Куренный Э.Г., Коломытцев А.Д.
Оценка несинусоидальности напряжения без разложения в ряд Фурье. – Донецк, 1986. – 10 с. Деп. в УкрНИИНТИ 15.01.87, № 187-Ук87.

При оценке несинусоидальности напряжения исходными для расчетов являются графики $u_{п}(t)$ мгновенных значений помехи, которые могут быть получены путем осциллографирования в действующих электрических сетях или расчетным путем при проектировании. Затем уже можно получить график изменения $U_{п}(t)$ действующих значений напряжения помехи, каждая ордината которого равна эффективному значению напряжения графика $u_{п}(t)$ за цикл t_f=0,02 с.

Обычно действующее значение $U_{п}$ помехи вычисляется с помощью разложения в ряд Фурье. Однако этот способ недостаточно эффективен, так как требует большого количества промежуточных вычислений, а для случайных помех неприемлем, поскольку понятие отдельной гармоники в этом случае не имеет смысла.

Рассмотрим способ вычисления КНС, основанный на более общей трактовке этого показателя. По смыслу КНС

$$K_{нсU} = \frac{U_{п}}{U_1} \cdot 100\,, \% \qquad (1)$$

представляет собой отношение действующих значений напряжений $U_{п}$ помехи и U_1 основной частоты, которые подлежат вычислению.

Если значения U_1 меняются во времени медленно, то можно принять следующее допущение: среднее значение мгновенных значений напряжения в пределах длительности $t_f = 1/f$ любого цикла равно нулю. Тогда корректно говорить о гармониках каждого цикла, величина и состав которых могут меняться от цикла к циклу.

В этом случае в выражении для первой гармоники

$$u_1(t) = U_{М1} \sin \omega_f t = \sqrt{2} U_1 \sin \omega_f t \qquad (2)$$

с угловой частотой $\omega_f = 2\pi f$ амплитуда $U_{М1}$ будет постоянной, а отсчет времени t удобно производить от начала цикла.

В проектной практике процесс (2) является известным, так как напряжение на шинах источника питания считается неизменным.

Суть предлагаемого способа состоит в выделении помехи $u_{п}(t)$ и вычислении ее эффективного значения не по сумме квадратов действующих значений напряжений гармоник, а непосредственно по формуле

$$U_{\text{п}} = \sqrt{\frac{1}{t_f}\int_0^{t_f} u_{\text{п}}^2(t)dt}\,, \qquad (3)$$

не требующей предварительного вычисления коэффициентов ряда Фурье.

При вычислении на ЭВМ цикл разбивается на N ординат, считываемых с малым шагом квантования Δ. Тогда

$$U_{\text{п}} \approx \sqrt{\frac{1}{t_f}\sum_{j=1}^{N} u_{\text{п}}^2(j\Delta)}\,.$$

При ручном счете целесообразно построить УД $u_{\text{пу}}(t_{\text{у}})$ графика помехи (рис. 1), заменить ее отрезки ломаной, а затем вычислить искомое значение

$$U_{\text{п}} = \sqrt{\frac{1}{t_f}\int_0^{t_f} u_{\text{пу}}^2(t_{\text{у}})dt_{\text{у}}} \approx \sqrt{\frac{1}{3t_f}\sum_{r=1}^{m}\left(u_{\text{н}r}^2 + u_{\text{н}r}u_{\text{к}r} + u_{\text{к}r}^2\right)t_r}\,,$$

где $u_{\text{н}r}$ и $u_{\text{к}r}$ — начальная и конечная ординаты r-го отрезка ломаной длительностью t_r, m — количество отрезков.

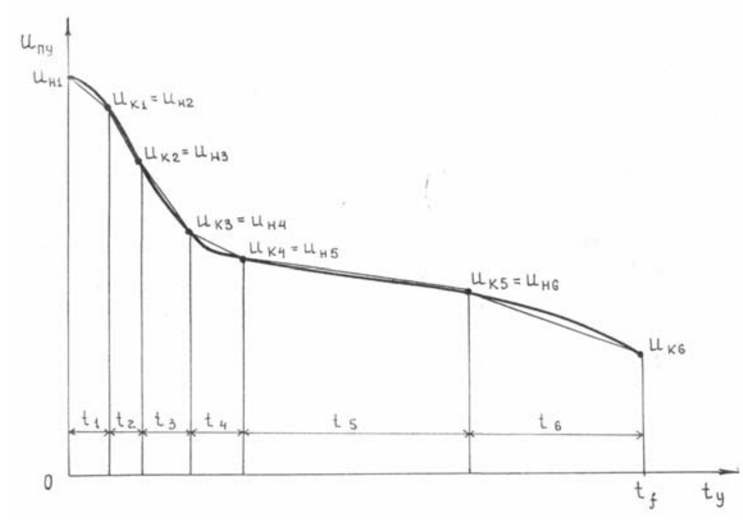

Рисунок 1 – Вычисление эффективного значения помехи при упорядоченной диаграмме графика помехи

В случае, если положение начала цикла записанной в действующей сети осциллограммы напряжения определено и не вызывает сомнений, наименее трудоемким представляется следующий способ выделения помехи

$u_{\text{п}}(t)$. На график $u(t)$ наносится синусоида, амплитуда которой $\widetilde{U}_{\text{М1}}$ выбирается приблизительно. Затем строится график разности

$$\widetilde{u}_{\text{п}}(t) = u(t) - \widetilde{U}_{\text{М1}} \sin \omega_f t$$

и его УД $\widetilde{u}_{\text{пу}}(t_{\text{у}})$, по которой вычисляется первое приближение для среднего значения помехи:

$$\widetilde{u}_{\text{пс}} = \frac{1}{2t_f} \sum_{\text{r}=1}^{\text{m}} \left(\widetilde{u}_{\text{нr}} + \widetilde{u}_{\text{кr}}\right) t_{\text{r}} \, .$$

Поскольку помеха имеет нулевое среднее значение, то отличие от нуля значения $\widetilde{u}_{\text{пс}}$ свидетельствует о необходимости уточнения амплитуды первой гармоники именно на величину $\widetilde{u}_{\text{пс}}$. Тогда окончательное значение амплитуды первой гармоники будет

$$U_{\text{М1}} = \widetilde{U}_{\text{М1}} + \widetilde{u}_{\text{пс}} \, . \tag{4}$$

После этого строится график помехи

$$u_{\text{п}}(t) = u(t) - U_{\text{М1}} \sin \omega_f t$$

и уже по этому графику или по его УД $u_{\text{пу}}(t_{\text{у}})$, в соответствии с (3) и (1) определяются $U_{\text{п}}$ и КНС.

Если положение начала цикла является неопределенным, то в этом случае вычисление амплитуды и фазы первой гармоники с использованием формул для коэффициентов ряда Фурье может быть оправданным.

Кроме того, возможен и другой путь, основанный на непрерывном осреднении графика $u(t)$ за скользящий вдоль оси времени интервал времени θ. Чтобы избежать сдвига фаз между исходной и осредненной синусоидами, текущие значения осредненного процесса

$$u_{\theta}(t) = \frac{1}{\theta} \int_{t-\theta/2}^{t+\theta/2} u(t) dt \tag{5}$$

будем относить к середине интервала осреднения.

Амплитуда U_{Mn} гармоники в результате осреднения (5) будет уменьшаться в

$$A_{\mathrm{Mn}} = \frac{1}{\pi n \theta_*}\left|\sin \pi n \theta_*\right|$$

раз, где $\theta_* = \theta / t_f$. Тогда для n-й гармоники после осреднения получим процесс

$$u_{\theta\mathrm{n}}(t) = U_{\mathrm{Mn}} A_{\theta\mathrm{n}} \sin \omega_{\mathrm{n}} t\,. \qquad (6)$$

Соответствующим выбором длительности θ можно добиться того, что для любых n>1 осредненные процессы (6) выродятся в нулевую горизонталь, а останется лишь осредненный процесс первой гармоники:

$$u_{\theta 1}(t) = U_{\mathrm{M}\theta 1} \sin \omega_f t = U_{M1} A_{\theta 1} \sin \omega_{\mathrm{f}} t\,, \qquad (7)$$

амплитуда которого $U_{\mathrm{M}\theta 1}$ в $A_{\theta 1}$ раз меньше U_{M1}.

Таким образом, значение θ должно быть с одной стороны достаточно большим, чтобы гармоники с n>1 в осредненном процессе практически отсутствовали, но с другой стороны не настолько, чтобы амплитуда $U_{\mathrm{M}\theta 1}$ процесса (7) была бы близка к нулю.

Первое требование выполняется тогда, когда амплитуда процесса (6) окажется меньше заданной допустимой погрешности α считывания ординат первой гармоники, т.е. когда $U_{\mathrm{Mn}} A_{\theta\mathrm{n}} < \alpha U_{\mathrm{M1}}$ или

$$A_{\theta\mathrm{n}} < \alpha U_1 / U_{\mathrm{n}}\,. \qquad (8)$$

Требования для КНС выполняются при $U_{\mathrm{n}} / U_1 \le 5\%$. Поэтому для обеспечения достоверности считывания ординат помехи должно обеспечиваться условие α <<0,05.

Второе требование обеспечивается, если относительное уменьшение амплитуды процесса (7) не превысит заданной величины β, то есть

$$A_{\theta 1} = \frac{\left|\sin \pi\theta_*\right|}{\pi\theta_*} > \beta\,. \qquad (9)$$

Неравенства (8) и (9) можно решить графически, проводя горизонтали $A_{\theta\mathrm{n}} = \alpha U_1 / U_{\mathrm{n}}$ и $A_{\theta 1} = \beta$. При этом, горизонталь на графике $A_{\theta 1}(\theta_*)$ проводится один раз, а на графике $A_{\theta\mathrm{n}}(\theta_*)$ они проводятся для различных значений α. В результате при фиксированном β получаются области возможных значений α и θ.

Полученный график процесса (5) дает не только положение момента t=0, но и позволяет определить амплитуду первой гармоники

$$U_{\mathrm{M}1} = U_{\mathrm{M}1\theta} A_{\theta 1} \qquad (10)$$

без уточнения и использования (4).

Более целесообразным представляется использовать инерционное сглаживание процесса $u(t)$ апериодическим звеном первого порядка с постоянной инерции T. При подаче на вход звена n-й гармоники на выходе наблюдается инерционный процесс

$$u_{\mathrm{Tn}}(t) = U_{\mathrm{MTn}} \sin \omega_{\mathrm{n}} t \,,$$

амплитуда U_{MTn} которого в

$$A_{\mathrm{Tn}} = \frac{1}{\sqrt{1+\omega_n^2 T^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+4\pi^2 T_*^2}}$$

раз меньше U_{Mn}, где $T_* = T / t_f$.

При больших постоянных инерции звеном будет выделяться только инерционный процесс от первой гармоники

$$u_{\mathrm{T}1}(t) = U_{\mathrm{MT}1} \sin \omega_{\mathrm{f}} t \qquad (11)$$

с фазой

$$\varphi_{T1} = -arctg\omega_f T = -arctg 2\pi T_* . \qquad (12)$$

Амплитуда первой гармоники может быть вычислена по формуле

$$U_{M1} = U_{MT1} / A_{T1} = U_{MT1}\sqrt{1+\omega_f^2 T^2} \,. \qquad (13)$$

Выбор постоянной инерции производится из тех же соображений, что и длительность осреднения. Но в отличие от (3.32) и (3.33) решение здесь получается в конечном виде:

$$\frac{1}{2\pi n}\sqrt{\frac{U_n}{\alpha U_1} - 1} < T_* < \frac{1}{2\pi\beta}\sqrt{1-\beta^2} \,, \qquad (14)$$

а области возможных значений T_* и α при заданном β непрерывны (рис. 2).

Необходимо отметить, что инерционное сглаживание менее удобно для проведения расчетов, чем осреднение.

В случае, если действующее значение помехи $U_{\text{п}}$ меняется во времени, то график изменения $U_{\text{п}}(t)$ можно получить путем последовательной обработки каждого цикла процесса $u(t)$.

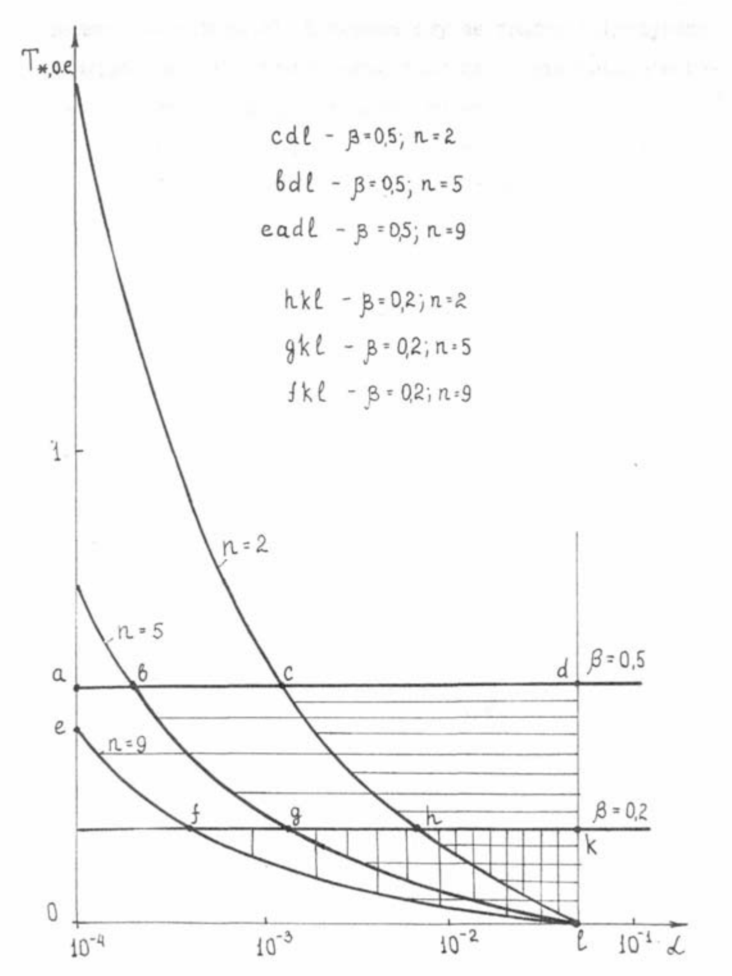

Рисунок 2 – Определение областей возможных значений T_* и α для различных гармоник напряжения