

ПОГРЕШНОСТИ ИМИТАЦИИ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ И ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Шевченко Д.А., студент; Куренный Э.Г., проф.

(Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина)

В стандартах [1, 2] на электромагнитную совместимость (ЭМС) нормируются прямоугольные и синусоидальные колебания напряжения. Однако их воспроизвести невозможно. Целью работы является построение фактических колебаний (символ \sim) и оценка погрешностей использования идеализированных колебаний при оценивании ЭМС по универсальному показателю – дозе фликера напряжения.

Колебания определяются по процессу изменений действующих значений U напряжения, которые получаются путём среднеквадратического осреднения (СКО) мгновенных значений u напряжения на интервале $\theta = 0,01$ с. Даже при скачкообразных изменениях Δu процесса $u(t)$ вследствие сглаживающего действия СКО ординаты фактического процесса $\tilde{U}(t)$ не могут измениться скачком.

Идеализированные колебания характеризуются размахом δU в % и частотой λ в Гц. Если в периоде колебаний $t_\lambda = 1/\lambda$ размещается целое число циклов $t_f = 0,02$ с синусоиды 50 Гц, то процесс $\tilde{U}(t)$ будет периодическим с частотой λ . Идеализированный процесс имеет две ступени U_1 и U_2 с одинаковыми длительностями $t_\lambda/2$. В проектировании среднее значение процесса $U(t)$ принимается равным номинальному $U_n = 100\%$. В этом случае

$$U_1 = U_n + \delta U/2 = U_n(1 + m), \quad U_2 = U_n(1 - m),$$

где $m = \delta U/200$ – коэффициент модуляции.

В [1] верхний предел частоты колебаний принят равным 35 Гц. Однако СКО на интервале 0,01 с, а не 0,02 с, как обычно, приводит к тому, что могут появляться колебания напряжения с частотой 50 Гц. На рисунке пунктиром показаны прямоугольные колебания с $\lambda = 50$ Гц и периодом $t_\lambda = t_f = 0,02$ с. На большей ступени U_1 располагается только один полупериод синусоиды 50 Гц с амплитудой $\sqrt{2} U_1$, а на меньшей – U_2 с амплитудой $\sqrt{2} U_2$ (тонкие линии).

Обозначим через

$$x(t) = 4m \left(\frac{t}{\theta} + \frac{1}{2\pi} \sin 2\omega t \right),$$

где $\omega = 100\pi$ – угловая частота синусоиды 50 Гц.

Выполнив СКО, получим фактический процесс (утолщенная линия)

$$\tilde{U}(t) = \begin{cases} U_n \sqrt{1 + m^2 + x(t)} & \text{при } 0 \leq t \leq \frac{\theta}{2}, \\ U_n \sqrt{1 + 4m + m^2 + x(t)} & \text{при } \frac{\theta}{2} \leq t \leq \frac{3\theta}{2}, \\ U_n \sqrt{1 - 8m + m^2 + x(t)} & \text{при } \frac{3\theta}{2} \leq t \leq 2\theta, \end{cases} \quad (1)$$

который в наибольшей мере отличается от идеализированного. При меньших частотах в графике $\tilde{U}(t)$ появляются ступени величиной U_1 и U_2 , длительности которых тем больше, чем меньше частота, но во всех случаях фактический график не имеет скачков.

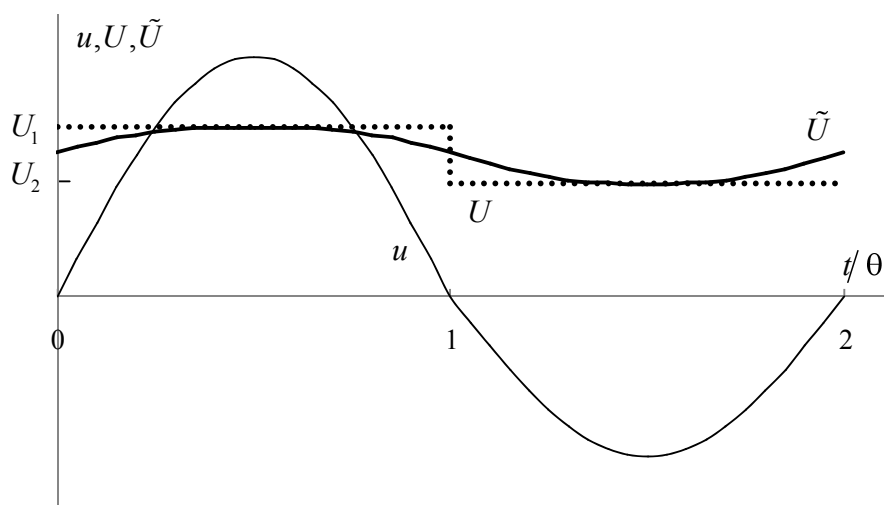


Рисунок 1 – Имитация колебаний напряжения частотой 50 Гц

Если в периоде t_λ не помещается целое число циклов по 0,02 с, то график $\tilde{U}(t)$ будет иметь больший период T_λ . Например, при частоте 23 Гц цикл $T_\lambda = 1$ с. В нем помещается 23 цикла длительностью по t_λ и 50 циклов по 0,02 с. Скачки от U_1 до U_2 и наоборот происходят в моменты времени, когда синусоиды не проходят через нуль. Поэтому в эти моменты времени процесс $u(t)$ будет иметь скачки Δu , разные в разных циклах по t_λ .

Качественно аналогично обстоит дело и с идеализированными гармоническими колебаниями

$$U(t) = U_n + m \sin \omega_\lambda t \quad (2)$$

с угловой частотой $\omega_\lambda = 2\pi\lambda$. Для имитации таких колебаний обычно используется формула [3, 4]

$$\begin{aligned} u(t) &= \sqrt{2}U_n \sin \omega t (1 + m \sin \omega_\lambda t) = \\ &= \sqrt{2}U_n \left[\sin \omega t + 0,5m \cos(\omega - \omega_\lambda)t - 0,5m \cos(\omega + \omega_\lambda)t \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

В предельном случае колебаний с частотой 50 Гц, когда $\omega_\lambda = \omega$, после СКО процесса

$$u(t) = \sqrt{2}U_n (\sin \omega t - 0,5m \cos 2\omega t)$$

получим фактический процесс

$$\tilde{U}(t) = U_n \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3m^2}{4} - \frac{2m}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t \right)}, \quad (4)$$

существенно отличающийся от (2). С уменьшением частоты погрешность имитации уменьшается.

Если же, как на рисунке, имитацию выполнить двумя полуволнами синусоид, то фактический процесс совпадет с (1), что свидетельствует о неоднозначности такого способа имитации.

Знания размаха и частоты еще не достаточно для оценки колебаний напряжения. Например, на рисунке фактический и идеализированный графики имеют одинаковые размахи и частоты, но первый из них меньше сказывается на человеке. В связи с этим ЭМС необходимо оценивать по дозе фликера. Соответствующая фликермодель [2] состоит из трёх блоков. Блок взвешивающих фильтров (ВФ) моделирует источник света и реакцию $Y(t)$ на входной процесс $U(t)$. Блок квадратичного инерционного сглаживания (КИС) моделирует зрительное ощущение $S(t)$ человека. В последнем блоке выполняется статистическая обработка процесса $S(t)$ и вычисляется доза.

Реакция и входной процесс связаны между собой линейным дифференциальным уравнением (д.у.) 11 порядка. Для его решения был использован метод парциальных реакций [4], согласно которому ВФ заменяется 11 инерционными звеньями первого порядка. Тем самым решение сводится к сумме 11 решений д.у. первого порядка. В блоке КИС реакция возводится в квадрат и пропускается через инерционное звено первого порядка. В силу периодичности процесса $S(t)$ статистическая обработка выполняется за время цикла T_λ .

Доза фликера от процесса $U(t)$ будет больше, чем от $\tilde{U}(t)$. Отношение доз определяет степень завышения требований к ЭМС при использовании идеализированных графиков.

Индуктивность сети сглаживает колебания, что приводит к еще большему расхождению между идеализированными и фактическими графиками. В связи с этим предложено использовать идеализированные графики входных проводимостей электроприёмников, создающих колебания.

Вывод. Для исключения завышения требований к ЭМС в проектировании в качестве исходных данных необходимо использовать идеализированные графики входных проводимостей, а не электрических нагрузок электроприёмников.

Перечень ссылок

1. ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. в Украине с 01.01.2000.
2. IEC 61000-4-15. Electromagnetic compatibility. Part 4: Testing and measurement techniques. Section 15: Flickermeter – Functional and design specifications. – Geneva, 1997.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1964.
4. Flicker responses of different lamp types / R. Cai, J.F.G. Cobben, J.M.A. Myrzik, J.H. Blom, W.L. Kling. – IET Generation, Transmission and Distribution, 2009, v. 3.
5. Eduard G. Kourennyi, Victor A. Petrosov, Lidiya V. Chernikova. Linear Filtration of random processes in EMC models: the “partial reactions” method // Electromagnetic Compatibility 2000, part II, Fifteenth International Wroclaw Symposium on Electromagnetic Compatibility. – 2000. – P. 587-589.