-электронного потока в приборах магнетронного типа с катодом в пространстве взаимодействия // *Электрон. техника. Сер. 1. Электроника СВЧ.* 1968. Вып. 11. С. 26-40. 18. *Бронштейн И.М., Фрайман Б.С.* Вторичная электронная эмиссия. М.: Наука, 1969. 408 с. 19. *Thomas G.E., Bollen W.M., Kaup D.J., et al.* A new interpretation of the time evolution of the RF electric field in a crossed-field device // *Int. Electron Dev. Meet. Washington, DC.* 1985. P. 180-183. 20. *Chernin D.P.* Computer simulations of low noise states in a high-power crossed-field amplifier // *IEEE Trans. Electron Dev.* 1996. V. 43. P. 2004-2010. 21. *Моисов Г.Г.* Исследование электромагнитных шумов в магнетроне с помощью двумерного компьютерного моделирования // *Материалы междунар. конф. «Современные проблемы электроники и радиофизики СВЧ».* Саратов: ГосУНЦ «Колледж». 2001. С. 114-115. 22. *Магнетроны сантиметрового диапазона.* Т. 2 / Под ред. С.А. Зусмановского. М.: Сов. радио, 1951. 472 с. 23. *Козорезов Г.Г.* Режимы работы амплитронного СВЧ-усилителя при аномально высоких значениях магнитного поля // *Изв. Академии наук РФ. Сер. Физическая.* 2001. Т. 65. С. 1708-1711.

Поступила в редколлегию 06.04.2005

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф. Чумаков В.И.

**Грицунов Александр Валентинович**, канд. техн. наук, доцент кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: радиофизика и физическая электроника. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, e-mail: gritsunov@kture.kharkov.ua, тел.: (057) 702-13-62.

УДК 621.317.08

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ АНАЛИЗА ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ

*ЗАХАРОВ И.П., САФАРЯН Г.Г.,  
СЕРГИЕНКО М.П.*

Методом Монте-Карло исследуется корректность применения аналитических выражений для определения математического ожидания и среднего квадратичес-

кого отклонения погрешности вычисления коэффициента несинусоидальности напряжения электрической сети в широком диапазоне изменения аддитивных шумов и нестабильности частоты измеряемого переменного напряжения.

**Введение.** Низкое качество электрической энергии приводит к значительным потерям мощности и энергии в электрических сетях и другим негативным последствиям для потребителей электрической энергии [1]. Основные показатели качества электроэнергии (ПКЭ) нормированы ГОСТ 13109-97 [2]. Одной из актуальных задач, возникающих при контроле качества электроэнергии, является метрологическое обеспечение измерения ПКЭ.

Анализ приведенных в [2-4] способов вычисления основных и дополнительных ПКЭ показывает, что в их основе лежат нелинейные операции возведе-

ния в степень (извлечение корня). Кроме того, параметры, с которыми производят эти операции (действующие значения фазных и междуфазных напряжений), сами являются функционалами процесса изменения напряжения. Именно поэтому для определения ПКЭ разработаны и реализованы цифровые измерители различной конструкции [3, 4]. В основе их работы лежат алгоритмы быстрого преобразования Фурье и цифровой фильтрации.

Преобразования, применяемые во всех перечисленных способах вычисления и алгоритмах преобразования, приводят к трансформации [5] и композиции [6] законов распределения погрешностей измерения в дискретных временных точках, что затрудняет анализ погрешностей измерения ПКЭ.

При оценке погрешности измерения ПКЭ с помощью цифровых измерителей обычно используют аналитические методы [3], которые, в силу сложности исходных алгоритмов, весьма громоздки в реализации и часто дают приближенные результаты вследствие представления функции погрешности первым членом разложения в ряд Тейлора. Недостатком аналитических методов также является отсутствие возможности получить закон распределения погрешности, необходимый для корректной оценки ее доверительного интервала.

Избежать указанных недостатков оценивания погрешностей можно, воспользовавшись методом Монте-Карло [7].

*Цель работы* – оценка точности определения коэффициента несинусоидальности напряжения как фактора, оказывающего большое влияние на качество электроэнергии.

*Задачей* исследования является выяснение корректности применения выражений для оценки математического ожидания и среднего квадратического отклонения (СКО) погрешности измерения коэффициента несинусоидальности напряжения в следующих ситуациях:

- 1) при наличии нормально распределенного шума в исследуемом сигнале;
- 2) при ограниченном количестве выборок на период первой гармоники исследуемого сигнала;
- 3) при отклонении частоты сети от номинального значения.

**Основное содержание исследования.** Измерение коэффициента несинусоидальности напряжения в соответствии с [3] производится по формуле

$$k_{\text{нс}} = \sqrt{\frac{2}{m} \sum_{q=0}^{m-1} \left[ \frac{u(t_q)}{U_{\text{макс}}} - \sin(\omega t_q + \psi_1) \right]^2}, \quad (1)$$

где  $m$  – количество выборок на период первой гармоники исследуемого напряжения;  $u(t_q)$  – мгновенные значения исследуемого напряжения в точках дискретизации  $t_q$ ;

$$U_{\text{макс}} = \frac{2}{m} \sum_{q=0}^{m-1} u(t_q) \sin(\omega t_q + \psi_1) -$$

амплитудное значение первой гармоники исследуемого сигнала;  $\psi_1$  – начальная фаза первой гармоники исследуемого сигнала.

В работе [3] авторы путем математических преобразований получают в аналитическом виде значение математического ожидания погрешности определения коэффициента несинусоидальности в виде

$$M(\Delta k_{\text{нс}}) = \frac{\sigma^2}{2U_1^2} \left[ \frac{m-2}{mk_{\text{нс}}^2} - \frac{2}{m} \right] k_{\text{нс}} \quad (2)$$

и приближенное значение ее дисперсии:

$$D(\Delta k_{\text{нс}}) = \frac{(\delta \xi_1)^2}{m} (k_{\text{нс}}^2 + 1), \quad (3)$$

где  $\sigma$  и  $\delta \xi_1 = \frac{\sigma}{U_1}$  – соответственно СКО абсолютной погрешности измерения мгновенных значений напряжения (т.е. СКО аддитивного шума) и его приведенное к действующему значению первой гармоники напряжения значение.

Численное моделирование измерительного процесса в целях проверки адекватности выражений (2), (3) производилось нами по следующему алгоритму.

На первом этапе вычислялись выборки исследуемого сигнала в дискретных точках:

$$u(t_q) = 220\sqrt{2} \left[ \sin(\omega t_q) + \sum_{i=2}^{40} \frac{k_i}{100} \sin(i\omega t_q) \right], \quad (4)$$

где  $k_i$  – коэффициент  $i$ -й гармонической составляющей исследуемого напряжения (в процентах).

Затем к значениям, полученным по формуле (4), добавлялся распределенный по нормальному закону шум с заданным СКО и нулевым математическим ожиданием. Количество случайных чисел в последовательности равно числу выборок на период первой гармоники исследуемого напряжения. Количество последовательностей случайных чисел в ходе моделирования было выбрано 20 000 для устранения влияния ограниченности выборки на гистограмму получаемого закона распределения. Из полученных последовательностей вычислялись среднее арифметическое и СКО коэффициента несинусоидальности по формуле (1). Разность между полученным средним арифметическим оценок коэффициента несинусоидальности и его заданным при моделировании значением представляет собой оценку математического ожидания погрешности коэффициента несинусоидальности.

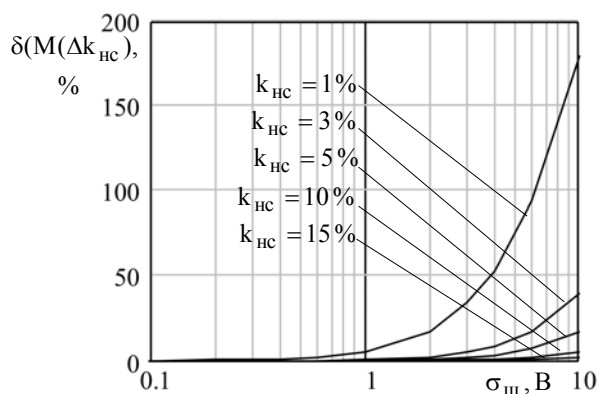
Погрешности определения математического ожидания и СКО погрешности измерения коэффициента несинусоидальности вычислялись по формулам

$$\delta(M(\Delta k_{\text{нс}})) = \frac{M(\Delta k_{\text{нс}}) - \tilde{M}(\Delta k_{\text{нс}})}{\tilde{M}(\Delta k_{\text{нс}})} \cdot 100\%,$$

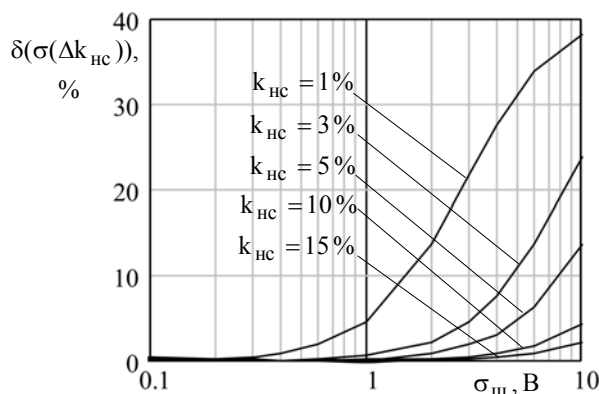
$$\delta(\sigma(\Delta k_{\text{нс}})) = \frac{\sigma(\Delta k_{\text{нс}}) - \tilde{\sigma}(\Delta k_{\text{нс}})}{\tilde{\sigma}(\Delta k_{\text{нс}})} \cdot 100\%,$$

здесь  $M(\Delta k_{nc})$ ,  $\sigma(\Delta k_{nc})$  – математическое ожидание и СКО погрешности нахождения коэффициента несинусоидальности напряжения, рассчитанные по формулам (2) и (3), где  $\sigma(\Delta k_{nc}) = \sqrt{D(\Delta k_{nc})}$ ;  $\tilde{M}(\Delta k_{nc})$ ,  $\tilde{\sigma}(\Delta k_{nc})$  – математическое ожидание и СКО погрешности нахождения коэффициента несинусоидальности напряжения, определенные при помощи метода Монте-Карло.

Зависимости этих погрешностей от СКО шума  $\sigma_{ш}$  для разных значений коэффициента несинусоидальности при 128 выборках на период исследуемого сигнала показаны на рис. 1.



а



б

Рис. 1. Зависимости погрешностей определения математического ожидания (а) и СКО (б) погрешности измерения коэффициента несинусоидальности от СКО шума

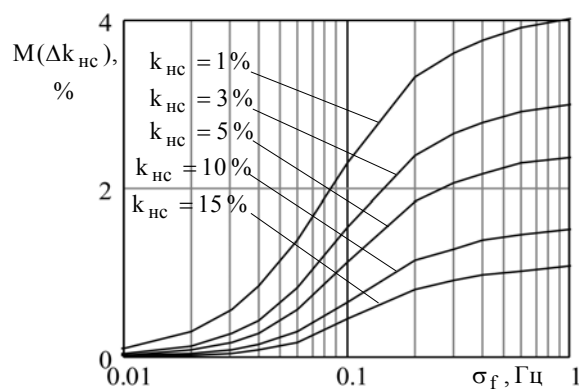
Анализ полученных данных показывает, что с ростом СКО шума проявляются отличия в аналитических и численных методах оценки математического ожидания и СКО погрешности коэффициента несинусоидальности напряжения. Для оценки математического ожидания выражение (2) неадекватно также для малых значений коэффициента несинусоидальности. При этом закон распределения коэффициента несинусоидальности во всех случаях остается нормальным с нулевыми асимметрией и эксцессом и не зависит от закона распределения шума.

Была исследована зависимость СКО погрешности коэффициента несинусоидальности напряжения  $\tilde{\sigma}(\Delta k_{nc})$  от количества выборок на период первой

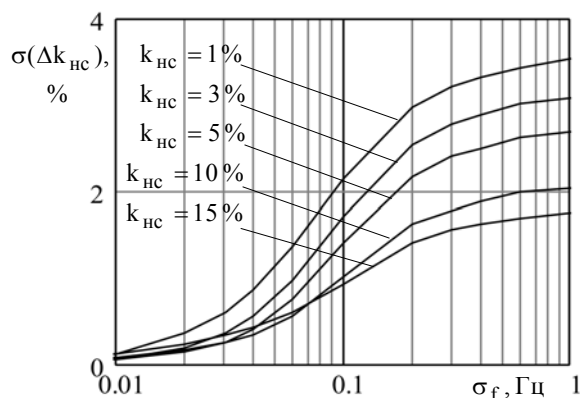
гармоники исследуемого сигнала. Она убывает с увеличением  $m$ , и может быть с достаточной точностью аппроксимирована выражением

$$\tilde{\sigma}(\Delta k_{nc}) = \frac{\sigma_{ш}}{300\sqrt{m}}.$$

Таким образом, при 128 выборках на период первой гармоники  $\tilde{\sigma}(\Delta k_{nc}) = 3 \cdot 10^{-4} \sigma_{ш}$ , что является удовлетворительным, поскольку далее погрешность результата вычислений уменьшается не столь значительно, а затраты аппаратных ресурсов при вычислении становятся достаточно большими.



а



б

Рис. 2. Зависимости математического ожидания (а) и СКО (б) погрешности определения коэффициента несинусоидальности от СКО частоты сети

Рассмотрим влияние отклонения частоты сети на математическое ожидание и СКО погрешности определения коэффициента несинусоидальности при использовании выражений (2) и (3). В предположении равномерного распределения частоты сети с нулевым математическим ожиданием зависимости математического ожидания и СКО погрешности определения коэффициента несинусоидальности от СКО частоты сети показаны на рис. 2. Закон распределения этой погрешности существенно отличен от нормального и более соответствует искаженному арксинусному [6].

**Выводы.** По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Исследования аналитических выражений для определения математического ожидания и среднего

квадратического отклонения погрешности определения коэффициента несинусоидальности напряжения электрической сети показали, что их корректное применение допустимо при ограниченных значениях коэффициента несинусоидальности и СКО аддитивных шумов.

2. Нестабильность частоты измеряемого переменного напряжения при определенных условиях может быть доминирующей в бюджете погрешности измерения коэффициента несинусоидальности и поэтому требует обязательного учета.

3. Метод Монте-Карло можно рассматривать как универсальный при исследовании погрешностей измерения ПКЭ. Недостатком этого метода являются его собственные погрешности при оценке малых значений погрешностей коэффициента несинусоидальности, вызванных неидеальностью генерации случайных чисел. Снижение этих погрешностей возможно наращиванием объема выборки или усовершенствованием способов генерации случайных чисел.

*Научная новизна* проведенных исследований состоит в определении границ применимости приведенных в [3] формул для оценки математического ожидания и СКО погрешности определения коэффициентов несинусоидальности напряжений. Для больших значений коэффициентов несинусоидальности используемые на практике выражения (2) и (3) не являются точными, что может послужить причиной неправильного определения коэффициента несинусоидальности.

*Практическая значимость* полученных результатов заключается в возможности получения методом Монте-Карло закона распределения погрешности коэффициента несинусоидальности и достоверной оценки ее границ. Показана зависимость математического ожидания и СКО погрешности определения коэффициента несинусоидальности от СКО частоты сети, что также необходимо принимать во внимание при метрологическом обеспечении измерителей нелинейных искажений.

**Литература:** 1. *Липский А.М.* Качество электроснабжения промышленных предприятий. К.: Вища шк. Головное изд-во, 1985. 160 с. 2. *ГОСТ 13109-97.* Электрическая энергия. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Изд-во стандартов, 1998. 31 с. 3. *Горлач А.А., Милиц М.Я., Чинков В.Н.* Цифровая обработка сигналов в измерительной технике. К.: Техника, 1985. 151 с. 4. *Гриб О.Г., Захаров И.П., Карпенко К.М., Сафарян Г.Г., Сергиенко М.П.* Метод измерения несимметрии напряжения при наличии помех в трехфазной сети // Теория и техника передачи, приема и обработки информации: Сб. науч. трудов 8 Международной конференции, Харьков, 2002. С.151–153. 5. *Захаров И.П., Штефан Н.В.* Трансформация законов распределения погрешностей при нелинейном преобразовании // Радиотехника (Харьков), 2000. Вып. 113. С. 58–61. 6. *Захаров И.П., Сафарян Г.Г.* Определение доверительных границ композиции арксинусных законов распределения // Радиотехника. 2004. Вып. 136. С.27–31. 7. *Захаров И.П., Штефан Н.В.* Применение метода Монте-Карло для реализации алгоритмов статистической обработки результатов измерительного эксперимента // Украинський метрологічний журнал. 2004. № 1. С.8.–13.

Поступила в редколлегию 10.06.2005

**Рецензент:** д-р техн. наук Павленко Ю. Ф.

**Захаров Игорь Петрович**, канд. техн. наук, доцент кафедры метрологии и измерительной техники ХНУРЭ. Научные интересы: метрологическая идентификация многопараметрических средств измерений. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 702-13-31.

**Сафарян Григорий Гагикович**, аспирант кафедры метрологии и измерительной техники ХНУРЭ. Научные интересы: исследование погрешностей вычислительных операций при цифровой обработке сигналов. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 702-13-31.

**Сергиенко Марина Петровна**, аспирантка кафедры метрологии и измерительной техники ХНУРЭ. Научные интересы: исследование методов и алгоритмов измерения динамических характеристик апериодических средств измерений. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 702-13-31.