

Погрешности расчета доз фликера напряжения и проверка функционирования фликерметра

ДМИТРИЕВА Е.Н., КУРЕННЫЙ Э.Г., ТОПЧИЙ В.А.

Показаны несоответствия в действующих стандартах между характеристиками испытательных сигналов и кривой размахов, между требованиями к точности измерения доз фликера и размахов колебаний. Предлагаются способы совершенствования проверки функционирования фликерметра и нормирования погрешностей.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, фликерметр, проверка функционирования, погрешность измерения доз

Универсальным показателем электромагнитной совместимости (ЭМС) по колебаниям напряжения является доза фликера (кратко – доза). В частных случаях идеализированных периодических колебаний простой формы (гармонических или прямоугольных) используются «кривые размахов» — зависимости допустимых размахов $d\hat{U}_t$ от частоты колебаний f . Очевидно, что при этом должно выполняться условие эквивалентирования: каждая точка на кривых размахов должна соответствовать одному и тому же допустимому значению дозы. Такое же требование предъявляется и к характеристикам испытательного сигнала, которые должны выбираться по точкам кривых размахов.

Хотя в [1, 2] условие эквивалентирования сформулировано, оно не выполняется: характеристики измерительного сигнала в табл. 5 существенно отличаются от соответствующих размахов в табл. 2. В [3] в части доз сделана ссылка на [1], но кривые размахов не соответствуют данным табл. 2 из [1].

Различаются и подходы к нормированию погрешностей показателей ЭМС. В [1, 2] нормируется одно значение допустимой дозы и одно значение абсолютной погрешности. В то же время в [3] нормируются два значения дозы¹ и одно значение относительной погрешности, что дает две разные абсолютные погрешности.

На зрение человека колебания освещенности воздействуют непрерывно, в связи с чем подаваемый на вход взвешивающих фильтров (ВФ) фликер-модели процесс изменения действующих значений напряжения $U(t)$ должен быть непрерывным. В [1] говорится про огибающую процесса, но не указывается способ ее построения. В [3] приняты

Inconsistencies existing in the effective standards with regard to the characteristics of test signals and peak-to-peak curve and between the requirements for the accuracy of flicker dose measurements and fluctuation amplitudes are considered. Methods for improving the performance check of flicker meter and standardization of errors are proposed.

Key words: electromagnetic compatibility, flicker meter, performance check, dose measurement error

два взаимоисключающих способа: наклонными линиями (рис. А.1 и рис. Б.1,а) и ступеньками (рис. Б.1,б).

Целью статьи является устранение отмеченных неопределенностей² и противоречий. Изложение ведется на примере фликер-модели из [1], но все выводы могут быть распространены на модели с расширенным частотным диапазоном. Для краткости рассмотрим только кратковременные дозы P_{St} . Так как тексты стандартов [1, 2] аутентичны, далее ссылки будут делаться только на стандарт [1].

Понятие колебаний. На вход фликерметра поступает сигнал изменения мгновенных значений напряжения $u(t)$. Во входном блоке проводится его среднеквадратичное осреднение (СКО) на интервале $\tau = 0,01$ с, которое дает процесс $U(t)$. Вычисляется также тренд $V(t)$ — путем осреднения процесса $U(t)$ на последовательных односторонних интервалах.

Колебания напряжения

$$U_k(t) = \frac{U(t) - V(t)}{V(t)} 100 \quad (1)$$

выражаются в процентах тренда.

В [1] неявно предполагается, что при проверке функционирования тренд остается неизменным, но не указывается его значение. Это создает неопределенность: одно и то же колебание (1) может быть получено при разных сочетаниях трендов и размахов. Примем, что тренд равен номинальному напряжению U_H .

В темпе реального времени непрерывное СКО

$$U(t) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t u^2(t) dt} \quad (2)$$

¹ Учет условий зрительной работы при нормировании доз является достоинством стандарта [3].

² Пути устранения погрешностей фильтрации колебаний и тренда рассмотрены в [4].

Осуществляется в пределах от $t - \varrho$ до t . При дискретном СКО вместо непрерывной кривой получается решетчатая функция – последовательность ординат с шагом ϱ . Процесс (2) отстает от процесса $u(t)$ на время $\varrho/2$, поэтому для удобства анализа полученный график целесообразно сдвинуть влево по оси t на $0,005$ с, что равносильно замене пределов интегрирования в (2): от $t - \varrho/2$ до $t + \varrho/2$.

Необходимость непрерывного СКО проиллюстрируем на идеализированном примере. Пусть в результате преобразования (2) было получено гармоническое колебание частотой 25 Гц (рис. 1, кривая 1). Дискретное же СКО за цикл длительностью $1/25 = 0,04$ с дало бы только пять ординат (о – на рис. 1). Если вид процесса колебаний неизвестен, то, соединив эти точки в соответствии либо с рис. Б.1,а, либо с рис. Б.1,б из [3], получили бы вместо фактической синусоиды колебания либо в виде треугольника (ломаная 2), либо в виде равноотстоящих прямоугольников (ломаная 3). Дозы, вычисленные по этим графикам, существенно разнятся.

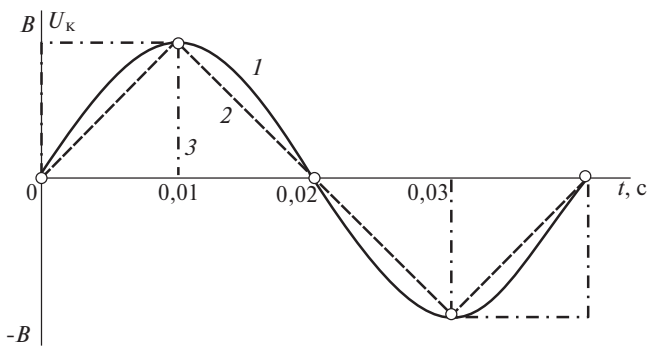


Рис. 1. Способы проведения огибающей колебаний частотой 25 Гц: 1 – синусоидой; 2 – по рис. Б.1,а из [3]; 3 – по рис. Б.1,б из [3]

В цифровой фликер-модели непрерывное СКО реализуется путем представления входного процесса $u(t)$ решетчатой функцией с шагом $D_u < \varrho$.

В стандартах существует логическое противоречие в определении действующих значений: при оценке доз интервал СКО равен $0,01$ с, а отклонений напряжения и несинусоидальности – $t_f = 2\varrho = 0,02$ с. В результате при СКО на $0,01$ с могут появиться колебания частотой 50 Гц, хотя при СКО на $0,02$ с их нет. Действительно, если периодический несинусоидальный процесс $u(t)$ не обладает симметрией относительно оси времени, то действующие значения при СКО на интервалах $0,01$ с отличаются друг от друга, а на интервалах $0,02$ с процесс $U(t)$ будет неизменным. Во втором случае доза равна нулю, а в первом – отлична от нуля. Вопрос о необходимости нормирования по-

грешности измерения доз колебаний 50 Гц требует изучения.

Кривые размахов. В блок ВФ фликер-модели входят восприятия колебаний (ВК), а также фильтры верхних частот (ВЧ) и нижних (НЧ). В п. 4.7 из [1] приведена передаточная функция $F(s)$ блока ВК, где s – комплексная переменная в преобразовании Лапласа. Передаточная функция имеет параметры³: $k = 1,74802$; $w_1 = 2p9,15494$; $w_2 = 2p2,27979$; $w_3 = 2p1,22535$; $w_4 = 2p21,9$; $l_{\text{МЭК}} = 2p4,05981 \text{ с}^{-1}$. По ней найдем амплитудно-частотную функцию (АЧФ):

$$A_{\text{ВК}}(l) = kt_1 l \sqrt{\frac{1 + t_2^2 l^2}{[(1 - t_1^2 l^2) + t_5^2 l^2](1 + t_3^2 l^2)(1 + t_4^2 l^2)}}$$

где $t_1 = 2p / w_1 = 1/9,15494$; $t_2 = 2p / w_2 = 1/2,27979$; $t_3 = 2p / w_3 = 1/1,22535$; $t_4 = 2p / w_4 = 1/21,9$; $t_5 = 4pl_{\text{МЭК}} / w_1^2 = 0,096877 \text{ с}$.

Общие формулы [5] дают АЧФ фильтров с частотами среза $0,05$ и 35 Гц:

$$A_{\text{ВЦ}}(l) = 1 / \sqrt{1 + (0,05 / l)^2};$$

$$A_{\text{НЦ}}(l) = 1 / \sqrt{1 + (l / 35)^2}.$$

Амплитудно-частотная функция блока ВФ равна произведению АЧФ фильтров. Ее максимум $1,0017254$ достигается при резонансной частоте $l_p = 8,8288 \approx 8,8$ Гц. Отсюда следует, что условие нормировки $A(l_p) = 1$ в [1] достигается только с точностью до двух знаков после запятой. Для уточнения в выражение для АЧФ добавим коэффициент нормировки $k_H = 1/1,0017254 = 0,99828$:

$$A_{\text{ВФ}}(l) = k_H A_{\text{ВК}}(l) A_{\text{ВЦ}}(l) A_{\text{НЦ}}(l). \quad (3)$$

Отсюда следует, что для выполнения нормировки в стандарте [1] коэффициент передачи k необходимо принять равным $1,74501$, а не $1,74802$.

В блоке квадратичного инерционного сглаживания (КИС) с постоянной времени $t_\zeta = 0,3$ с АЧФ периодического звена определяется формулой

$$A_a(l) = 1 / \sqrt{1 + (2pl t_\zeta)^2}. \quad (4)$$

Для идеализированных колебаний при заданной частоте w доза пропорциональна размаху колебаний dU_t :

$$P_{St} = dU_t / C(l), \quad (5)$$

³ Индекс «МЭК» добавлен, чтобы различать обозначения для частоты колебаний и такое же обозначение параметра в [1].

где $1/C(f)$ — коэффициент пропорциональности имеет размерность $(\%)^{-1}$.

Как показано в приложении, для гармонического сигнала доза определяется выражением

$$P_{St} = 4,03822 A_{ВФ}(f) \sqrt{1 + 0,8 A_a(2f)} dU_f. \quad (6)$$

Для периодических колебаний любой другой формы также имеется аналитическое решение, но оно очень громоздкое. Например, при использовании метода парциальных реакций [6] процесс на выходе ВФ представляется суммой 11 слагаемых, а после возведения его в квадрат число слагаемых увеличивается в 6 раз. Поэтому после определения реакции ВФ дозу целесообразно определять численным методом. Еще более громоздкие выражения получаются при использовании разложения в ряд Фурье исходного процесса колебаний. К тому же возникает проблема выбора числа учитываемых гармоник.

Условие эквивалентирования выполняется, если при любой частоте допустимые размахи колебаний dU_f и допустимая доза P_{St} связаны соотношением

$$d\hat{U}_f(f) = \hat{P}_{St} C(f). \quad (7)$$

В [1] допустимое значение дозы равно единице. В этом случае $d\hat{U}_f(f) = C(f)$. Из (6) следует, что для гармонических колебаний

$$d\hat{U}_f(f) = \frac{0,24763}{A_{ВФ}(f) \sqrt{1 + 0,8 A_a(2f)}}. \quad (8)$$

Результаты расчетов по этой формуле мало отличаются от данных табл. 1 из [1] — при частоте 8,8 Гц относительная погрешность равна $-2,04\%$, а наибольшая погрешность $-2,96\%$ достигается при частоте 3 Гц. Однако они соизмеримы с допустимой погрешностью измерения размахов, поэтому для исключения погрешностей значения размахов из табл. 1 необходимо заменить на точные значения. Аналогичная корректировка требуется и для табл. 2.

На рис. 2 представлены кривые размахов для гармонических (1) и прямоугольных (2) колебаний. Непозначенные на рисунке точки с координатами $(f, d\hat{U}_f)$ из табл. 1 и 2 стандарта [1] в соответствующем частотном диапазоне⁴ от 0,4 до 25 Гц практически располагаются на этих кривых, что свидетельствует о выполнении условия эквивалентирования.

Иначе обстоит дело с измерительными сигналами (символ «и»), характеристики которых пред-

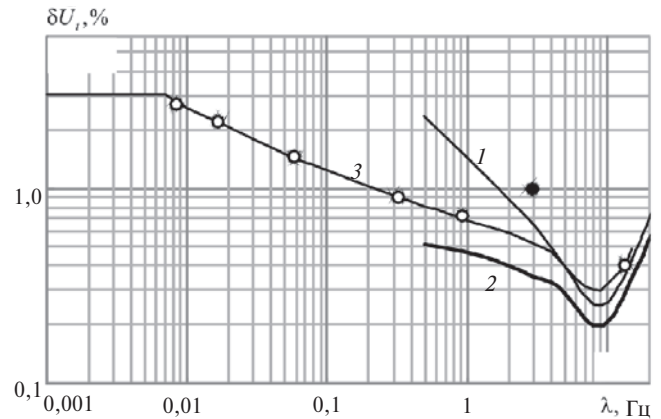


Рис. 2. Кривые размахов для гармонических колебаний: 1 — из [1] и в форме меандра; 2 — [1]; 3 — из публикации IEC 555-3, \circ — из табл. 5 [1]; \bullet — из п. 4.4 [1]

ставлены, например, в табл. 5 стандарта [1], а также на рис. 2. Они не располагаются на кривой 2, что свидетельствует о нарушении условия (7). В результате дозы $P_{Stи}$ будут значительно отличаться от \hat{P}_{St} . Например, в частотном диапазоне табл. 2 из [1] имеются две точки с частотами 110 и 1620 мин⁻¹ (0,917 и 13,5 Гц), а также с размахами $dU_{ги} = 0,725$ и $0,402\%$, в то время как по данным табл. 2 при этих частотах размахи должны быть равны 0,488 и 0,292%. Если фликер-модель реализована в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1 стандарта [1], то при испытаниях вместо требуемого значения $\hat{P}_{St} = 1$ будут получены $P_{Stи} = 0,725, 0,488 = 1,486$ и $0,402/0,292 = 1,377$. Относительные погрешности составят 48,6 и 37,7%.

Оказалось, что точки (\circ) располагаются на кривой 3 из публикации IEC 555-3 [8], которая практически совпадает с кривой 2 из стандарта [3]. Однако эта кривая относится к другой фликер-модели, в рамках которой условие $P_{Stи} = 1$ практически выполняется (рис. 6 в [8]), но $\hat{P}_{St} = 1$ — нет. Таким образом, если исходить из принятой в [1] фликер-модели, табл. 2 следует считать правильной, а табл. 5 — ошибочной.

В [1] есть и другое противоречие: предусматривается генератор гармонического сигнала для калибровки, который «должен обеспечивать работу прибора для всех пределов измерения» (п. 4.4). Однако его характеристики (2,94 Гц, 1%) дают точку (\bullet — рис. 2), которая располагается значительно выше кривой 1. В стандартах не указано, какое значение дозы должно быть получено при подаче калибровочного сигнала. На наш взгляд, и в этом случае доза должна быть равна единице. Для этого на частоте 2,94 Гц размах гармонического колебания следует принять равным 0,649, а не 1% — иначе погрешность калибровки составит 35,1%.

⁴ Кривые размахов из [1] в области низких частот не соответствуют экспериментальным данным. Для устранения этого недостатка требуется учитывать явление медленной адаптации зрения [7].

Нормирование погрешностей. В [1] нормируется абсолютная погрешность $\hat{E}_d = \pm 0,05$ измерения дозы. По отношению к допустимой дозе, равной единице, соответствующая относительная погрешность $\hat{e}_d = \pm 5\%$. В [3] нормируется такая же относительная погрешность измерения доз, но также и допустимая относительная погрешность $\hat{e}_p = \pm 8\%$ измерения размахов. Здесь имеются два несоответствия. Во-первых, для идеализированных сигналов доза пропорциональна размаху, а потому должно выполняться равенство $\hat{e}_p = \hat{e}_d$. Во-вторых, в [3], кроме единицы, указываются и другие значения доз: 0,74 и 1,38, по отношению к которым при одном значении абсолютной погрешности относительные погрешности $\hat{e}_d = \pm 6,76$ и $\pm 3,62\%$, а не $\pm 5\%$. Если же нормировать одно значение $\hat{e}_d = \pm 5\%$, то при дозах 0,74 и 1,38 разными будут абсолютные погрешности: $\pm 0,037$ и $\pm 0,069$.

Поскольку доза фликера является первичным показателем ЭМС по отношению к размахам, то следует нормировать \hat{E}_d или относительные погрешности \hat{e}_d для соответствующих допустимых доз. Для идеализированных измерительных сигналов можно использовать или \hat{e}_d , или \hat{e}_p . Для реальных же сигналов, а тем более для колебаний в действующих электрических сетях, пропорциональность между дозами и размахами нарушается, поэтому нормирование погрешностей измерения размахов нельзя считать корректным.

Установим связь между погрешностями определения размахов и действующих значений напряжения. Допустимые размахи идеализированных колебаний зависят от частоты, поэтому принятие одного значения абсолютной погрешности определения доз приводит к тому, что допустимая абсолютная погрешность вычисления размахов является функцией частоты:

$$\hat{E}_p(\omega) = \frac{\hat{e}_p}{100} d\hat{U}_t(\omega). \quad (9)$$

Размахи вычисляются по разности действующих значений напряжения, поэтому предельные абсолютные погрешности измерения U будут в 2 раза меньшими:

$$\hat{E}_U(\omega) = \frac{1}{2} \hat{E}_p(\omega). \quad (10)$$

При $U_H = 100\%$ требуемый класс точности измерителя действующих значений напряжения определяется допустимой относительной погрешностью

$$\hat{e}_U(\omega) = \frac{\hat{E}_U(\omega)}{U_H} 100 = \hat{E}_U(\omega) = 0,005 \hat{e}_p d\hat{U}_t(\omega) =$$

$$= 0,005 \hat{e}_d d\hat{U}_t(\omega), \quad (11)$$

где коэффициент 0,005 имеет размерность $(\%)^{-1}$.

При $\hat{e}_d = \text{const}$ погрешности пропорциональны размаху. Поэтому кривая 1 на рис. 3 синусоидальных колебаний располагается выше кривой 2 для меандра.

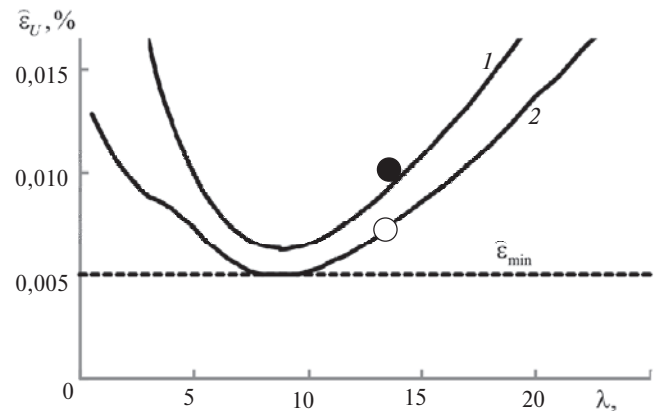


Рис. 3. Кривые допустимых погрешностей измерения действующих значений напряжения для гармонических (1) и прямоугольных (2) колебаний (при $\hat{e}_d = 5\%$)

Очевидно, что класс точности должен выбираться для наиболее тяжелого случая резонансного минимума кривой размахов: для меандра $d\hat{U}_{t \min} = 0,199\%$. Тогда

$$\hat{e}_{U \min} \gg 0,001 \hat{e}_p = 0,001 \hat{e}_d, \quad (12)$$

где коэффициент 0,001 размерности не имеет.

Условие (12) является очень жестким. Например, при $\hat{e}_d = 5\%$ допустимая погрешность измерения действующих значений не должна превышать 0,005%, а при допустимой дозе 0,74 — всего 0,0036%. Для сравнения отметим, что абсолютная погрешность измерения отклонений напряжения согласно [3] равна $\pm 0,5\%$, что по отношению к $U_H = 100\%$ дает относительную погрешность $\pm 0,5\%$, в 100 раз большую, чем $\pm 0,005\%$. Обеспечить столь малую погрешность при прямом способе измерения мгновенных или действующих значений напряжения очень сложно — требуется использовать компенсационный метод. Для смягчения требований представляется целесообразным допустимую погрешность измерения доз увеличить вдвое: 0,1 вместо 0,05 — по некоторой аналогии с требованием [3] к точности измерений коэффициента искажения синусоидальности напряжения. В этом случае $\hat{e}_{U \min} = 0,01\%$.

В пользу такого решения свидетельствует тот факт, что в стандарте [1] требования к точности неявно смягчены. Действительно, для испытатель-

ного сигнала норма $\hat{\epsilon}_d = 5\%$ относится к наименьшему размаху при частоте 13,5 Гц, а не к резонансной частоте 8,8 Гц. Если взять значение размаха 0,402% из табл. 5, то согласно (11) допустимая погрешность измерения действующих значений напряжения составит 0,01% (• на рис. 3), а не 0,005%. Если же данные табл. 5 привести в соответствие с табл. 2 (○ — рис. 3), то при размахе 0,292% на частоте 13,5 Гц $\hat{\epsilon}_U = 0,0073\%$, что также существенно превышает значение 0,005%.

Проверка функционирования. В цифровом фликерметре реакция ВФ, зрительное ощущение и доза рассчитываются, а измеряются только мгновенные или действующие значения напряжения. В связи с этим целесообразно разделить проверку точности расчетов и проверку точности измерения.

При заданном графике колебаний напряжения погрешность расчета доз может быть пренебрежимо малой. Это обусловлено тем, что метод парциальных реакций является аналитически точным. Пакет MathCAD также обеспечивает высокую точность. Для определенности предельную абсолютную погрешность вычисления доз примем равной $\pm 0,004$, которая на порядок меньше 0,05.

Принципиально важно, что при такой проверке имитируются сигналы на выходе взвешивающих фильтров, а не на входе фликерметра, что позволяет избежать погрешностей низкочастотной модуляции. В качестве испытательных сигналов естественно выбрать идеализированные гармонические колебания, так как для них имеется точное решение (6). При этом имитируется сигнал

$$U_K(t) = \frac{1}{2} d\hat{U}_t(\omega) \sin \omega t. \quad (13)$$

Длительность имитации требует регламентации. Поскольку испытательный сигнал является периодическим, то дозу достаточно определять не на интервалах 10 мин, а за время цикла T_1 , но в стационарном состоянии. Оно наступает после окончания переходного процесса с момента включения фликерметра $t=0$. Так как тренд является неизменным, то определяющей является наибольшая из длительностей переходного процесса во взвешивающих фильтрах или блоке квадратичного инерционного сглаживания. Первая из них равна 1 с, а вторая — 1,4 с, которую и следует учитывать при испытаниях. В этом случае ордината переходной функции инерционного звена не превышает 1% единицы.

Таким образом, в процессе имитации процесса (13) необходимо регистрировать $1,41 + 1$ циклов t_1 с округлением до ближайшего большего целого числа, а расчет доз выполнять по последнему циклу. Если же частота не превышает $1/1,4 = 0,714$ Гц, то достаточно записывать два цикла по t_1 .

В [1] не указывается, каким образом имитировать входной испытательный сигнал $u(t)$. Проблема заключается в том, что прямоугольные и гармонические процессы $U(t)$ воспроизвести точно невозможно. Практически приемлемые результаты можно получить лишь при частоте колебаний, намного меньшей несущей частоты 50 Гц, т.е. при $1 \ll 50$ Гц. При этом условии для получения гармонического колебания на вход модели подается сигнал [9]:

$$u(t) \approx \sqrt{2} U_H \sin \omega_f t (1 + m \sin \omega t) = \\ = \sqrt{2} U_H \hat{\epsilon} \sin \omega_f t + \frac{m}{2} \cos(\omega_f - \omega)t - \frac{m}{2} \cos(\omega_f + \omega)t \quad (14)$$

где $m = dU_t / 200$ — коэффициент модуляции.

Наличие аналитического выражения (14) делает целесообразным использование гармонических испытательных сигналов, а не прямоугольных, как это принято в [1]. При этом достигается унификация с калибровочным сигналом. Поскольку в цифровых фликерметрах параметры блоков воспроизводятся точно, то обеспечение точности измерений доз в диапазоне до 5 Гц обеспечивает требуемую точность и при больших частотах. Длительность имитации должна составлять целое число $N_1 = 1,4T_1 + 1$ циклов по T_1 .

В качестве экспертной оценки рекомендуются следующие характеристики $1, d\hat{U}_t$ испытательного сигнала и требуемое число N_1 циклов T_1 :

$1, \text{ Гц}$	$d\hat{U}_t, \%$	N_1	T_1
0,5	2,346	2	20
1,0	1,392	2	1
5,0	0,388	8	0,2

Для того чтобы низкочастотная модуляция практически не влияла на точность измерения доз, частотный диапазон ограничивается частотой 5 Гц резонансного минимума. В этом случае во всем диапазоне допустимую абсолютную погрешность расчета доз можно принять равной 0,05, как в [1].

Следует отметить, что условие (12) дает наименьший предел погрешности, а фактическая погрешность будет меньше. Однако, если это условие выполняется, то от проверки точности измерения можно отказаться.

Приложение. Значение дозы гармонического сигнала не зависит от фазы, поэтому достаточно рассчитать амплитуды процессов. На входе ВФ амплитуда сигнала $B_U = dU_t / 2$, а на выходе $B_V = B_U A_{ВФ}(1)$. Квадрат реакции ВФ имеет постоянную составляющую $B_c = B_V^2 / 2$ и гармоническую составляющую с такой же амплитудой. Поэтому на выходе блока КИС кроме постоянной составляющей B_c будет гармоническая составляющая с ам-

плитудой $B_a = B_c A_a(1)$. Как следует из табл. 4 стандартов [1, 2], для получения ординат P мгновенного фликера (в отн. ед.) необходимо ввести коэффициент $k_Y^2 = 256(\%)^{-2}$.

Вероятностное распределение процесса $P(t)$ подчиняется закону арксинуса, для которого интегральные вероятности в % определяются по формуле

$$E(P) = \frac{100}{\rho} \arccos \frac{P - B_c}{B_a}. \quad (\text{П-1})$$

Обратная функция

$$P(E) = B_c + B_a \cos(\rho E / 100) = \\ = B_c [1 + A_a(21) \cos(\rho E / 100)]. \quad (\text{П-2})$$

Для значений вероятности 0,1; 0,7; 1; 1,5; 2,2; 3; 4; 6; 8; 10; 13; 17; 30 и 50 % по формуле (П-2) находятся соответствующие уровни фликера: $P_{0,1}$ без осреднения и средние значения $P_{1s} = (P_{0,7} + P_1 + P_{1,5}) / 3$; $P_{3s} = (P_{2,2} + P_3 + P_4) / 3$; $P_{10s} = (P_6 + P_8 + P_{10}) + P_{13} + P_{17} / 5$; $P_{50s} = (P_{30} + P_{50} + P_{80}) / 3$, которые выражаются через средние значения (индекс s) косинусов. Например, при определении P_{1s}

$$\cos_{1s}(\rho E / 100) = \frac{1}{3} [\cos(\rho 0,007) + \cos(\rho 0,01) + \\ + \cos(\rho 0,015)] = 0,99939.$$

Для краткости обозначения уровней и косинусов введем индекс i . Это позволяет записать формулу для доз фликера в компактном виде:

$$P_{St} = \sqrt{\dot{a}} a_i P_i, \quad (\text{П-3})$$

где $a_1 = 0,0314$; $a_2 = 0,9525$; $a_3 = 0,0657$; $a_4 = 0,28$; $a_5 = 0,08$.

С учетом (П-2)

$$P_{St} = \frac{k_Y}{2\sqrt{2}} A_{ВФ}(1) dU \sqrt{\dot{a}} a_i + A_a(21) \dot{a} a_i \cos_i(\rho E / 100).$$

Подставив значения a_i , найдем, что первая сумма равна 0,5096, а вторая 0,407146. Вынося первую сумму за знак корня, после вычисления коэффициентов получим формулу (6).

Выводы. 1. Для устранения неопределенности в построении графика колебаний напряжения необходимо осуществлять непрерывное, а не дискретное среднеквадратичное осреднение входного напряжения на интервале 0,01 с.

2. В выражении для передаточной функции (п. 4.7 в [1, 2]) коэффициент передачи следует принять равным 1,74501, а данные табл. 1 и 2 – по аналитически точным выражениям.

3. Кривые допустимых размахов колебаний, испытательные и калибровочные сигналы должны давать одно и то же допустимое значение дозы фликера, что требует корректировки числовых характеристик в табл. 5 и п. 4.4 стандартов [1, 2].

4. Нормировать следует абсолютную погрешность измерения доз, а соответствующие ей требования к точности измерения размахов можно уста-

навливать только для периодических колебаний определенной формы и частоты.

5. Оценку функционирования фликерметра целесообразно выполнять в виде двух проверок: точности расчета доз – путем подачи на вход блока взвешивающих фильтров гармонических колебаний (13) с абсолютной погрешностью $\pm 0,004$, а также точности измерения – подачей на вход фликерметра сигнала (14) с приведенными ранее числовыми характеристиками. При измерении действующих значений напряжения с относительной погрешностью не более 0,005% проверку точности измерения можно исключить.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ИЕС 61000-4-15. Electromagnetic compatibility. Part 4. Section 15: Flickermeter. – Functional and design specification, 1997.
2. ГОСТ Р 51317.4.15–99 (МЭК 61000-4-15–97). Совместимость технических средств электромагнитная. Фликерметр. Технические требования и методы испытаний. – М.: Госстандарт.
3. ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. с 01.01.1999.
4. Дмитриева Е.Н., Топчий В.А. Совершенствование цифровой фликермодели для оценки колебаний напряжения. – Электричество, 2010, № 7.
5. Гутников В.И. Фильтрация измерительных сигналов. – Л.: Энергоатомиздат, 1990.
6. Куренный Э.Г., Люты А.П., Черникова Л.В. Метод парциальных реакций для анализа процессов на выходе линейных фильтров в моделях электромагнитной совместимости. – Электричество, 2006, № 10.
7. Куренный Э.Г., Дмитриева Е.Н., Куренный Д., Цыганкова Н.В. Совершенствование модели фликера. – Электричество, 2003, № 2.
8. Mirra C., Sani G. Il fenomeno del flicker. Analisi delle sue caratteristiche. Tecniche di misura e metodi di limitazione. – L'Electrotecnica, 1987.
9. Cai R., Cobben J.F.G., Myrzik J.M.A., et al. Flicker responses of different lamp types. – IET Generation, Transmission and Distribution, 2009, vol. 3.

[28.06.12]

Авторы: Дмитриева Елена Николаевна в 1968 г. окончила электромеханический факультет Донецкого политехнического института. В 1976 г. защитила кандидатскую диссертацию «Вопросы теории и методы расчета пиков, выбросов и колебаний негауссовых процессов в сетях электроснабжения промышленных предприятий» в Новочеркасском политехническом институте (НПИ). Профессор кафедры электрических систем Донецкого национального технического университета (ДонНТУ).

Куренный Эдуард Григорьевич в 1961 г. окончил электромеханический факультет НПИ. В 1974 г. защитил докторскую диссертацию «Основы общей теории вероятностных процессов в заводских электрических сетях» в НПИ. Профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий и городов ДонНТУ.

Топчий Владимир Александрович в 2006 г. окончил электротехнический факультет ДонНТУ. Инженер 2-й категории оперативно-диспетчерской службы ООО «Сервис-Инвест».