

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ В ДЕЙСТВУЮЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Коломытцев А.Д., Майоров А.Л.

Донецкий национальный технический университет

EMS_mag@mail.ru

The estimation of voltage nonsinusoidality by periodic and random character of voltage sinusoid derivation is considered in this paper. That is made by devices the work principle of which is based on appearance of interference as Fourier series. Deviation of measurement is estimated by interference dispersion.

Исследования несинусоидальности напряжения, проводимые в действующих электрических сетях, показывают, что искажения синусоиды напряжения носят, как правило, случайный характер [1,2]. Поэтому оценка качества напряжения по величинам коэффициентов несинусоидальности, нормируемым в [4], является неопределенной, поскольку эти показатели предполагают периодический характер искажений. Очевидно, что применение приборов, измеряющих эти коэффициенты и использующих принцип разложения в ряд Фурье, приведет к погрешности в оценке качества напряжения [3]. Таким образом актуальными становятся вопросы возможности использования таких приборов для экспериментальных исследований, а также эквивалентирования случайных искажений для их сравнения с требованиями [4].

Получаемые с помощью измерителей несинусоидальности (ИН) статистические характеристики зависят не только от вида процесса $u(t)$ изменения мгновенных значений напряжения, но и от параметров ИН. При планировании экспериментальных исследований и использовании результатов измерений необходимо оценивать погрешность, вносимую ИН [3].

Отличие формы кривой напряжения от синусоидальной будем называть помехой. В общем случае помеха – это процесс $u_n(t)$ на выход идеального фильтра, пропускающего без искажений сигналы на частотах ω ,

больших основной $\omega_1 = 2\pi f$, где $f = 50$ Гц.

Можно считать, что ИН не пропускает сигналы с частотой меньше основной, а его узкополосные фильтры настроены на частоты $\omega_v = v \cdot \omega_1$ ($v = 2, 3, \dots$), кратные ω_1 . То есть, эти фильтры имеют амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) (рис. 1), максимумы которых $A_v(\omega_v) = 1$.

Для упрощения АЧХ фильтров могут быть заменены прямоугольниками единичной высоты, основанием которого является энергетическая полоса пропускания χ_v фильтра, определяемая из условия эквивалентности площадей фактической

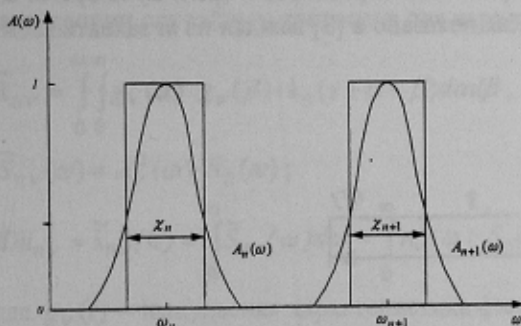


Рисунок 1 - Амплитудно-частотные характеристики фактического и идеального фильтров

и прямоугольной АЧХ.

Предположим, что помеха имеет периодический характер. В этом случае она может быть представлена дискретным спектром гармонических составляющих $u_n(t) = \sum_v u_v(t)$

В стационарном состоянии достаточным условием ИН является непересекаемость АЧХ смежных частот настройки, т.е. АЧХ любого фильтра должна обращаться в нуль на участках $\pm \omega_1/2$ относительно ω_v , так что $\chi_v \leq \omega_1$. ИН будет измерять действующие значения процессов $\tilde{U}_v(t)$ на выходе каждого фильтра за время $t_f = 1/f$. Проведя измерения на всех частотах, можно определить величину коэффициента несинусоидальности

$$\tilde{K}_{нс} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^n \tilde{U}_v^2}}{U_1} \quad (1)$$

Погрешность определения будет зависеть только от числа n учитываемых гармоник:

$$\delta_n = \frac{\tilde{K}_{нс}}{K_{нс}} - 1 = \sqrt{\frac{\sum_{v=2}^n \tilde{U}_v^2}{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}} - 1 \quad (2)$$

Любая гармоника с амплитудой $U_{\max v}$ имеет нулевое среднее значение и дисперсию $Du_v = U_{\max v}^2 / 2 = U_v^2$. Поэтому выраженная в о.е. дисперсия помехи

$$Du_v = \sum_v Du_v = \sum_v U_v^2 \quad (3)$$

совпадает с нормируемым в [4] коэффициентом несинусоидальности. Физический смысл Du_n заключается в том, что она пропорциональна энергии гармоник, выделяемой на активном сопротивлении. С учетом (3) относительная погрешность (2) может быть определена как

$$\delta_n = \sqrt{D\tilde{u}_n / Du_n} - 1 \quad (4)$$

При периодических изменениях напряжения основной частоты с циклом t_u в ряд Фурье входят гармонические составляющие (назовем их μ -гармоники) частоты которых кратны $\omega_\mu = 2\pi/t_u$. При больших циклах ($t_u \gg t_f$) спектр μ -гармоник практически не попадает в полосу частот больших ω_1 , поэтому ИН не воспринимает полезный сигнал как помеху. Измерения будут производиться теоретически точно, поскольку $\tilde{U}_v = U_v$, а погрешности возникают из-за ограниченного количества N учитываемых гармоник и отклонений Δf частоты. Линии фактического спектра при уменьшении частоты будут сдвинуты влево относительно частот настройки на величины $2\pi v \cdot \Delta f$ тем больше, чем больше номер гармоники. Поэтому, погрешность будет равна

$$\delta_n = \sqrt{\frac{\sum_{v=2}^N U_v^2 \cdot A_v^2 \cdot (\omega_v - 2\pi v \cdot \Delta f)}{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}} - 1.$$

Если же t_u будет соизмерим с t_f , то требование непересекаемости АЧХ уже не будет являться достаточным. Например, при идеальном широтно-импульсном управлении тиристорами (рис. 2) за время включения t_g и t_u укладываются целое число B периодов синусоиды. Как показано в [3] каждая из m захватываемых АЧХ

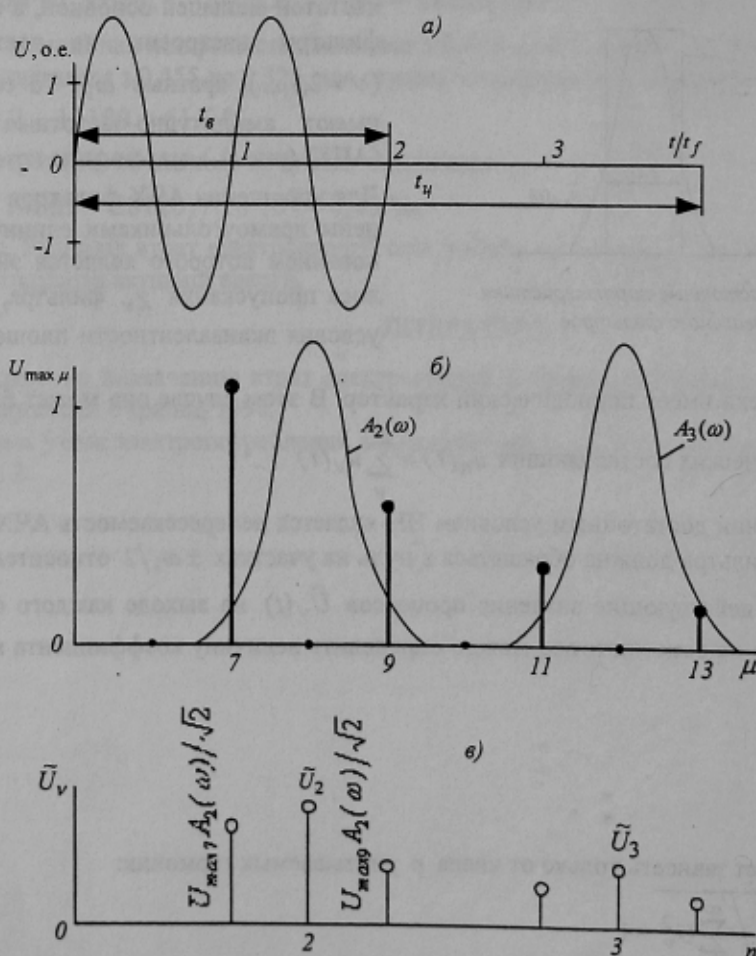


Рисунок 2 - Механизм возникновения погрешности измерения уровней гармоник напряжения анализатором гармоник

μ -гармоник преобразуется фильтром в гармоническую составляющую амплитудой $U_{\max \mu} \cdot A_v(\omega)$. На выходе ИН будут показания:

$$\tilde{U}_v = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{\mu} U_{\max \mu}^2 \cdot A_v^2(\omega)},$$

хотя теоретически $U_v = U_{\max v} / \sqrt{2} = 0$. Для обеспечения точности измерений необходимо, чтобы АЧХ каждого фильтра обращалась в нуль на интервале $\pm \omega_c / 2$ относительно ω_v , так что $\chi_v \leq \omega_1 / B$.

Таким образом при строго периодических помехах надлежащим выбором АЧХ фильтров ИН можно обеспечить достоверность оценок несинусоидальности напряжения.

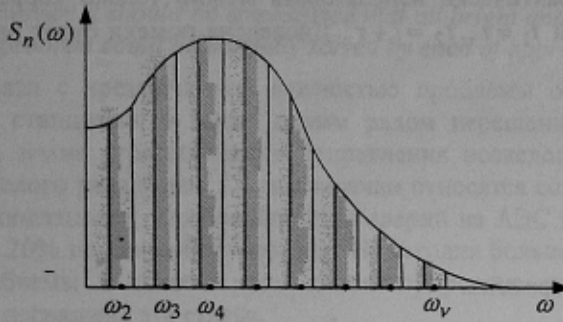


Рисунок 3 - График спектральной плотности напряжения помехи

Перейдем к рассмотрению случайных помех. В этом случае понятия гармоник не существует, что исключает возможность применения формул (1-3). Если помеха представляет собой стационарный случайный процесс с независимыми от времени характеристиками, то применительно к выражению (4) достаточно задать корреляционную функцию $k_n(\tau)$ или спектральную плотность $S_n(\omega)$ помехи. Дисперсия помехи

$$Du_n = k_n(0) = \int_0^{\infty} S_n(\omega) d\omega$$

геометрически равна площади под графиком $S_n(\omega)$ (рис. 3).

В установившемся режиме на выходе ИН будут показания $\tilde{U}_v = const$. В соответствии с общими формулами теории случайных процессов для характеристик процесс $\tilde{u}_n(t)$ на выходе ИН получим выражения

$$\tilde{k}_{nv} = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} g_v(\alpha) \cdot g_v(\beta) \cdot k_n(\tau + \alpha - \beta) d\alpha d\beta,$$

$$\tilde{S}_{nv}(\omega) = A_v^2(\omega) \cdot S_n(\omega); \quad (4)$$

$$D\tilde{u}_{nv} = \tilde{k}_{nv}(0) = \int_0^{\infty} \tilde{S}_{nv}(\omega) d\omega = \int_0^{\infty} A_v^2(\omega) \cdot S_n(\omega) d\omega. \quad (5)$$

где $g_v(t)$ – импульсная характеристика фильтра; α и β – переменные интегрирования.

Так как длительность колебаний помехи намного меньше t_f , то показания ИН $\tilde{U}_v = \sqrt{D\tilde{u}_{nv}}$.

Геометрический смысл показаний ИН наглядно прослеживается в случае идеального узкополосного фильтра, у которого в пределах полосы пропускания χ_v АЧХ равна единице. Учитывая (5), получим

$$\tilde{S}_{nv}(\omega) = A_v^2(\omega) \cdot S_n(\omega_v) = S_n(\omega_v).$$

Для такого фильтра величина $D\tilde{u}_{nv}$ (5) равна площади $\chi_v S_n(\omega_v)$, вырезаемой из графика спектральной плотности прямоугольником АЧХ (рис. 3). Если χ_v мала и в пределах этой полосы пропускания спектральная плотность может быть линеаризована, то величина $D\tilde{u}_{nv}$ пропорциональна значению этой спектральной плотности $S_n(\omega_v)$ при частоте настройки фильтра ω_v . Поэтому

$$\tilde{U}_v \approx \sqrt{\chi_v S_n(\omega_v)} \quad (6)$$

Несинусоидальность стационарной помехи оценивается по дисперсии

$$D\tilde{u}_n = \int_0^{\infty} \tilde{S}_n(\omega) d\omega. \quad (7)$$

Соотношения (3) и (7) подчеркивают принципиальное отличие непериодической помехи от периодической, обусловленное необходимостью перехода от ряда к интегралу Фурье. Величины выражения (6) нельзя считать "уровнями гармоник", так как понятие гармоники для случайных процессов не существует. Если формально оценить несинусоидальность по (3)

$$D\tilde{u}_n = \tilde{k}_{nc} = \sqrt{\sum_{v=2}^N \tilde{U}_v^2} \approx \sqrt{\sum_{v=2}^N \chi_v S_n(\omega_v)},$$

то будет допущена погрешность

$$\delta_n = \frac{1}{Du_n} \sqrt{\sum_{v=2}^N \tilde{U}_v^2} - 1 \approx \frac{1}{Du_n} \sqrt{\sum_{v=2}^N \chi_v S_n(\omega_v)} - 1.$$

То есть, вместо всей площади под графиком, равной дисперсии помехи, суммируются только площади заштрихованных трапеций. Поскольку полосы пропускания не пересекаются, то погрешность будет отрицательной, а оценка несинусоидальности заниженной.

Таким образом, в случае стационарной случайной помехи ИН следует применять в качестве анализатора спектральной плотности. График $\tilde{S}_n(\omega)$ строится как огибающая значений \tilde{U}_v^2/χ_v , получаемых для разных частот. Из-за стационарности помехи измерения на разных частотах необязательно проводить одновременно.

Еще большие трудности возникают в случае нестационарной помехи. В этом случае понятие спектральной плотности не имеет физического смысла и практически использовать можно только корреляционную функцию $k_n(t_1, t_2)$, которая зависит от времени: при $t_1 = t$, $t_2 = t + \tau$. Дисперсия помехи будет определяться выражением

$$Du_n = k_n(t_1, t_2).$$

Дисперсия процесса на выходе фильтра ИН

$$D\tilde{u}_{nv} = \int_0^t \int_0^t g_v(t-\alpha) g_v(t-\beta) k_n(\alpha, \beta) d\alpha d\beta, \quad (8)$$

а также показания ИН $\tilde{U}_v(t) = \sqrt{D\tilde{u}_{nv}(t)}$ зависит от времени.

Как и в случае стационарной помехи, формальное использование формулы (3) дает погрешность

$$\delta_n(t) = \sqrt{\sum_{v=2}^n \tilde{U}_v^2(t)} / Du_n - 1,$$

уменьшить которую не представляется возможным, так как даже для идеального полосового фильтра в отличие от описываемого выражением (6) трудно связать дисперсию (8) с корреляционной функцией помехи.

При нестационарной помехе измерения на выходах всех фильтров нужно производить одновременно, а обработку результатов вести по n ансамблям реализаций процессов $\tilde{U}_v(t)$.

Таким образом можно сделать вывод о том, что при оценке несинусоидальности напряжения с помощью ИН, использующих принцип разложения в ряд Фурье, необходимо:

- 1) определить вид помехи;
- 2) при периодической помехе достаточно однократного измерения, а надлежащим выбором АЧХ фильтров можно обеспечить достоверность оценок несинусоидальности напряжения. Для обычно встречающегося на практике случая стационарной непериодической помехи по показаниям ИН следует построить статистическую спектральную плотность, применяя для оценки несинусоидальности формулу (7).
- 3) при нестационарной помехе применение ИН не обеспечивает достоверность оценки несинусоидальности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куренный Э.Г., Дмитриева Е.Н., Ковальчук В.М., Коломытцев А.Д. О совершенствовании нормирования качества электроэнергии // *Электричество*. – 1987. – №8. – с. 67-69.
2. Куренный Э.Г., Чепкасов Ю.И., Коломытцев А.Д. Обеспечение достоверности оценок электромагнитной совместимости по несинусоидальности напряжения // *Электромагнитная совместимость: (Материалы III Республиканской науч.-техн. конференции)* – Винница: 1991. – Вып. 2. – с.135-137.
3. Шидловский А.К., Куренный Э.Г., Коломытцев А.Д. Статистическая динамика анализаторов гармоник // *Техническая электродинамика*. – 1983. – №3. – с.3-10.
4. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. в Украине 01.01.2000.

Надано до редакції:
Рекомендовано до друку:

27.09.2003
д.т.н., проф. Курінний Е.Г.