

# МЕТОДЫ НОРМИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

Куренный Э.Г., Дмитриева Е.Н., Цыганкова Н.В., Черникова Л.В.  
Донецкий государственный технический университет  
led@dgtu.donetsk.ua

*The problem of voltage oscillations standardization is considered. This paper shows contradiction of current demands and there groundlessness in lower frequency region. The means of standards upgrading of SNG countries and IEC are purposed.*

**Постановка задачи.** Электроприемники с резкопеременной нагрузкой вызывают быстрые изменения («колебания») напряжения на зажимах источников света (лампы). Это приводит к дополнительному утомлению людей, работающих при искусственном освещении. Уменьшается производительность труда и ухудшается зрение. Поэтому нормирование колебаний напряжения всегда было актуальной задачей.

В [1] принято два способа нормирования колебаний напряжения: по дозе фликера  $P_S$  и по «кривым размахов» (термин наш), которые представляют зависимости допустимых размахов  $\delta U_i$  колебаний от их частоты  $F$ . Кривые даются лишь для помех в форме меандра, а для периодических колебаний другого вида рекомендуется приближенный метод, но только для частот менее  $120 \text{ мин}^{-1}$ .

В статье показывается противоречивость существующих норм и неуниверсальность методов расчета показателей колебаний напряжения, а также даются предложения по совершенствованию межгосударственного стандарта [1] и стандарта [2] Международной электротехнической комиссии (МЭК).

**Фликер-модель.** Для того, чтобы показатели электромагнитной совместимости (ЭМС) были физически обоснованными, в [3] было предложено моделировать последствие воздействия помех на исследуемые объекты. В рассматриваемой задаче показатель ЭМС – доза фликера – устанавливается путем моделирования системы «лампа – зрение – мозг». Так как колебания происходят в небольшом диапазоне, часть фликер-модели (взвешивающий фильтр [2]) может быть линеаризована: до реакции мозга включительно. Процесс утомления моделируется нелинейными блоками. Допустимое значение  $P_{SD}$  дозы фликера отражает допустимый уровень дополнительного утомления человека.

В [1] принята фликер-модель МЭК из [2]. Взвешивающий фильтр модели не имеет разделения блоков по функциональному признаку (лампа – мозг). Это объясняется тем, что его структура выбиралась методом параметрической идентификации: при «стандартной» лампе накаливания 60 Вт экспериментально находилась амплитудно-частотная функция (АЧФ)  $A(\omega)$ , по которой формально подбиралась структурная схема взвешивающего фильтра. Был принят фильтр из трех блоков: фильтра верхних частот (выше 0,05 Гц) с передаточной функцией (ПФ)

$$W_1(s) = \frac{T_b s}{T_b s + 1}, \quad (1)$$

фильтра нижних частот (менее 35 Гц) с ПФ

$$W_2(s) = \frac{1}{(T_{B2}^2 s^2 + T_{B1} s + 1)(T_{B2}^2 s^2 + T_{B3} s + 1)(T_{B2}^2 s^2 + T_{B4} s + 1)}$$

и фильтра восприятия (термин наш) с ПФ

$$W_3(s) = \frac{k T_2 s (T_5 s + 1)}{(T_2^2 s^2 + T_1 s + 1)(T_3 s + 1)(T_4 s + 1)}, \quad (2)$$

где  $k = 1,748$ ,  $T_b = 3,1831 \text{ с}$ ,  $T_{B1} = 2,3537 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ ,  $T_{B2} = 4,573 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ ,  $T_{B3} = 6,4308 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ ,  $T_{B4} = 8,7849 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ ,  $T_1 = 1,5418 \cdot 10^{-2} \text{ с}$ ,  $T_2 = 1,7385 \cdot 10^{-2} \text{ с}$ ,  $T_3 = 0,12989 \text{ с}$ ,  $T_4 = 7,2673 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ ,  $T_5 = 6,9811 \cdot 10^{-2} \text{ с}$ .

ПФ взвешивающего фильтра равна произведению этих выражений:

$$W(s) = W_1(s)W_2(s)W_3(s). \quad (3)$$

Таким образом, взвешивающий фильтр описывается дифференциальным уравнением 11-го порядка.

Линеаризация позволяет рассматривать не сам процесс изменения напряжения  $U(t)$ , а только его переменную составляющую  $\Delta U(t)$ , которая получается вычитанием из  $U(t)$  одномоментного тренда [1]. С учетом

этого и наличия фильтра низших частот “колебания” целесообразно определить как переменную составляющую процесса изменения действующих значений напряжения в частотном диапазоне до 35 Гц.

Утомление моделируется квадратором и инерционным звеном первого порядка с ПФ

$$W_{\text{и}}(s) = \frac{k_{\text{и}}}{T_{\text{и}}s + 1}, \quad (4)$$

где  $T_{\text{и}} = 0,3$  с,  $k_{\text{и}}$  – коэффициент передачи, который будет определен ниже. Процесс  $S(t)$  на выходе звена именуется ощущением фликера.

Для определения дозы фликера в блоке статистической обработки строится функция кумулятивных вероятностей  $E_r$  (упорядоченная диаграмма) ощущений фликера, по которой для значений вероятности 0,1; 1; 3; 10 и 50% определяются соответствующие уровни  $P_r$  фликера. Доза фликера вычисляется по эмпирической формуле

$$P_S = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}}. \quad (5)$$

Длительно допустимое значение дозы для работ, не требующих зрительного напряжения, равно единице.

**Принципы нормирования и контроля.** Фликер-модель является универсальной в том смысле, что она применима для помех любого вида. Поэтому принцип нормирования по дозе фликера является необходимым и достаточным.

Вместе с тем для периодических помех с одним импульсом за цикл возможно нормирование по кривым размахов, но при условии, что любая точка на кривой соответствовала бы допустимой дозе фликера. Для этого необходимо выразить дозу в виде функции  $P_S(\delta U)$  от размаха колебаний и определить допустимые размахи

$$\delta U_{\text{д}} = \text{arc}(P_{\text{Сд}}). \quad (6)$$

при разных частотах колебаний. Только при выполнении соотношения (6) оценки ЭМС по дозе фликера и по кривым размахов будут совпадать.

Наличие фильтра верхних частот ограничивает область применимости фликер-модели МЭК частотами выше 0,05 Гц. При меньших частотах (0,007 Гц в [4]) колебания напряжения оцениваются не по утомлению человека, а из условия обеспечения пуска асинхронных электродвигателей. С искусственным объединением двух задач нельзя согласиться: колебания следует связывать с фликер-эффектом, а влияние изменений напряжения на пуски электродвигателей – относить к отклонениям напряжения за время пуска.

В действующих электрических сетях контроль ЭМС осуществляется фликерметром [1, 2], структурная схема которого совпадает с фликер-моделью. При отсутствии фликерметра необходимо регистрировать график помехи и по нему рассчитывать дозу фликера. Доза рассчитывается и в проектировании. Достоверность расчетов обеспечивается, если методы расчета разработаны применительно к фликер-модели, а не к кривым размахов, как это принято в [1].

Решение производится в два этапа: вначале находится реакция  $Y(t)$  взвешивающего фильтра (или ее характеристики), а затем определяется доза фликера. Как будет показано, для гармонических помех аналитическое решение находится без затруднений, так как расчет ведется только с использованием АЧФ. Для помех другого вида, детерминированных и случайных, на первом этапе целесообразно использовать метод парциальных реакций [5], который основан на представлении взвешивающего фильтра в виде 11 параллельно включенных инерционных звеньев первого порядка. Нахождение парциальной реакции для каждого звена выполняется довольно просто. Искомая реакция получается их суммированием. При наличии случайных помех парциальные реакции оказываются коррелированными, что необходимо учитывать при определении характеристик реакции.

Аналитическое решение задачи о квадратичном инерционном сглаживании при случайных помехах отсутствует. Методы имитации [6] позволили установить, что вероятностное распределение ощущений фликера подчиняется бета-распределению или, в случае нормального распределения ординат помехи, гамма-распределению. Параметры этих распределений выражаются через характеристики реакции. Это позволяет получить аналитические выражения для дозы фликера напряжения для любого вида помех.

Наличие точных методов расчета позволяет отказаться от рекомендуемых в [1] приближенных методов.

**Гармонические колебания.** В [1] частота размахов измеряется в 1 / мин. Для периодических колебаний с одним импульсом в цикле удобно использовать частоту колебаний  $\lambda = F / 120$  в Гц и угловую частоту  $\omega = 2\pi\lambda$  в рад / с.

При подаче на вход фликер-модели гармонической помехи  $\Delta U = B \sin \omega t$  с амплитудой  $B = \delta U_r / 2$  на выходе взвешивающего фильтра в принужденном режиме будет наблюдаться гармонический процесс с той же частотой и амплитудой  $B_r = B A(\omega)$ . АЧФ фильтра представлена на рис. 1 кривой 1.

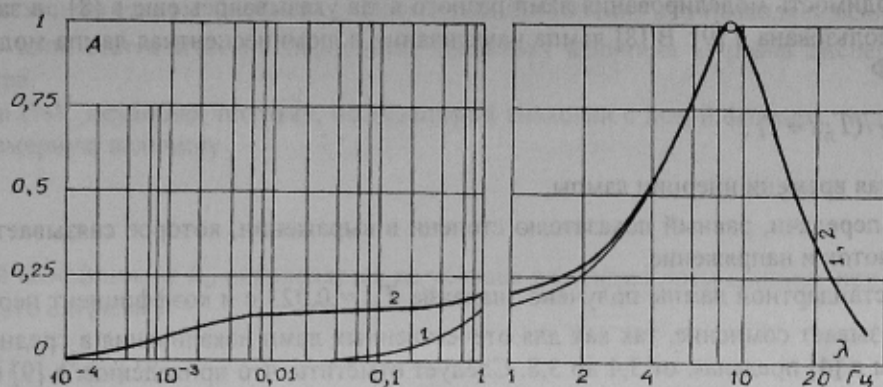


Рисунок 1 – АЧФ взвешивающих фильтров

Нетрудно убедиться, что вероятностное распределение фликера подчиняется закону арксинуса [7] со средним значением  $S_c = k_n B^2 / 2$  и параметром  $a = S_c / (1 + \omega^2 T_n^2)^{1/2}$ . В этом случае уровни фликера определяются по формуле:

$$P_r = S_c + a \sin \pi(0,5 - E_r / 100), \quad (7)$$

чем согласно (5) решается задача расчета доз фликера.

Определим значение  $k_n$  из условия равенства дозы единице при подаче на вход фликер-модели калибровочного гармонического сигнала с размахом 1% и частотой 50/17 Гц [2]. В этом случае значение АЧФ взвешивающего фильтра равно 0,3713;  $S_c = 0,01723 k_n$ ,  $a = 1,548 \cdot 10^{-3} k_n$ ,  $P_{0,1} \approx P_1 \approx P_3 = 0,0188 k_n$ ,  $P_{10} = 0,0187 k_n$ ,  $P_{50} = 0,0172 k_n$ . Подстановка уровней фликера в (5) дает величину  $0,097 \sqrt{k_n}$ , приравнявая которую к единице, найдем искомое значение  $k_n = 106 (\%)^2$ .

В [1] ошибочно указано, что уровни фликера измеряются в  $(\%)^2$ . На самом деле, они выражаются в относительных единицах (per unit – в [4]). Фактически в [1] отсутствует коэффициент  $k_n$ , вследствие чего дозы занижаются в 10 раз.

Расчеты по формуле (6) дают кривую размахов 1 на рис.2, минимум которой  $\delta U_{d \min} = 0,38\%$  достигается при частоте 8,85 Гц. Здесь же приведена кривая 2, построенная по данным табл. 1 из [2] и кривая 3, полученная умножением ординат кривой 1 из [1] на коэффициенты пересчета прямоугольных размахов на гармонические (рис.13 в [4]). Сопоставление этих кривых с кривой 1 показывает несоответствие требований [1] и [2] по дозе фликера и по кривым размахов. Особенно наглядно это проявляется в зоне минимумов: 0,25% - для кривой 2 и 0,5% для кривой 3 вместо 0,38%.

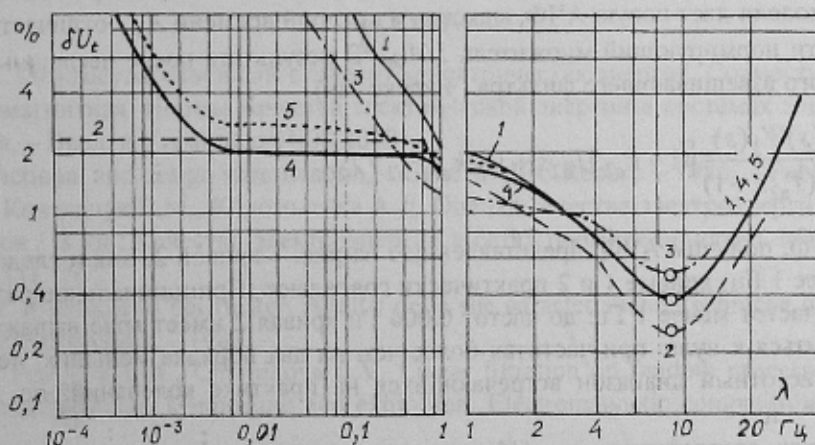


Рисунок 2 – Кривые допустимых размахов гармонических колебаний

**Учет источников света.** Нормы [1], как и [2], относятся к стандартной лампе накаливания. Другие источники света имеют иные динамические характеристики, а потому при тех же колебаниях напряжения создают другой фликер-эффект. Например, обычные люминесцентные лампы создают колебания напряжения в 2,4 раза меньшие, чем лампы накаливания. Энергосберегающие лампы также менее критичны к колебаниям напряжения. Завышение требований в 2,4 раза ведет к неоправданному увеличению капитальных затрат на обеспечение необходимого качества напряжения. В прежнем ГОСТ 13109-87 это обстоятельство учитывалось. Отказ от такой нормы в [1] представляется необоснованным.

На необходимость моделирования ламп разного вида указывалось еще в [8], а затем и в [7]. Впоследствии эта идея использована в [9]. В [8] лампа накаливания и люминесцентная лампа моделировались инерционным звеном с ПФ

$$W_{\text{л}}(s) = \gamma / (T_{\text{л}}s + 1), \quad (8)$$

где  $T_{\text{л}}$  – постоянная времени инерции лампы,

$\gamma$  – коэффициент передачи, равный показателю степени в выражении, которое связывает в относительных единицах световой поток и напряжение.

В [9] для стандартной лампы получено значение  $T_{\text{лс}} = 0,023$  с и коэффициент передачи  $\gamma_{\text{с}} = 1,9$ . Последний параметр вызывает сомнение, так как для отечественных ламп накаливания в среднем  $\gamma = 3,6$ , что соответствует указанным в [4] пределам от 3,4 до 3,8. Следует отметить, что приведенная в [9] формула (5) для лампы типа ESL11 ошибочна, так как в ней не соблюдается размерность ПФ.

Если стандартная лампа имеет ПФ  $W_{\text{лс}}(s)$ , то переход к другой лампе с ПФ  $W_{\text{л}}(s)$  осуществляется умножением (3) на  $W_{\text{л}}(s) / W_{\text{лс}}(s)$ . В инженерных целях достаточно вводить коэффициент пересчета. Например, для ламп накаливания  $\gamma = 3,6$ , а у люминесцентных ламп – 1,5. Несмотря на различие в постоянных времени (у люминесцентных ламп  $T_{\text{л}} \approx 0$ ), дозу фликера для люминесцентных ламп можно получать умножением дозы фликера для ламп накаливания на  $1,5/3,6 = 0,42$ .

**Фликер-эффект нижних частот.** Принятый в [2] экспериментальный подход к определению АЧФ не мог обеспечить достоверные результаты в области нижних частот. Это связано с тем, что в области высоких частот преобладающее значение имеют электрические процессы в мозгу у человека («быстрая» адаптация), которые и вызывают заметные субъективные ощущения у человека. В области же нижних частот преобладают фотохимические процессы («медленная» адаптация), но их действие более чем в 10 раз слабее, что трудно оценить субъективно. Именно поэтому во фликер-модели МЭК пришлось искусственно ограничить область ее применения частотами выше 0,05 Гц. Горизонталь же на кривой 2 при частотах менее 0,05 Гц относится не к фликер-эффекту, а к пуску двигателей.

Процесс быстрой адаптации моделируется реальным дифференцирующим звеном с ПФ вида (1). Постоянная времени  $T_{\text{а1}}$  звена, по литературным данным, составляет десятки миллисекунд. К принятому в [8] значению 0,016 с наиболее близко значение постоянной времени  $T_2$ . Для того, чтобы выделить звено медленной адаптации, необходимо ПФ взвешивающего фильтра умножить и разделить на  $T_2s + 1$ . Параллельно этому звену подключим звено медленной адаптации с ПФ

$$W_{\text{а2}}(s) = \frac{k_{\text{а2}}T_{\text{а2}}s}{(T_{\text{а2}}s + 1)}, \quad (9)$$

где  $k_{\text{а2}} = 0,09$ ,  $T_{\text{а2}} = 70$  с.

Фильтр верхних частот, ограничивающий область применимости фликер-модели, становится излишним. Изменение фликер-модели дает новую АЧФ, максимум которой времени  $A_{\text{аМ}}$  отличается от единицы. В связи с этим требуется ввести нормирующий множитель  $1/A_{\text{аМ}}$ . В результате после несложных преобразований получим ПФ предлагаемого взвешивающего фильтра (индекс «а»)

$$W_{\text{а}}(s) = \frac{W_2(s)W_3(s)}{A_{\text{аМ}}(T_{\text{а2}}s + 1)} \left[ (1 + k_{\text{а2}})T_{\text{а2}}s + 1 + k_{\text{а2}}T_{\text{а2}}/T_2 \right]. \quad (10)$$

Заменив  $s$  на  $j\omega$ , получим АЧФ, представленную на рис. 1 кривой 2. Как и следовало ожидать в области высоких частот (более 1 Гц) кривые 1 и 2 практически совпадают. Принципиальное различие между ними проявляется в области частот менее 1 Гц: до частот 0,004 Гц кривая 2 имеет ярко выраженный пологий участок. Она начинает стремиться к нулю при частотах более чем на два порядка меньших, чем кривая 1. Тем самым охватывается весь частотный диапазон встречающихся на практике колебаний: по данным фирмы General Electric, более  $1,4 \cdot 10^{-4}$  Гц.

Кривую размахов, соответствующую (10), построим из условия совпадения минимумов существующей и предлагаемой фликер-моделей. Расчеты по формуле (6) дают кривую 4 (рис.2), которая при частотах более 1 Гц практически совпадает с кривой 1. В области нижних частот кривая 1 имеет пологий участок, случайно оказавшийся близким к горизонтали на кривой 2. На предлагаемой кривой отсутствует физически необъяснимое возрастание существующей кривой 1 при частотах менее 0,05 Гц.

Аналогичным образом можно получить кривые размахов для периодических колебаний другой формы. В нормативных документах целесообразно привести библиотеку кривых размахов.

**Доза колебаний напряжения.** В ГОСТ 13109-87, в отличие от [1], колебания оценивались дозой колебаний в (%)<sup>2</sup>. Этот показатель принципиально отличается от дозы фликера способом учета утомления человека.

Выполненные исследования показали, что утомление человека начинает проявляться примерно через 10 мин после возникновения колебаний напряжения. Поэтому утомление наиболее просто моделировать квадра-

тором и кумулятивным звеном (окном Дирихле) с параметром  $\theta_s = 10$  мин. Это позволяет исключить инерционное звено с ПФ (4) и блок статистической обработки, поскольку величина  $\psi$  равна дисперсии  $DY$  реакции взвешивающего фильтра.

Измерение доз в  $(\%)^2$  неудобно, поэтому, по некоторой аналогии с дозой фликера, под дозой колебаний будем понимать безразмерную величину

$$\psi = k_\psi \sqrt{DY}, \quad (11)$$

в которой масштабный коэффициент  $k_\psi$  определяется из условия равенства дозы единице при резонансной частоте. Для гармонического сигнала

$$DY = B_Y^2 / 2 = \delta U^2 A^2(\omega) / 8. \quad (12)$$

Подставив сюда значения размаха 0,38% и АЧФ, равное единице, при  $\psi = 1$  найдем

$$k_\psi = \sqrt{8} / \delta U_{\text{дmin}} = \sqrt{8} / 0,38 = 7,443 (\%)^{-1}.$$

Из выражений (11) и (12) следует формула для определения допустимых размахов в % при гармонических помехах:

$$\delta U_{\text{д}} = \delta U_{\text{дmin}} / A(\omega) = 0,38 / A(\omega), \quad (13)$$

которая намного проще (6). Соответствующая кривая размахов 5 (рис.2) немного отличается от кривой 4 в области частот ниже 1 Гц.

Учитывая, что доза колебаний по сравнению с дозой фликера физически более обоснована и значительно упрощает измерения и расчеты, особенно при наличии нескольких источников помех, для инженерной практики представляется целесообразным использовать именно этот показатель.

**Выводы.** 1. Стандарты стран СНГ и МЭК содержат противоречивые требования по дозе фликера и кривым размахов, а также физически необоснованные нормы в области частот менее 1 Гц.

2. При сохранении понятия дозы фликера в [1] необходимо дать полное описание фликер-модели, устранить ошибку в размерности ощущений и уровней фликера, дать точные методы расчета доз фликера, привести в соответствие допустимым дозам фликера кривые размахов, а также дать кривые размахов для периодических помех разной формы.

3. Достоверность и общность оценок ЭМС будет обеспечена путем изменения структуры взвешивающего фильтра фликер-модели МЭК. Для этого потребуется исключить фильтр верхних частот с ПФ (1), добавить блоки, моделирующие фактические источники света и медленную адаптацию зрения.

4. Целесообразно от нормирования дозы фликера перейти к дозам колебаний напряжения, которые имеют наглядный физический смысл и существенно упрощают структуру фликерметра и методы расчета.

#### ЛИТЕРАТУРА

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. Flickermeter. Functional and design specification. – Geneva: IEC Report. – 1986. – Publication 868.
3. Куренный Э.Г., Ковальчук В.М., Коломытцев А.Д. Оценка качества электроэнергии с использованием моделей объектов / В кн.: Качество электроэнергии в сетях промпредприятий. Материалы конференции. – М.: МДНТП, 1977.
4. Mirra C., Sani G. Il fenomeno del flicker. Analisi delle sue caratteristiche. Tecniche di misura e metodi di limitazione. – L'Elettrotecnica. – 1987.
5. Kourennyi E.G., Petrosov V.A., Chernikova L.V. Linear filtration on random processes in EMC models. Fifteen International Wroclaw symposium and exhibition: Electromagnetic compatibility 2000. – Wroclaw, 2000, part 2.
6. Kourennyi E.G., Petrosov V.A., Pogrebnyak N.N. Squaring and smoothing in EMC models: a statistical solution. – Fifteen International Wroclaw symposium and exhibition: Electromagnetic compatibility 2000. – Wroclaw, 2000, part 1.
7. Шидловский А.К., Куренный Э.Г. Введения в статистическую динамику систем электроснабжения. – Киев: Наукова думка, 1984.
8. Математическое моделирование воздействий фликера / Э.Г. Куренный и др. – Fifth International Wroclaw Symposium of Electromagnetic Compatibility, 1980.
9. Brauner G., Hennerbichler C. Lamp models for flicker simulation and illumination planning. – Fifth International Conference: Electrical Power Quality and Utilisation. – Cracow, 1999.