

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НОРМИРОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДОПУСТИМЫХ РАЗМАХОВ КОЛЕБАНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ ОТ ЧАСТОТЫ

Куренный Э.Г., Цыганкова Н.В.

Донецкий национальный технический университет
led@dgту.donetsk.ua

It is showed shortages of existing norms of the swing and frequencies of the voltage fluctuations. Normalization with take into account the doze of flicker is taken as the basis. It is devised the exact analytical method of estimation curves of swings. It is offered to add the library of curves of swings to the existing standards.

Постановка задачи. В [1,2] наряду с универсальным показателем допустимости колебаний напряжения – дозой фликера (кратко: доза), нормирующая зависимости размахов колебаний от частоты, которые будем называть кривыми размахов. В [1] приведены кривые размахов только для колебаний в форме меандра, а в [2] – еще и для гармонических колебаний. Для колебаний другой формы в [1] рекомендуется приближенный метод приведения этих колебаний к форме меандра, но только в диапазоне малых частот колебаний. Аналогичный подход принят и в [3].

Недостатком норм [1] является несоответствие между кривыми размахов и дозой. В результате одни и те же колебания напряжения оцениваются по-разному, хотя очевидно, что оценки должны быть тождественными.

Для совершенствования нормирования необходимо разработать точные методы оценивания допустимости периодических колебаний разной формы. Частично эта задача рассмотрена в [4] для гармонических и прямоугольных колебаний. Здесь исследуются колебания другой формы, определяются коэффициенты эквивалентирования кривых размахов и даются рекомендации по уточнению и совершенствованию [1].

Термины и обозначения. В [5] колебания определяются как серия единичных изменений напряжения во времени. Это определение приспособлено под приближенные методы расчета из [1], где под единичным изменением понимается размах колебаний. Условность такого определения очевидна: негативное воздействие колебаний определяется всем процессом $U(t)$ изменения напряжения, а не размахами.

Представляется целесообразным определить колебания напряжения как быстроизменяющуюся составляющую $\Delta U(t)$ напряжения, которая выделяется входным блоком фликерметра. Согласно [2] эта составляющая получается вычитанием из $U(t)$ одномоментного тренда напряжения. Поэтому термин «быстроизменяющийся» относится не к скорости изменения процесса, а к частоте изменений. Следует отметить, что в [3] тренд выделяется схемой с постоянной времени, равной одной минуте, в то время как в [1] – путем осреднения на одномоментном интервале, что в среднем эквивалентно постоянной времени 20 с. Это несоответствие должно быть устранено путем принятия в [1] нормы из [2].

В проектировании напряжение источника питания считается неизменным, поэтому под колебаниями следует понимать процесс изменения потерь напряжения в точке общего присоединения источника колебаний и другой нагрузки за вычетом среднего значения этого процесса. Поскольку добавление постоянной величины не изменяет величину дозы, то в расчетах среднее значение можно не вычитать.

В [1,2] обозначения размахов и доз снабжены индексом t . Для рассматриваемых здесь периодических колебаний эти показатели в принужденном режиме не зависят от времени, поэтому индекс можно опустить. По этой же причине кратковременная и длительная дозы совпадают. Поскольку в [1] принята фликер-модель из [2], для длительной дозы примем обозначение P_t вместо P_L из [1].

Как и в [2-4,6] под частотой λ в Гц будем понимать частоту непрерывного спектра случайных колебаний или количество периодов в единицу времени – для периодических колебаний простой формы (с двумя размахами за время цикла $t_{ци}$). В [1] используется понятие частоты F в c^{-1} (или $мин^{-1}$) единичных изменений в единицу времени. Для периодических колебаний простой формы между этими понятиями имеется очевидная связь: $\lambda = F/2$ (или $F/120$). Для колебаний другой формы понятие F лишено смысла.

Следует отметить, что в [1] соседние изменения напряжения, разделенные интервалом менее 0,03 с, рекомендуется рассматривать как одно изменение. На наш взгляд, эту рекомендацию нельзя применить к смежным изменениям разного знака, так как при частотах колебаний $1/(2 \cdot 0,03) = 16,7$ Гц и более частота изменений необоснованно уменьшается вдвое. Использование же кривых размахов для колебаний разной формы исключает необходимость разграничения длительностей между изменениями напряжениями.

В стандартах обозначения показателя качества напряжения и его допустимого значения не различаются. Допустимые значения будем заключать в квадратные скобки: например, δU – размах колебаний, а $[\delta U]$ – норма этого показателя. Согласно [1] норма $[P_t] = 1$ для нормальных условий работы и 0,74 – для работ, требующих значительного зрительного напряжения. Для краткости найдем кривые размахов для нормальных условий. Переход к кривым размахам $[\delta U](\lambda)$ при допустимой дозе 0,74 осуществляется умножением ординат на коэффициент 0,74.

Путь решения. Доза оценивает допустимость колебаний напряжения любой формы. В частных случаях периодических колебаний простой формы доза может быть выражена через размахи и частоты колебаний, в связи с чем использование кривых колебаний здесь вполне допустимо – как одной из форм представления дозы фликера. Очевидно, что любая ордината $[\delta U]$ кривой размахов должна давать одно и то же допустимое значение дозы. Поэтому для получения кривой колебаний необходимо на вход фликер-модели при разных частотах подавать периодические колебания и подбирать размахи с таким расчетом, чтобы на входе модели было допустимое значение дозы. Для этой цели удобно размах колебаний принять равным 1%, рассчитать дозы $P_{11}(\lambda)$ при разных частотах и по ним определить допустимые размахи

$$[\delta U](\lambda) = [P_f] / P_{11}(\lambda) = 1 / P_{11}(\lambda), \quad (1)$$

которые выражаются в процентах от номинального напряжения U_n .

Фликер-модели могут быть разными, но все они состоят из линейного взвешивающего фильтра (ВФ), блока квадратичного инерционного сглаживания и блока статистической обработки. Далее рассматривается фликер-модель¹ из [2], которая принята и в [1]. Математическое описание модели приведено в [4], где модель представлена в виде 11 параллельно включенных инерционных звеньев первого порядка.

Определение парциальной реакции $y(t)$ инерционного звена на колебания напряжения любой формы не встречает затруднений. Реакция $Y(t)$ ВФ равна сумме парциальных реакций. Для того, чтобы выразить ее в относительных единицах (о.е.), а не в процентах, вводится масштабный коэффициент² $k_\gamma = 16(\%)^{-1}$.

Зрительное ощущение $S(t)$ получается путем квадратичного инерционного сглаживания реакции с постоянной времени 0,3 с: реакция возводится в квадрат, а затем по аналогичным (2)–(6) формулам находится процесс $S(t)$. Это позволяет получить функцию кумулятивных вероятностей E_k для разных уровней P зрительного ощущения. В силу периодичности процессов, в принужденном режиме эта функция строится за один цикл, длительность которого принимается за 100%. Доза вычисляется по формулам, приведенным в [1,2,4].

Полученное решение является аналитическим, поэтому методическая погрешность отсутствует.

Парциальные реакции. Найдем реакцию инерционного звена, имеющего коэффициент передачи a и постоянную времени J . В общем случае график колебаний может иметь N участков с изменениями напряжения разного вида. Каждый r -ый участок характеризуется длительностью t_r и функцией $\Delta U_r(t)$, в которой время отсчитывается от начала участка.

Реакция звена при $\gamma = 1/J$ описывается известным выражением

$$y_r(t) = e^{-\gamma t} \left[\alpha \gamma \int_0^t e^{-\gamma t} \Delta U_r(t) dt + y_{rn} \right] \text{ при } 0 \leq t \leq t_r, \quad (2)$$

в которое входит неизвестная пока начальная ордината y_{rn} .

Обозначив

$$b_r = e^{-\gamma t_r}, \quad c_r = \alpha \gamma \int_0^{t_r} e^{-\gamma t} \Delta U_r(t) dt \quad (3)$$

и подставив в (2) длительность участка, получим конечную ординату

$$y_{rk} = b_r (c_r + y_{rn}). \quad (4)$$

Количество выражений вида (4) равно количеству участков, а количество неизвестных начальных и конечных ординат – вдвое больше. Доопределим систему уравнений, исходя из того, что конечная ордината на предыдущем участке равна начальной на следующем участке, а в принужденном режиме начальная ордината первого участка равна конечной ординате последнего участка:

$$y_{rk} = y_{r+1,n}, \quad y_{Nk} = y_{1n}. \quad (5)$$

¹ Для получения достоверных оценок ЭМС в области частот менее 2 Гц фликер-модель из [2] должна быть дополнена блоком, моделирующим медленную адаптацию зрения [4,6]

² В [2] коэффициент пересчета не учтен, что приводит к занижению дозы в 16 раз.

Решение системы алгебраических уравнений (3) и (4) не встречает трудностей. Кривые размахов целесообразно использовать при количестве участков не больше трех. Найдем соответствующее решение, введя индексы в обозначениях: п – для первого, в – для второго и т – для третьего участков. Например:

$$b_p = e^{-\gamma t_p}, \quad b_v = e^{-\gamma t_v}, \quad b_t = e^{-\gamma t_t}, \quad b_{\text{ц}} = b_p b_v b_t e^{-\gamma t_{\text{ц}}}.$$

После определения c_p , c_v и c_t согласно (4) и (5) получим систему уравнений:

$$y_{\text{пк}} = b_p(c_p + y_{\text{пн}}), \quad y_{\text{вк}} = b_v(c_v + y_{\text{вн}}), \quad y_{\text{тк}} = b_t(c_t + y_{\text{тн}}),$$

$$y_{\text{пк}} = y_{\text{вн}}, \quad y_{\text{вк}} = y_{\text{тн}}, \quad y_{\text{тк}} = y_{\text{пн}}.$$

Подставив три последних уравнения в три первых, получим, систему трех уравнений с тремя неизвестными начальными ординатами. Решение этой системы дает:

$$y_{\text{пн}} = \frac{c_t + b_v(c_v + b_p c_p)}{1 - b_{\text{ц}}} b_t,$$

$$y_{\text{вн}} = \frac{c_p + b_t(c_t + b_v c_v)}{1 - b_{\text{ц}}} b_p,$$

$$y_{\text{тн}} = \frac{c_v + b_p(c_p + b_t c_t)}{1 - b_{\text{ц}}} b_v.$$

(6)

Подстановка (6) в (2) при $r = п, в и т$ полностью определяет парциальную реакцию звена. Аналогичным образом для случая колебаний с двумя участками за цикл найдем

$$y_{\text{пн}} = \frac{c_v + b_p c_p}{1 - b_{\text{ц}}} b_v, \quad y_{\text{вн}} = \frac{c_p + b_v c_v}{1 - b_{\text{ц}}} b_p.$$

(7)

Таким образом, для колебаний разной формы решение сводится к определению постоянных (3).

Пример. Найдем кривые размахов для периодических колебаний пилообразной спадающей формы. Без вычитания среднего значения потери напряжения по участкам определяются выражениями:

$$\Delta U_{\text{п}}(t) = \delta U(1 - t/t_{\text{ц}}) \quad \text{при } 0 \leq t \leq t_{\text{п}},$$

$$\Delta U_{\text{в}}(t) = 0 \quad \text{при } 0 \leq t \leq t_{\text{в}}.$$

Подстановка этих выражений в (2) дает:

$$y_{\text{п}}(t) = \delta U \frac{a}{\gamma t_{\text{п}}} \left[(1 + \gamma t_{\text{п}})(1 - b^{-\gamma t}) - \gamma t \right] + y_{\text{пн}} \quad \text{при } 0 \leq t \leq t_{\text{п}},$$

$$y_{\text{в}}(t) = y_{\text{вн}} e^{-\gamma t} \quad \text{при } 0 \leq t \leq t_{\text{в}}.$$

(8)

Согласно (3) и (8)

$$c_p = \delta U \frac{a}{\gamma t_{\text{п}}} (b_p + \gamma t_{\text{п}} - 1), \quad c_v = 0.$$

Из (7) найдем

$$y_{\text{пн}} = \frac{b_{\text{ц}} c_p}{1 - b_p}, \quad y_{\text{вн}} = \frac{b_p c_p}{1 - b_p}.$$

(9)

Подстановка (9) в (8) дает выражения для парциальной реакции по участкам. Расчеты для 11 пар значений a и γ позволяют найти парциальные реакции для всех звеньев, суммированием которых получаем реакцию ВФ. На рис.1,а показан график реакции $Y_1(t)$ при размахе 1% для колебаний частотой 10 Гц и $t_n = t_b = 0,05$ с. По этому графику была получена функция кумулятивной вероятности (рис.1,б) и рассчитана доза $P_{11} = 3,979$. Согласно (1) допустимое значение размаха составляет 0,2513%.

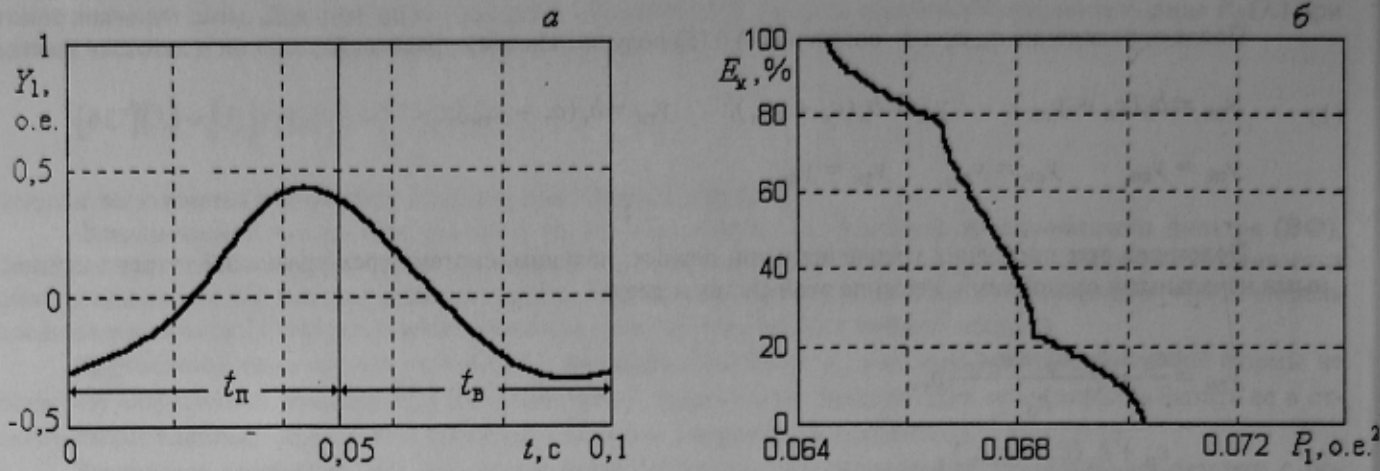


Рисунок 1

Выполненные расчеты для других частот и относительных значений $k_n = t_n/t_c$ длительностей первого участка дают кривые размахов 1-3, представленные на рис.2. Для сравнения здесь же показаны кривые размахов из [2]: 4 – для гармонических, 5 – для прямоугольных колебаний с $k_n = 0,5$ и 6 – прямоугольных с $k_n = 0,1$ или 0,9.

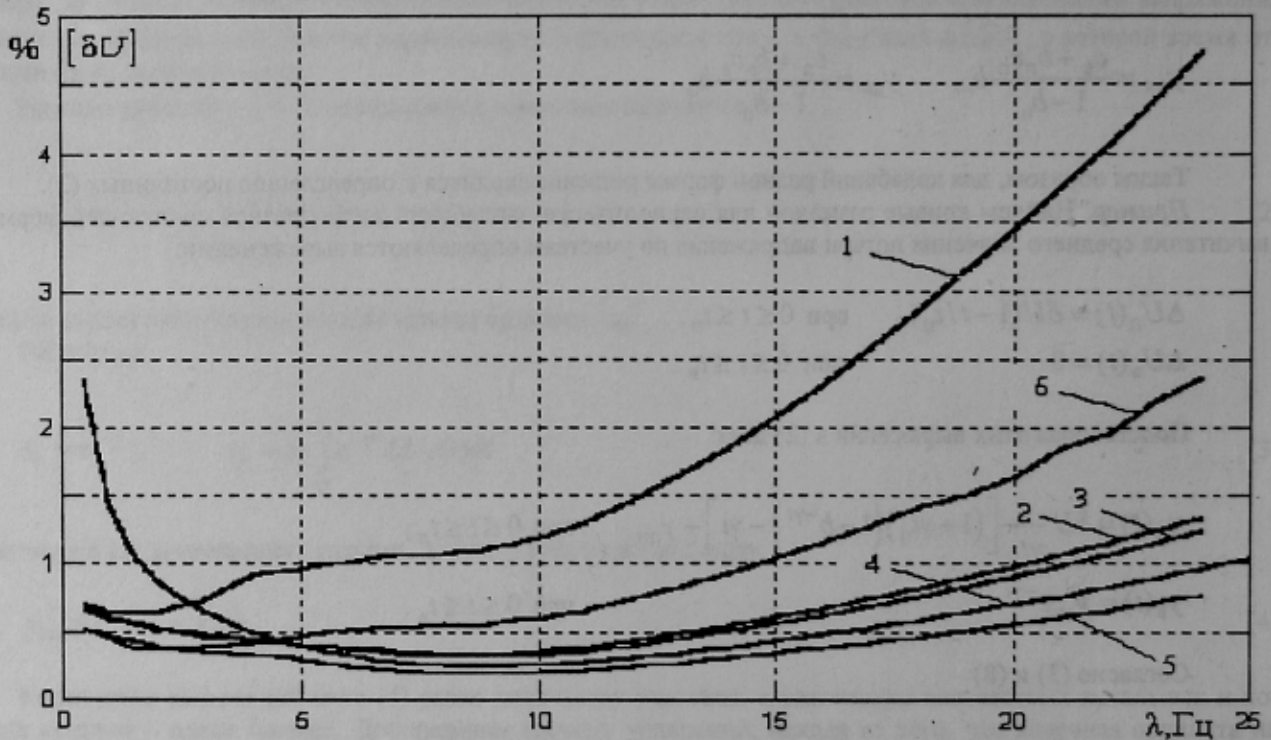


Рисунок 2

Кривые 1-3 в области частот менее 9 Гц практически не отличаются друг от друга. Это объясняется тем, что при малых частотах длительности первых участков велики, поэтому уменьшение потерь напряжения происходит медленно, а следовательно, влияние этих участков не существенно. Воздействие же колебаний определяется, в основном, вертикальным скачком величиной δU . При больших частотах скачок в начале цикла также вносит небольшой вклад в дозу, поэтому расхождения между кривыми относительно невелики, но они все же есть. В самом деле, чем меньше k_n , тем быстрее происходит спадание на первом участке и тем больше вклад в дозу. В результате кривая 1 проходит ниже кривой 2, которая, в свою очередь, располагается ниже кривой 3.

Следует отметить, что по указанной причине кривые размахов колебаний для колебаний пилообразной формы с возрастающим первым участком мало отличаются от кривых 1-3.

Сопоставим кривые 2 и 4. Синусоидальные колебания можно условно считать состоящими из двух участков с положительными и отрицательными полуволнами синусоиды. На каждом из этих участков нет скачка величиной δU , а потому влияние первого участка синусоиды меньше, чем у пилообразных колебаний. Однако на втором участке синусоида по-прежнему вызывает фликер, а поэтому суммарное воздействие при больших частотах у синусоиды выше. При малых же частотах скорость изменения полуволн синусоиды на обоих участках мала, поэтому даже совместное их воздействие оказывается меньше, чем у пилообразных колебаний. Как следует из рис.2, граничная частота составляет 4,8 Гц: при меньших (больших) частотах кривая 4 проходит выше (ниже) кривой 2.

Более сложной оказывается причина различий между пилообразными и прямоугольными колебаниями. Здесь можно выделить два диапазона значений k_n : когда кривые размахов не пересекаются или пересекаются. Представителем первого диапазона является кривая 2, которая при любых частотах располагается ниже кривой 5. Это объясняется тем, что прямоугольные колебания имеют два вертикальных скачка величиной δU , а пилообразные – только один. Напротив, кривые 1 и 6, а также 3 и 6 пересекаются примерно при той же частоте 4,8 Гц, что и кривые 2 и 4. Это можно объяснить только тем, что при больших частотах и больших или малых k_n длительность участка между скачками прямоугольных колебаний настолько мала, что реакция ВФ на положительный скачок существенно компенсируется реакцией на отрицательный скачок (рис.3,б в [4]).

Аналогичным образом были получены кривые размахов для следующих колебаний: прямоугольных с любыми k_n , а не только $k_n = 0,5$, как в [1,2]; пилообразных со спадающими и возрастающими участками; в виде равнобедренного треугольника и паузы: при $k_n = 1$ колебания превращаются в треугольные; в виде полуволны синусоиды и паузы; в виде цикла косинусоиды и паузы: при $k_n = 1$ колебания становятся гармоническими; в виде параболы и паузы.

Для периодических колебаний более сложной формы с большим количеством участков составлена компьютерная программа, использующая точное аналитическое решение.

Выводы. 1. Оценивание допустимых периодических колебаний напряжения простой формы можно производить по кривым размахов колебаний, рассчитанных по допустимой дозе фликера. Стандарты [1,2] необходимо дополнить библиотекой кривых размахов для колебаний разной формы.

2. Допустимость периодических колебаний сложной формы целесообразно оценивать по дозе фликера, используя аналитически точный метод расчета. Приближенные методы расчета из стандарта [1] следует исключить.

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. Mirra C., Sani G. Il fenomeno del flicker. Analisi delle sue caratteristiche. Tecniche di misura e metodi di limitazione. – L'Elettrotecnica. – 1987.
4. Цыганкова Н.В. Оценка допустимых колебаний напряжения по размахам и частотам. "Технічна електродинаміка", частина 3. – Киев – 2002. – с.17 – 22.
5. ГОСТ 23875-79. Качество электрической энергии. Термины и определения. – Введ. с 01.01.1981.
6. Шидловский А.К., Куренный Э.Г. Введение в статистическую динамику систем электроснабжения. – Киев: Наукова думка, 1984.