

* * *

Электричество, 2016, № 1, с. 12–20.

Принцип оценивания и нормирования электромагнитной совместимости

КУРЕННЫЙ Э.Г., ДМИТРИЕВА Е.Н., ЛЮТЫЙ А.П., БУЛГАКОВ А.А.

Рассматриваются два способа учета инерционности объектов при оценивании электромагнитной совместимости (ЭМС): путем усреднения на заданном интервале квадрата реакции объекта на помеху (кумулятивный принцип) и квадратичного сглаживания (инерционный принцип). На примере оценивания температуры дополнительного нагрева от помехи ЭМС показываются принципиальные недостатки кумулятивного принципа: отсутствие физического аналога и немонотонность изменения показателя ЭМС при увеличении инерционности объекта. Для обеспечения показателям ЭМС физического смысла и адекватности оценивания негативных воздействий помех ЭМС предлагается от кумулятивного принципа перейти к инерционному принципу. Даются рекомендации по применению предлагаемого принципа в стандартах на показатели ЭМС.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, нормирование, модели, квадратичное сглаживание, квадратичное усреднение

На ранней стадии развития стандартизации нормировались лишь значения показателей качества напряжений, а для колебаний – еще и частоты (например, в ГОСТ 13197–67). Однако при этом из-за неучета инерционности объектов завышались требования к электромагнитной совместимости (ЭМС). По аналогии с методами оценки расчетной электрической нагрузки по нагреву в [1] был сформулирован кумулятивный принцип оценивания

ЭМС путем квадратичного усреднения (УК) помехи на заданном интервале времени. Длительность q интервала принималась равной трем постоянным времени T объекта. Впоследствии этот принцип был принят в ГОСТ 13109–97 и сохранен в [2].

Кумулятивный принцип не имеет строгого обоснования, но используется в инженерной практике из-за его простоты. В статье предлагается инерционный принцип, в котором инерционность

учитывается непосредственно. Как и в [2], помехи ЭМС рассматриваются раздельно¹. Для краткости стандарты на ЭМС для конкретных видов электроприемников условно назовем «потребительскими», а в точках общего присоединения – «сетевыми».

Модели ЭМС. По сути задачи ЭМС должна оцениваться по негативным воздействиям помех ЭМС на объекты (перегреву, сокращению срока службы, уменьшению производительности). Для этого необходимо моделировать рассматриваемый объект.

По аналогии с [3] блок, моделирующий реакцию $y(t)$ объекта на помеху, будем называть взвешивающим фильтром $ВФ$ (рис. 1,а). При оценке температуры превышения реакцией является ток, а структура $ВФ$ принимается по схеме замещения электроприемника. Квадратор 1 учитывает то обстоятельство, что воздействие помехи определяется мощностью реакции. Инерционность объекта моделируется инерционным звеном 2 с постоянной времени T . Звенья 1 и 2 входят в блок квадратичного сглаживания (КС). Квадратичный инерционный процесс на выходе этого блока связан с входным процессом дифференциальным уравнением

$$Tw\ddot{\phi} + w_T = y^2, \quad (1)$$

которое через оператор L_T инерционного сглаживания (ИС) записывается в виде $w_T = L_T\{y^2\}$.

Поскольку помехи измеряются в % или отн. ед., в правой части уравнения нет постоянного коэффициента.

По сравнению с полезным сигналом помехи имеют небольшой диапазон изменения, поэтому блок $ВФ$ является линейным. Нелинейность создает квадрататор. По процессу $w_T(t)$ вычисляется показатель ЭМС.

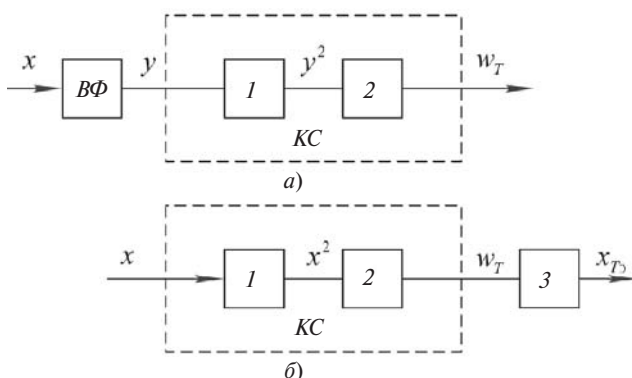


Рис. 1. Структурные схемы моделей ЭМС: а – для конкретного объекта; б – в нормировании

¹ В силу нелинейности УК принцип суперпозиции не применим, поэтому даже при наличии одной помехи ЭМС ее воздействие на конкретный объект необходимо оценивать совместно с полезным сигналом, как это принято в [2] для отклонений напряжения.

Оценивание ЭМС для конкретного электроприемника проводится с использованием его динамической модели². При нормировании же в точке общего присоединения учесть особенности каждого электроприемника невозможно. Поэтому принимается упрощающее допущение о том, что в процентах реакция совпадает с помехой. Это позволяет исключить $ВФ$ (рис. 1,б), что фактически принято в [2], где осуществляется УК помехи.

Процесс на выходе блока $КС$ измеряется в (отн. ед.)² или (%)². Для приведения к процентам или отн. ед. предусматривается звено извлечения квадратного корня 3. Нормирование осуществляется по эффективному инерционному процессу:

$$x_{wT}(t) = \sqrt{w_T(t)} = \sqrt{L_T\{x^2(t)\}}. \quad (2)$$

При небольших различиях в среднем x_c и эффективном $x_э$ значениях помехи вместо (2) можно использовать инерционный процесс:

$$x_T(t) = L_T\{x(t)\}. \quad (3)$$

Примером является нормирование отклонений частоты в [2]. В этом случае погрешность в отн. ед. не превышает значения $k_\phi - 1$, где $k_\phi = x_э / x_c$ – коэффициент формы.

Инерционные показатели. В соответствии с принципом практической уверенности (например [4]) расчетный максимум (индекс «М») случайной величины может превышать с пренебрежимо малой граничной вероятностью E_x , которой соответствует интегральная вероятность $1 - E_x$. В [2] для отклонений частоты, несинусоидальности и несимметрии напряжений принято значение $1 - E_x = 0,95$, поэтому $E_x = 0,05$. Для отклонений напряжения $E_x = 1/1008 \approx 0,001$ и $1 - E_x \approx 0,999$, что предлагалось в [4] для «предельного» режима. Расчетный минимум определяется с интегральной вероятностью E_x . Для краткости далее минимумы не рассматриваются.

Для модели ЭМС на рис. 1,а показателем ЭМС является квадратичный инерционный максимум w_{TM} , а в нормировании (рис. 1,б) – эффективный инерционный максимум x_{wTM} . При небольших коэффициентах формы вместо x_{wTM} можно принимать инерционный максимум x_{TM} .

Так как от сети электроснабжения питаются электроприемники с разной инерционностью, то необходимо иметь зависимости максимумов от T , которые назовем кривыми максимумов: $w_{TM}(T)$,

² Исключение составляет модель ЭМС по отклонениям напряжения для осветительных электроприемников, у которых $T \gg 0$. Здесь $ВФ$ является статической системой, нелинейной для ламп накаливания и линейной для газоразрядных ламп. Из-за отсутствия динамического звена 2 блок $КС$ превращается в статическое нелинейное звено – квадрататор.

$x_{wT_M}(T)$ и $x_{T_M}(T)$. Если нет необходимости различать о какой кривой идет речь, будет использоваться краткий термин: T -характеристика. Аналогичные термины используются и при усреднении на интервале — путем замены слова «инерционный» на «кумулятивный», а обозначение T — на q .

Поскольку одна и та же помеха оказывает меньше влияния на объекте с большей инерционностью, то с увеличением аргумента T -характеристики монотонно убывают, стремясь к соответствующим средним значениям: $w_{\neq M} = x_{\neq}^2$, $x_{w\neq M} = x_{\neq}$ и $x_{\neq M} = x_c$.

Неадекватность усреднения. Структурные схемы кумулятивных моделей отличаются от инерционных тем, что вместо инерционного звена 2 в них имеется кумулятивное звено усреднения L_q на интервале q (окно Дирихле). При оценивании ЭМС конкретного объекта на выходе звена протекает квадратичный кумулятивный процесс:

$$w_q(t) = L_q \{y^2(t)\} = \frac{1}{q} \int_{t-q}^t y^2(t) dt. \quad (4)$$

Нормирование же осуществляется по эффективному кумулятивному процессу:

$$x_{wq}(t) = \sqrt{L_q \{x^2(t)\}} = \sqrt{\frac{1}{q} \int_{t-q}^t x^2(t) dt}. \quad (5)$$

Неадекватность кумулятивной модели проиллюстрируем на примерах оценивания ЭМС по температуре для электроприемника с входной активной проводимостью, когда в отн. ед. или реакция совпадает с помехой, а температура — с процессом w_T .

Первым рассмотрим случай включения объекта на неизменную помеху единичным значением 1%. Помеха представляет собой единичную функцию $1(t)$. Возведение в квадрат не изменяет ее вида — изменяется только размерность. Поэтому процессы $w_T(t)$ и $w_q(t)$ отличаются только размерностью (%)² от соответствующих переходных функций в %:

$$h_T(t) = 1 - e^{-t/q}; \quad h_q(t) = \begin{cases} t/q & \text{при } 0 \leq t \leq q; \\ 1 & \text{при } t > q. \end{cases} \quad (6)$$

Квадратичный инерционный процесс (рис. 2, кривая 1) пропорционален процессу изменения температуры превышения, поэтому модель ЭМС с инерционным звеном адекватно отражает нагревание объекта.

Квадратичный кумулятивный процесс (рис. 2, кривая 2) представляет собой кусочно-линейную функцию, по виду близкую к кривой 1. Именно эта кажущаяся близость стала в [5] обоснованием допустимости использования УК. Критерием практической эквивалентности послужила длительность затухания T_{Π} переходного процесса. При усредне-

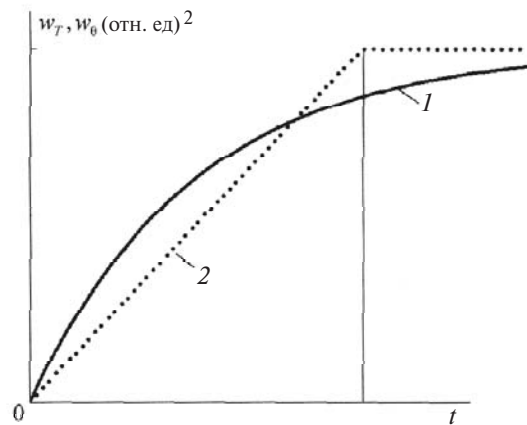


Рис. 2. Квадратичные инерционный (1) и кумулятивный (2) процессы при включении объекта на помеху единичного значения

нии она в точности равна q . Допустимое расхождение между кривой 1 и ломаной 2 при $t = T_{\Pi}$ принято равным 5%. В этом случае коэффициент пропорциональности между q и $T e_q = 3$. Однако, если принять расхождение в 1%, то уже $e_q = 4,6$. Если же за это время использовать метод наименьших квадратов, то $e_q = 1,69$, а если за весь период времени от 0 до ∞ , то $e_q = 1,63$.

Отсюда следует, что близость переходных функций не может быть основанием допустимости УК. Дело в том, что при кусочно-линейной аппроксимации функции $h_T(t)$ полностью теряется физический смысл. В самом деле, на участке от 0 до q функция $h_q(t)$ возрастает по линейному закону. Это означает, что идет адиабатический нагрев без отдачи тепла в окружающую среду. Затем в момент времени $t = q$ все тепло уходит на теплоотдачу. Очевидно, что физического объекта с такими тепловыми свойствами не существует.

Перейдем к периодической помехе с постоянной составляющей x_c и переменной составляющей, которая представляется суммой гармоник ν -го порядка с действующими значениями X_{ν} и угловой частотой

$$w_{\nu} = 2p\nu / t_{\Pi} \quad \text{при } \nu = 1, 2, \dots \quad (7)$$

где t_{Π} — длительность цикла.

Квадратичные инерционный и кумулятивный процессы любого вида имеют одинаковые постоянные составляющие, равные квадрату эффективного значения реакции y_{\neq} , а в рассматриваемом случае — x_{\neq}^2 . Их гармоники имеют ту же частоту (7). Действующие значения гармоник

$$W_{T\nu} = Z_{\nu} A_T(w_{\nu}); \quad W_{q\nu} = Z_{\nu} A_q(w_{\nu}) \quad (8)$$

выражаются через амплитудно-частотные функции (АЧФ) инерционного и кумулятивного звеньев:

$$A_T(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}; \tag{9}$$

$$A_q(\omega) = \frac{|\sin \omega q / 2|}{\omega q / 2} = \frac{|\sin \omega \epsilon_0 T / 2|}{\omega \epsilon_0 T / 2},$$

где ω - угловая частота.

Первая АЧФ монотонно убывает с увеличением частоты (кривая 1 на рис. 3), в то время как вторая АЧФ имеет вид затухающих колебаний (кривые 2 и 3). Минимумы АЧФ кумулятивного звена, равные нулю, наблюдаются при частоте

$$\omega_m = 2\pi m / q = 2\pi m / \epsilon_0 T, \tag{10}$$

где $m=1,2,\dots$ - целое число.

Вид $A_q(\omega)$ зависит от выбора ϵ_0 . При $\epsilon_0 < 3$ кривая 3 сжимается вдоль оси абсцисс (кривая 2), а при $\epsilon_0 > 3$ - растягивается. Действующие значения (8) совпадают лишь для гармоник с частотами, соответствующими точкам пересечения графиков АЧФ (кружки на рис. 3).

В частном случае, когда в интервале q помещается целое число циклов, частота гармоник совпадает с ω_m . Это означает, что кумулятивным звеном все гармоники подавляются полностью, а в квадратичном кумулятивном процессе остается лишь постоянная составляющая. Такой результат противоречит физическому смыслу, поскольку при переменной помехе температура не может оставаться неизменной.

Различия в максимумах квадратичных процессов вначале проиллюстрируем на примере периодической последовательности прямоугольных импульсов значением 1 отн. ед. с нулевыми паузами, коэффициентом включения k_B и интенсивностью потока импульсов $I = 1/t_{II}$. В этом случае при $E_x = 0$ квадратичные инерционные максимумы определяются по формулам (II.76) и (II.81) из [6]:

$$w_{TM} = \frac{1 - \exp\{-k_B / I T\}}{1 - \exp\{-I T\}} \text{ при } I T \neq 0. \tag{11}$$

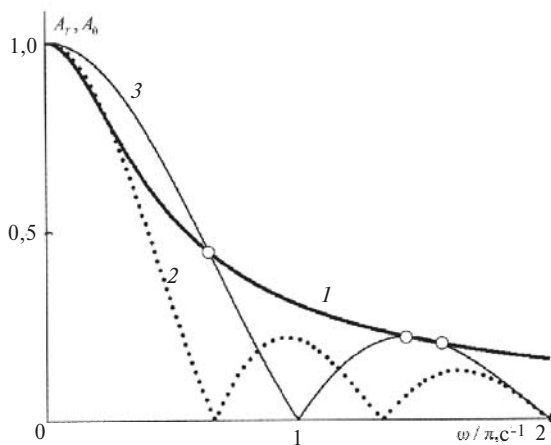


Рис. 3. Амплитудно-частотные функции инерционного (1) и кумулятивного (2 и 3) звеньев: 2 - при $\epsilon_0 = 2$; 3 - $\epsilon_0 = 3$

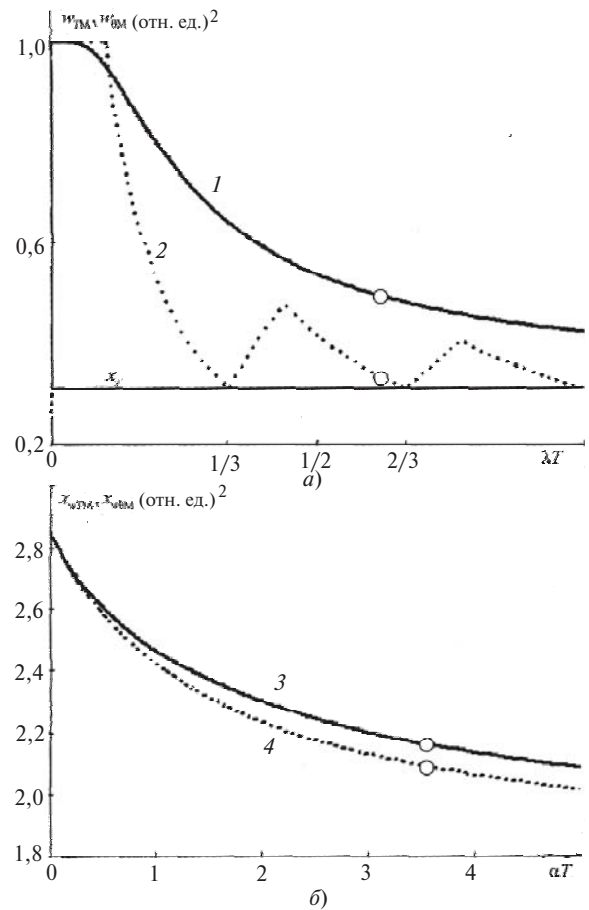


Рис. 4. Кривые эффективных максимумов: а - периодической последовательности прямоугольных импульсов (1 - квадратичных инерционных; 2 - квадратичных кумулятивных) при $k_B = 0,31$, $I = 0,185 \text{ мин}^{-1}$, $\epsilon_0 = 3$; б - случайной помехи (3 - инерционных, 4 - кумулятивных) при $k_{BC} = 0,25$, $a = 1,067 \text{ мин}^{-1}$

Максимумы w_{TM} пропорциональны максимумам температуры, и с увеличением постоянной инерции они монотонно убывают (кривая 1, рис. 4). Иначе обстоит дело при усреднении, когда максимумы процесса $w_q(t)$ определяются по формулам (II.86) из [6] при $q = \epsilon_0 T$:

$$w_{QM} = \begin{cases} 1 - j k_B / (\epsilon_0 I T) & \text{при} \\ j / \epsilon_0 I T \leq (j + k_B) \epsilon_0; & (12) \\ (j + 1) k_B / (\epsilon_0 I T) & \text{при} \\ (j + k_B) / \epsilon_0 I T \leq (j + 1) \epsilon_0. & (12a) \end{cases}$$

Здесь j - целое число циклов в интервале усреднения: $j=0$ при $0 < t_{II}$, $j=1$ при $t_{II} \leq q \leq 2t_{II}, \dots$

Соответствующая характеристика (кривая 2, рис. 4) принципиально отличается от кривой 1: в пределах $I T$ от 0 до k_B / ϵ_0 она имеет горизонтальный участок с ординатами 1 отн. ед., а на следующих участках изменяется немонотонно. Наличие горизонтального участка означает, что увеличение инерционности якобы не изменяет максимальную температуру, чего не может быть. Кроме того, все минимумы кривой 2 равны $x_3^2 = k_B$ при

$|T=1/e_q, 2/e_q, \dots$, когда отношение q/t_{Π} есть целое число. В этих случаях получается противоречащий физике результат. В самом деле, графики $w_q(t)$ представляют собой горизонталь (пунктирная линия на рис. 5), ординаты k_B которой пропорциональны среднему значению температуры. На самом деле в установившемся режиме процесс $w_T(t)$ изменяется в пределах от минимального до максимального значения (светлый и темный кружки).

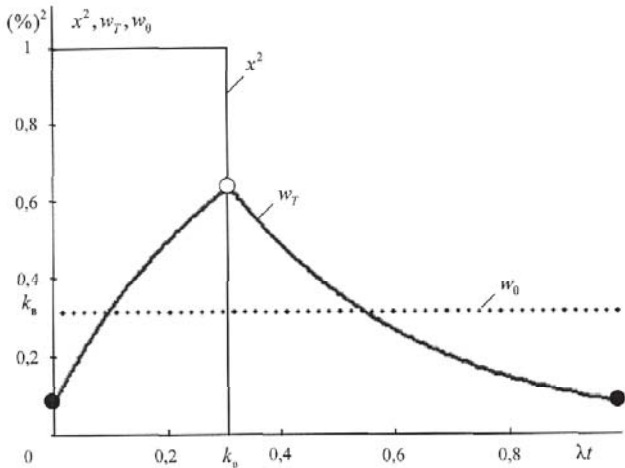


Рис. 5. Графики квадратичных инерционного $w_T(t)$ и кумулятивного $w_q(t)$ процессов при $q/t_{\Pi} = 1$, $k_B = 0,31$, $e_0 = 3$

Перейдем к непериодическим помехам. Применительно к примеру расчета рассмотрим случайный процесс, получаемый в результате суммирования n последовательностей прямоугольных импульсов со средним значением B_C и показательным распределением длительностей импульсов и пауз. При больших n (практически – не менее четырех) такой процесс имеет нормальное распределение со средним значением x_C , стандартом s_x и экспоненциальную корреляционную функцию (формула (7) из [7]):

$$K_x(t) = s_x \exp\{-a|t|\},$$

где t - аргумент; a - параметр.

При любом n числовые характеристики и параметр корреляционной функции определяются через средние значения $k_{B,C}$ и l_C :

$$x_C = B_C n k_{B,C}; \quad s_x = B_C \sqrt{n k_{B,C} (1 - k_{B,C})};$$

$$a = l_C / k_{B,C} (1 - k_{B,C}). \quad (13)$$

В общем случае задача о нахождении эффективных максимумов не имеет аналитического решения даже для помех с нормальными законами распределения. Статистически она решается путем имитации случайной помехи, например [8, 9]. На рис. 4 приведены кривые эффективных максимумов (3 и 4) для числовых характеристик из примера расчета. Как и следовало ожидать, расхождения ме-

жду максимумами при случайной помехе меньше, чем при периодической.

При оценивании температур методическая погрешность усреднения

$$d_{wM} = (w_{qM} / w_{TM} - 1)100\%, \quad (14)$$

а для квадратичных максимумов

$$d_{xM} = (x_{wqM} / x_{wTM} - 1)100\% =$$

$$= (\sqrt{1 + d_{wM} / 100} - 1)100\%. \quad (15)$$

Погрешности d_{xM} существенно меньше d_{wM} : при небольших расхождениях (единицы процентов) между q - и T - характеристиками – примерно в 2 раза.

На рис. 6 для условий примера расчета представлены кривые методических погрешностей d_{wM} (пунктирные линии) и d_{xM} (сплошные линии). Для периодической помехи в пределах от 0 до $|T = k_B$ усреднение незначительно завышает оценку ЭМС, а при $|T > k_B$ оценка занижается. Наибольшие погрешности значением $-51,3$ и $-30,2\%$ достигаются при $|T = 1/3$.

Для случайного процесса с экспоненциальной корреляционной функцией максимальные погрешности составили $-6,59$ и $-3,35\%$. Их относительно малое значение отнюдь не означает, что нет практической необходимости в отказе от кумулятивного принципа. Напротив, показатели ЭМС должны быть универсальными – ведь в точке общего присоединения может быть источник периодических или почти периодических помех.

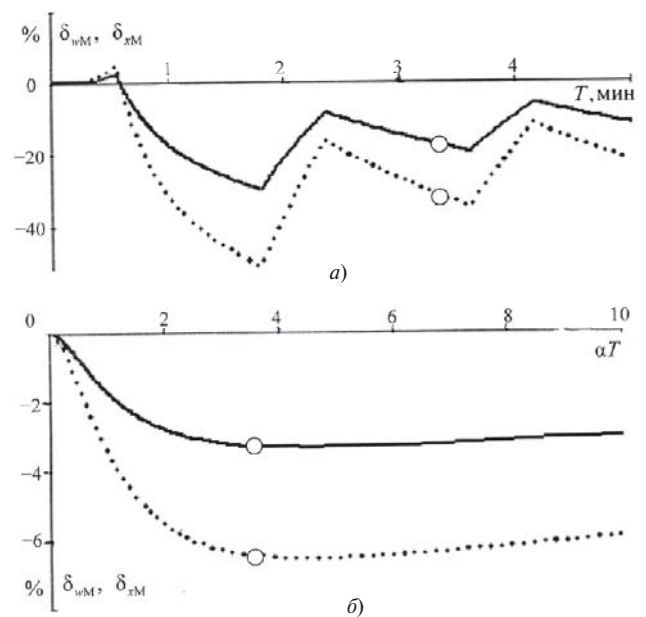


Рис. 6. Кривые методических погрешностей усреднения d_{wM} и d_{xM} : а – для периодической последовательности прямоугольных импульсов; б – для случайной помехи

Нормирование и контроль. Потребительские стандарты нормируют показатели ЭМС для отдельных видов электроприемников. Концептуально наиболее совершенным из них представляется стандарт [3], на примере которого сформулируем основные требования к таким стандартам.

Во-первых, показатель ЭМС должен быть физически обоснованным, позволяющим прямо или косвенно оценивать негативные последствия от нарушения ЭМС. В стандарте [3] рассматривается ощущение неустойчивости зрительного восприятия (фликер), по которому можно оценивать уменьшение производительности человека.

Во-вторых, для определенности в стандартах целесообразно использовать один или несколько «стандартных» объектов, для которых должны быть заданы структура и параметры блоков модели ЭМС (рис. 1,а). Во фликерметре из [3] в качестве стандартного источника света принята лампа накаливания 60 Вт. Так как получившие широкое распространение компактные люминесцентные и светодиодные лампы существенно меньше реагируют на колебания напряжения, необходимо в качестве второго стандартного источника ввести эти энергоберегающие лампы – иначе требования к колебаниям напряжения будут значительно завышенными (в 1,9 раза при гармонических колебаниях).

В-третьих, необходимо давать математическое описание $B\Phi$ и $KС$ в виде передаточных функций и (или) числовые параметры динамических звеньев в модели ЭМС, как в [3]. Неявно это сделано и в ГОСТ Р54073—2010 на системы электроснабжения самолетов и вертолетов, где нормируются переходные функции, по которым можно определить передаточные функции $B\Phi$ для напряжений и частот. В модели без $B\Phi$ достаточно задавать постоянную времени.

Дискуссионной представляется лишь принятая в [3] сложная статистическая оценка дозы фликера: далее будем исходить из принципа практической уверенности, когда нормируется интегральная вероятность.

Как и в [2, 3], эффективный инерционный максимум при постоянной инерции стандартного электроприемника целесообразно именовать дозой, допустимое значение которой принимается за единицу.

Для примера рассмотрим стандарт [10], в котором указывается допустимое превышение температуры перегрева $DJ_M = 5^\circ\text{C}$ от нарушения ЭМС над длительно допустимой температурой J при номинальной нагрузке двигателя. Тем самым выполняется лишь первое требование. Вследствие этого область применимости стандарта ограничена только действующими электроустановками и то лишь при

возможности измерения температуры. В противном случае, а также в проектировании возникает задача расчета значения Du по графику помехи или ее характеристикам. Для ее решения необходимо выбрать «стандартный» электродвигатель, указать его постоянную времени, дать математические описания $B\Phi$ по схемам замещения каждого вида помех (отклонения и несимметрия напряжений). В этом случае показателями ЭМС будут соответствующие дозы, однозначно выражаемые через J_M : например, доза несимметрии напряжений [11] и доза несинусоидальности [12].

Постоянная времени для разных видов электроприемников будет разной. Для ламп $T \gg 0$, поэтому оценивание ЭМС по десятиминутным напряжениям существенно занижается. Для двигателей постоянная времени превышает 10 мин и оценка ЭМС при $q=10$ мин занижается. Если исходить из рекомендуемой в ПУЭ выдержке времени 3–5 мин для защиты максимального напряжения силовых конденсаторов, постоянная времени может быть принята в пределах от 60 до 100 с, а потому десятиминутное усреднение занижает оценку ЭМС.

Методика контроля ЭМС в действующих электроустановках аналогична существующей, только вместо преобразования L_Q используется L_T . Считывание ординат инерционного процесса проводится через промежутки времени $T_{\Pi}^3 \cdot 3T$. При таком дискретном сглаживании существенно уменьшается объем статистического материала. Ординаты контролируемой помехи в пределах каждого интервала T_{Π} считываются через равные промежутки времени D , а графики помехи и ее квадрата неявно считаются ступенчатыми. Для определения ординат процесса $w_T(t)$ воспользуемся общим решением уравнения (1):

$$w_T(t) = \dot{e} w_{T0} + g \int_0^t \dot{x}^2(t) \exp\{g\tau\} d\tau \dot{u} \exp\{-g\tau\},$$

в котором $g=1/T$, w_{T0} – начальная ордината при $t=0$. Ординаты x_r^2 любой r -й степени в течение времени D остаются неизменными, что позволяет вынести x_r^2 за знак интеграла и выполнить интегрирование

$$w_{Tr}(t) = w_{T0r} \exp\{-g\tau\} + x_r^2 (1 - \exp\{-g\tau\})$$

при $0 \leq t \leq D$, где для любой степени время отсчитывается от ее начала, а $r=1, 2, \dots, T_{\Pi}/D$.

Построение инерционного процесса в пределах D не требуется – достаточно вычислять лишь конечные ординаты для каждой ступени. Для этого следует учесть, что начальная ордината w_{T0r} r -й ступени совпадает с конечной ординатой $w_{T,r-1}$ предыдущей ступени при $t=D$. Обозначив через

$b_D = \exp\{-D/T\}$, получим формулу для конечной ординаты:

$$w_{Tr} = w_{Tr}(D) = w_{T,r-1} b_D + x_r^2 (1 - b_D).$$

Расчет выполняется последовательно для всех интервалов D , начиная с первого, когда $r-1=0$. Если для момента времени $t=0$ начальная ордината w_{T0} первого интервала не задана, то она принимается равной нулю. При $t=D$ конечная ордината

$$w_{T,1} = w_{T,0} + x_1^2 (1 - b_D)$$

будет начальной для второго интервала и т.д. Результаты расчетов для значений r от 1 до T_{Π}/D являются промежуточными – регистрируются лишь ординаты инерционного квадратичного процесса в конце последнего интервала.

Перейдем к сетевому стандарту. Используемая в нем модель без $B\Phi$ (за исключением дозы фликера) предполагает, что входное сопротивление стандартного электроприемника не зависит от вида помехи и характера ее изменения: например, коэффициент несинусоидальности относится только к активным сопротивлениям. В этом случае для перехода к инерционным показателям достаточно заменить q на $T = q/e_0$: при $q=10$ мин и $e_0=3$ постоянная времени $T=200$ с. Тем самым оценка ЭМС приобретает определенный физический смысл: нормы относятся к стандартному электроприемнику с неизменным сопротивлением и постоянной времени 200 с.

Однако в точках общего присоединения получают питание электроприемники с разными постоянными времени и далеко не всегда неизменными сопротивлениями. Поэтому представляется целесообразным и в сетевом стандарте показатели ЭМС принять для нескольких стандартных электроприемников, на которых больше всего влияют те или иные помехи. При таком подходе сетевой стандарт будет содержать несколько показателей из потребительских стандартов. Первый шаг в этом направлении уже сделан: в стандарт [2] включена доза фликера.

Пример расчета. Оценка методических погрешностей десятиминутного усреднения потерь напряжения на одном присоединении и на шинах тяговой подстанции с пятью присоединениями по данным [7]. На участках стационарности нагрузка присоединения почти периодична (рис.1 в [7]) и может быть представлена в виде последовательности прямоугольных импульсов и нулевых пауз. Для одного из них значение импульса равно $B=0,6$ кА, $k_B=0,31$ и $l=0,185$ мин⁻¹. Суммарная нагрузка является случайной, имеет нормальное распределение и экспоненциальную корреляционную функцию. Численные значения: $B_c=0,6$ кА, $k_{B,c}=0,25$ и $l_c=0,2$ мин⁻¹.

Погрешности усреднения потерь напряжения в % практически совпадают с погрешностями усреднения на-

грузки. Расчеты выполнены в отн. ед., базовое значение тока 0,6 кА; нагрузку в отн. ед. обозначим через $x(t)$.

Интервалу $q=10$ мин при $e_0=3$ мин соответствует постоянная времени $T=10/3$ мин. Подставив в (11) значение $lT=0,185 \times 10/3=0,617$ (отн. ед.)² получим квадратичный инерционный максимум:

$$w_{TM} = \frac{1 - \exp\{-0,31/0,617\}}{1 - \exp\{-1/0,617\}} = 0,493.$$

Так как в интервале усреднения помещается один цикл, то в (12) $j=1$. Значение lT находится в пределах от $(1+k_B)/e_0=0,437$ до $2/e_0=2/3$, поэтому для вычисления кумулятивного квадратичного максимума используем нижнее выражение (12):

$$w_{qM} = (1+1)0,31/3 \times 0,617 = 0,335.$$

Эффективные максимумы:

$$x_{wTM} = \sqrt{w_{TM}} = \sqrt{0,493} = 0,702;$$

$$x_{wqM} = \sqrt{w_{qM}} = \sqrt{0,335} = 0,579.$$

Методические погрешности (14) и (15):

$$d_{wM} = (0,335/0,493 - 1)100\% = -32\%;$$

$$d_{xM} = (0,579/0,702 - 1)100\% = -17,5\%.$$

Перейдем к суммарной нагрузке. По (13) найдем числовые характеристики нормального распределения и параметры КФ:

$$x_c = 5 \times 0,25 = 1,25; \quad s_x = \sqrt{5 \times 0,25 \times 0,75} = 0,968;$$

$$a = \frac{0,2}{0,25 \times 0,75} = 1,067 \text{ мин}^{-1}.$$

По этим данным методом элементарных процессов при $n=5$ была выполнена имитация случайной помехи. После возведения ее в квадрат и выполнения нелинейных преобразований (2) и (5) с интегральной вероятностью 0,95 найдены значения искоемых максимумов $w_{wM}=5,027$ и $w_{qM}=4,664$; $x_{wTM}=2,242$ и $x_{wqM}=2,155$. Методические погрешности:

$$d_{wM} = (4,664/5,027 - 1)100\% = -7,2\%;$$

$$d_{xM} = (2,155/2,242 - 1)100\% = -3,9\%.$$

Полученные значения максимумов и погрешностей на рис. 4 и 6 показаны кружками.

Выводы. 1. Показатели ЭМС, основанные на квадратичном усреднении помех, не имеют физического смысла и неадекватно отражают последствия ухудшения ЭМС.

2. Физический смысл, достоверность и универсальность оценок ЭМС обеспечиваются моделированием воздействий помех на электроприемники. Соответствующая модель ЭМС должна иметь блок моделирования реакции электроприемника на помеху и блок квадратичного инерционного сглаживания.

3. В «потребительских» стандартах на показатели ЭМС отдельного вида электроприемников параметры моделей ЭМС следует принимать для наиболее представительных («стандартных») электроприемников этого вида.

4. Совершенствование «сетевого» стандарта на ЭМС в точках общего присоединения должно осуществляться путем использования показателей ЭМС из потребительских стандартов для стандартных электроприемников, наиболее чувствительных к тому или иному виду помех.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куренный Э.Г., Дмитриева Е.Н., Ковальчук В.М., Коломытцев А.Д. Кумулятивный принцип оценки качества напряжения. — Электричество, 1978, № 9, с. 14—19.
2. ГОСТ 32145—2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. с 01.01.2014. — М.: Госстандарт.
3. CEI/IEC 61000-4—15. Electromagnetic compatibility. Part 4, Section 15: Flickermeter — Functional and design specification, 1997.
4. Дмитриева Е.Н. Принцип практической уверенности в задачах электроэнергетики. — Электричество, 2008, № 6, с.15—21.
5. Каялов Г.М. Принцип максимума средней нагрузки в расчетах электрических сетей. — ИВУЗ. Электромеханика, 1964, № 3, с. 367—374.
6. Шидловский А.К., Куренный Э.Г. Введение в статистическую динамику систем электроснабжения. — Киев.: Наукова думка, 1984, 271 с.
7. Авилов-Карнаухов Б.Н., Гордеев В.И., Дмитриева Е.Н., Платонов В.В. Расчет электрических нагрузок фидеров контактной сети и тяговых подстанций открытых горных выработок. — Электричество, 1980, № 5, с. 50—55.
8. Куренный Э.Г., Дмитриева Е.Н. Статистическое моделирование нормальных процессов в заводских электрических сетях. *Elektrichestvo (Electricity)*, 2016, No. 1, pp. 12—20.

тях. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1977, № 5, с. 128—140.

9. Карташов В.Я., Новосельцева М.А. Цифровое моделирование стационарных случайных процессов с заданной корреляционной функцией на основе метода непрерывных дробей. — Управление большими системами, 2010, № 31, с. 49—91.

10. ГОСТ 183—74. Машины электрические вращающиеся. Общие технические требования. Введ. 01.01.76. — М.: Госстандарт.

11. Куренный Э.Г., Дмитриева Е.Н., Лютый А.П., Сидоренко О.А. Оценка и нормирование несимметрии напряжений в системах электроснабжения общего назначения. — Электричество, 2008, № 4, с. 18—26.

12. Куренный Э.Г., Лютый А.П. Оценка несинусоидальности напряжения. — Электричество, 2005, № 8, с. 1—20.

[29.01.15]

А в т о р ы : Куренный Эдуард Григорьевич в 1961 г. окончил электромеханический факультет Новочеркасского политехнического института (НПИ). В 1974 г. защитил докторскую диссертацию «Основы общей теории вероятностных процессов в заводских электрических сетях» в НПИ. До 2015 г. — профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий и городов Донецкого национального технического университета (ДонНТУ).

Дмитриева Елена Николаевна в 1968 г. окончила электромеханический факультет Донецкого политехнического института. В 1976 г. защитила кандидатскую диссертацию. Скончалась в 2013 г.

Лютый Александр Павлович окончил электротехнический факультет Запорожского машиностроительного института в 1978 г. В 2003 г. защитил кандидатскую диссертацию. Директор по энергетике ОАО «Днепроспецсталь».

Inertia Principle for Estimation and Normalization of Electromagnetic Compatibility

KURENNYI Eduard Grigor'yevich (*Donetsk National Technical University (DNTU), Donetsk, Ukraine*)
— *Professor, Dr. Sci. (Eng.)*

DMITRIYEVA Elena Nikolayevna (*DNTU, Donetsk, Ukraine — Cand. Sci. (Eng.). She died in 2013*)

LYUTYI Aleksandr Pavlovich (*JSC «Dneprspetsstal', Donetsk, Ukraine — Chief Power Engineer, Cand. Sci. (Eng.)*)

BULGAKOV Aleksandr Aleksandrovich (*DNTU, Donetsk, Ukraine — Research Assistant*)

Two methods taking into account object inertia are considered, when EMC estimation is executed. The first method is averaging of object squared reaction to interference on specified interval (cumulative principle). The second method is quadratic smoothing (inertial principle). Fundamental disadvantages of cumulative principle are lack of physical analog and nonmonotonicity of EMC index change when object inertia increases. They are shown by example estimation of additional heating when EMC interference is present. It is proposed to change cumulative principle by inertial principle for ensuring of physical sense for EMC indices and adequate estimation of negative influence of EMC interferences. Recommendations for application of inertial principle in EMC standards are given.

Key words: *electromagnetic compatibility, normalization, models, quadratic smoothing, quadratic averaging*

Булгаков Александр Александрович окончил электротехнический факультет ДонНТУ в 2011 г. Ассистент кафедры ЭСИС ДонНТУ.

REFERENCES

1. **Kurennyi E.G., Dmitriyeva E.N., Koval'chuk V.M., Kolomytsev A.D.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1978, No. 9, pp. 14–19.
2. **GOST 32145–2013.** *Mezhhgosudarstvennyi standart. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Kontrol' kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya (GOST 13109-97: Interstate Standard. Electric Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Power Quality Limits in Public Electrical Systems)*. Introduced from oq.01.2014 Moscow, Publ. Gosstandart.
3. **CEI/IEC 61000-4-15.** Electromagnetic compatibility – Part 4, Section 15: Flickermeter – Functional and design specification, 1997.
4. **Dmitriyeva E.N.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2008, No. 6, pp. 15–21.
5. **Kayalov G.M.** *Izvestiya vyzov. Elektromekhanika – in Russ. (News of Higher Education Institutions. Electromechanics)*, 1964, No. 3, pp. 367–374.
6. **Shidlovskii A.K., Kurennyi E.G.** *Vvedenie v statisticheskuyu dinamiku sistem elektrosnabzheniya (Introduction to statistical dynamics of power supply systems)*. Kiyev, Publ. «Naukova dumka».
7. **Avilov-Karnaukhov B.N., Gordeyev U.I., Dmitriyeva E.N., Platonov V.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1980, No. 5, pp. 50–55.
8. **Kurennyi E.G., Dmitriyeva E.N.** *Izvestiya AN SSSR. Energetika i transport – in Russ. (Proc. of USSR Academy of Sciences. Power Engineering and Transport)*, 1977, No. 5, pp. 128–140.
9. **Kartashov V.Ya., Novole'tseva M.A.** *Upravleniye bol'shimi sistemami – in Russ. (Control of Grand Systems)*, 2010, No. 31, pp. 49–91.
10. **GOST 183–74.** *Mashiny elektricheskiye vrashchayushchiesya. Obshchiye Tekhnicheskiye trebovaniya (Rotating electrical machines. General specifications)*. Introduced from 01.01.76. – Moscow, Publ. Fosstandart.
11. **Kurennyi E.G., Dmitriyeva E.N., Lyutyi A.P., Sidorenko O.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2008, No. 4, pp. 18–26.
12. **Kurennyi E.G., Lyutyi A.P.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2005, No. 8, pp. 1–20.