

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В НЕЧЕТКОЙ ФОРМЕ

Кузнецов В. Г.<sup>1</sup>, Тугай Ю. И.<sup>1</sup>, Тимчук С. А.<sup>2</sup>, Черемисин Н. М.<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт электродинамики НАН Украины (Киев),<sup>2</sup>Харковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко

Предложена методика представления норм и показателей качества электроэнергии в виде треугольных нечетких чисел и интервалов. Предложен подход к нечеткой оценке качества электроэнергии и формирования обобщенного показателя качества электроэнергии в нечеткой форме.

**Постановка проблемы.** Понятие "качественная электроэнергия" по сути несет лингвистическую неопределенность. Корректному раскрытию данного вида неопределенности в настоящее время уделяется недостаточно внимания, что влечет за собой появление упрощенных методик оценки качества электроэнергии.

**Анализ последних исследований.** Для раскрытия данной неопределенности в [1] установлены два вида норм КЭ: нормально допустимые и предельно допустимые. Введенные нормы КЭ раскрывают неопределенность самого понятия путем определения на числовой оси множества значений ПКЭ, которые соответствуют понятию "качественная электроэнергия". Данный способ раскрытия неопределенности характерен для детерминированного подхода. В результате его применения с одной стороны задача оценки качества электроэнергии упрощается до бинарного логического вывода, с другой стороны усложняются условия определения и оценки ПКЭ, а упрощения, связанные с детерминизацией, порождают проблемы погрешностей, точности, адекватности.

Кроме того, качество электроэнергии не является постоянным во времени поскольку напрямую зависит от изменяющейся загрузки. Это изменение содержит неопределенность, близкую к случайности. В [1] этот вид неопределенности разрешается вводом периода измерения параметров электроэнергии, равного 24 ч, а для некоторых ПКЭ и более. Данный способ детерминизации предполагает, что за установленный срок интеграл вероятности случайных параметров сети будет близок к 1 и на основе статистического анализа можно определить математическое ожидание указанных параметров и использовать их для определения ПКЭ в детерминированной форме.

При таком подходе можно сделать вывод о соответствии ПКЭ установленным нормам или не соответствии, но не представляется возможным определить, в какой степени полученные ПКЭ соответствуют указанным нормам. Это существенно снижает информативность оценки качества электроэнергии, не позволяет в полной мере отследить динамику изменения ПКЭ и предупредить их дальнейшее ухудшение.

Указанных недостатков можно избежать, применив нечеткий подход при оценке ПКЭ [2]. Поскольку нечеткий подход является более общим по сравнению с детерминированным, он позволит не только не нарушить требования ГОСТ 13109-97, но и использовать их.

**Цель статьи.** Разработка методики оценки каче-

ства электроэнергии в нечеткой форме.

**Основные материалы исследования.** Нормы КЭ с учетом [1] могут быть представлены в нечеткой форме следующим образом.

С точки зрения теории нечетких множеств норма показателя установившегося отклонения напряжения может быть представлена нечетким интервалом с функцией принадлежности

$$\mu_{\delta U_{y-n}} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{U - 0,9U_n}{0,05U_n}, \frac{1,1U_n - U}{0,05U_n} \right\} \right\}. \quad (1)$$

Предельно допустимые значения размаха изменения напряжения  $\delta U_{t-n}$  в точках общего присоединения к электрическим сетям определяются по графику [1 рис.1 п. 5.3.1]. Это не удобно для автоматизации расчетов. Рационально данный график представить в виде таблицы или в виде регрессионной зависимости (для кривой 1 [1])

$$\delta U_m = \exp(-0,3056Ln(F_{\delta U_t}) + 1,35198),$$

где  $F_{\delta U_t}$  - частота повторений изменения напряжения. Среднеквадратичное отклонение данной зависимости составляет 0,367199415, соответственно, все отклонения от регрессионной зависимости укладываются в интервал  $\pm 1,101598246$ . Данный интервал можно принять в качестве интервала нечеткости поскольку в нормативном документе не указаны нормально допустимые значения. То есть

$$\mu_{\delta U_{t-n}} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{\delta U_m - \delta U_t}{1,10159824} \right\} \right\}. \quad (2)$$

Предельно допустимое значение для кратковременной дозы фликера  $P_{St}$  при колебаниях напряжения с формой, отличающейся от меандра, равно 1,38, а для длительной дозы фликера  $P_{Lt}$  при тех же колебаниях напряжения равно 1,0 [1].

$$\mu_{P_{St-n}} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{1,38 - P_{St}}{1,38} \right\} \right\}, \quad (3)$$

$$\mu_{P_{Lt-n}} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{1,0 - P_{Lt}}{1,0} \right\} \right\}.$$

Предельно допустимое значение для кратковременной дозы фликера  $P_{St}$  в точках общего присоединения потребителей электрической энергии, располагающих лампами накаливания в помещениях, где требуется значительное зрительное напряжение, при колебаниях напряжения с формой, отличающейся от меандра, равно 1,0, а для длительной дозы фликера  $P_{Lt}$  в этих же точках равно 0,74 [1].

$$\mu_{P_{St-n}} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{1,0 - P_{St}}{1,0} \right\} \right\},$$

$$\mu_{P_{Lt-n}} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{0,74 - P_{Lt}}{0,74} \right\} \right\}. \quad (4)$$

Несинусоидальность напряжения характеризуется следующими показателями:

- коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения

$$\mu_{K_{U-n}} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{K_{Un} - K_U}{K_{Un} - K_{U\partial}} \right\} \right\}, \quad (5)$$

где значения  $K_{Un}$ ,  $K_{U\partial}$  – предельно допустимые и допустимые значения коэффициента искажения синусоидальности, зависят от номинального напряжения и приведены в [1 табл. 1];

- коэффициентом  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения, выражение для расчета функции принадлежности которого аналогично (5), а значения  $K_{U\partial}$  – приведены в [1 табл. 2], а  $K_{Un} = 1,5 K_{U\partial}$ .

Несимметрия напряжений характеризуется следующими показателями:

- коэффициентом несимметрии напряжений по обратной последовательности;

- коэффициентом несимметрии напряжений по нулевой последовательности.

$$\mu_{K_{2U-n}} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{4 - K_{2U}}{2} \right\} \right\},$$

$$\mu_{K_{0U-n}} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{4 - K_{0U}}{2} \right\} \right\}. \quad (6)$$

Отклонение частоты напряжения переменного тока в электрических сетях характеризуется показателем отклонения частоты, для которого установлены следующие нормы:

- нормально допустимое и предельно допустимое значения отклонения частоты равны  $\pm 0,2$  и  $\pm 0,4$  Гц соответственно [1].

$$\mu_{\Delta f_n} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{\Delta f - 0,2}{0,2}, \frac{0,4 - \Delta f}{0,2} \right\} \right\}. \quad (7)$$

Провал напряжения характеризуется показателем длительности провала напряжения, для которого установлена следующая норма:

- предельно допустимое значение длительности провала напряжения в электрических сетях напряжением до 20 кВ включительно равно 30 с [1]. Длительность автоматически устраняемого провала напряжения в любой точке присоединения к электрическим сетям определяется выдержками времени релейной защиты и автоматики ( $\Delta t_{na}$ ).

$$\mu_{\Delta t_{na-n}} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{30 - \Delta t_{na}}{30 - \Delta t_{na}} \right\} \right\}, \quad (8)$$

Статистические данные, характеризующие провалы напряжения в электрических сетях России напряжением 6—10 кВ и аналогичные данные по электрическим сетям стран Европейского Союза, приведены в [1 прил. Г].

Импульс напряжения характеризуется показателем импульсного напряжения. Значения импульсных

напряжений для грозовых и коммутационных импульсов, возникающих в электрических сетях энерго-снабжающей организации, приведены в [1 прил. Д].

Временное перенапряжение характеризуется показателем коэффициента временного перенапряжения.

Значения коэффициентов временных перенапряжений, возникающих в электрических сетях энерго-снабжающей организации, приведены в [1 прил. Д].

*Показатели КЭ.* Нижеследующие формулы для определения показателей КЭ и вспомогательных параметров разработаны с использованием методики, приведенной в [1].

Отклонение напряжения.

Измерение установившегося отклонения напряжения  $\delta U_y$  осуществляют в соответствии с рекомендациями, приведенными в [1 прил. Б]. В результате за период времени (24 ч) образуется множество значений  $\Delta U_y$  размерности  $N_\Delta$ . Представим данное множество в виде нечеткого числа с треугольной функцией принадлежности

$$\mu_{\Delta U_y} = \max \left\{ 0, \min \left\{ \frac{\delta U_y - \delta U_{y\min}}{\delta U_{ym} - \delta U_{y\min}}, \frac{\delta U_{y\max} - \delta U_y}{\delta U_{y\max} - \delta U_{ym}} \right\} \right\}, \quad (9)$$

где

$$\delta U_{y\max} = \max_{\Delta U_y} \{ \delta U_{yj} \}, \quad \delta U_{y\min} = \min_{\Delta U_y} \{ \delta U_{yj} \},$$

$$\delta U_{ym} = \frac{\sum_{j=1}^{N_\Delta} \mu_{\delta U_{yj}} \delta U_{yj}}{\sum_{j=1}^{N_\Delta} \mu_{\delta U_{yj}}}, \quad (10)$$

здесь  $\mu_{\delta U_{yj}}$  – функция принадлежности (степень доверия)  $\delta U_{yj}$  множеству  $\Delta U_y$ .

Значение  $\mu_{\delta U_{yj}}$  может быть определено неформально, что нежелательно, поскольку субъективизм может исказить реальную картину. Более объективно данные параметры можно получить, например, с использованием аппарата математической статистики. Скажем, диапазон  $\{ \delta U_{y\min}, \delta U_{y\max} \}$  разбить на  $N_d$  интервалов, определить частоту попадания  $\delta U_{yj}$  в соответствующие интервалы. Значения данных частот, отнесенные к максимальному значению частоты, можно взять в качестве  $\mu_{\delta U_{yj}}$ .

Размах изменения напряжения в процентах вычисляются по приведенной в [1 п. Б.2] формуле.

В нормативном документе не указано количество замеров  $\delta U_t$ , а единичный замер мы вправе считать синглтоном с функцией принадлежности, рассчитанной по формуле

$$\mu_{\delta U_t}(\delta U_t) = 1. \quad (11)$$

Дозу фликера (кратковременную и длительную) при колебаниях напряжения любой формы определяют по приведенной в [1 п. Б.2] методике.

Качество электрической энергии по дозе фликера считают соответствующим требованиям стандарта, если каждая кратковременная и длительная дозы фликера, определенные путем измерения в течение 24 ч или расчета по [1 прил. В], не превышают предельно допустимых значений.

Это означает, что в данном случае каждое значение дозы фликера имеет самостоятельное значение и может быть представлено в виде синглтона с функцией принадлежности

$$\mu_{P_{St}} = 1; \mu_{P_{Lr}} = 1. \quad (12)$$

Измерение коэффициента  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения  $K_{(n)i}$  осуществляют для междуфазных (фазных) напряжений согласно методике, аналогичной расчету  $\delta U$ . Вычисляют значение коэффициента  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения  $K_{U(n)}$  в процентах как результат усреднения  $N$  наблюдений  $K_{U(n)i}$  на интервале времени  $T_{vs}$  равном 3 с. Число наблюдений  $N$  должно быть не менее 9 [1 п. Е.6]. Замеры проводятся в течение 24 ч. Полученное множество аналогично (9) аппроксимируется нечетким множеством  $\Delta K_U$  с функцией принадлежности

$$\mu_{\Delta K_U} = \max \left\{ 0, \min \left\{ \frac{K_U - K_{U \min}}{K_{Um} - K_{U \min}}, \frac{K_{U \max} - K_U}{K_{U \max} - K_{Um}} \right\} \right\}, \quad (13)$$

где

$$K_{U \max} = \max_{\Delta K_U} \{K_{Uj}\}, K_{U \min} = \min_{\Delta K_U} \{K_{Uj}\},$$

$$K_{Um} = \frac{\sum_{j=1}^{N_A} \mu_{K_{Uj}} K_{Uj}}{\sum_{j=1}^{N_A} \mu_{K_{Uj}}}, \quad (14)$$

здесь  $\mu_{K_{Uj}}$  – функция принадлежности (степень доверия)  $K_{Uj}$  множеству  $\Delta K_U$ .

Измерение коэффициента несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности  $K_{2U}$ ,  $K_{0U}$  для междуфазных напряжений осуществляют согласно методике, приведенной в [1 п. Б.4].

Вычисляют значение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности  $K_{2U}$  в процентах как результат усреднения  $N$  наблюдений  $K_{2Ui}$  на интервале времени  $T_{vs}$ , равном 3 с. Замеры проводятся в течение 24 ч. Полученное множество аналогично (9) аппроксимируется нечетким множеством  $\Delta K_{2U}$  с функцией принадлежности

$$\mu_{\Delta K_{2U}} = \max \left\{ 0, \min \left\{ \frac{K_{2U} - K_{2U \min}}{K_{2Um} - K_{2U \min}}, \frac{K_{2U \max} - K_{2U}}{K_{2U \max} - K_{2Um}} \right\} \right\}, \quad (15)$$

где

$$K_{2U \max} = \max_{\Delta K_{2U}} \{K_{2Uj}\}, K_{2U \min} = \min_{\Delta K_{2U}} \{K_{2Uj}\},$$

$$K_{2Um} = \frac{\sum_{j=1}^{N_A} \mu_{K_{2Uj}} K_{2Uj}}{\sum_{j=1}^{N_A} \mu_{K_{2Uj}}}, \quad (16)$$

здесь  $\mu_{K_{2Uj}}$  – функция принадлежности (степень доверия)  $K_{2Uj}$  множеству  $\Delta K_{2U}$ .

Аналогично для  $K_{0U}$ .

$$\mu_{\Delta K_{0U}} = \max \left\{ 0, \min \left\{ \frac{K_{0U} - K_{0U \min}}{K_{0Um} - K_{0U \min}}, \frac{K_{0U \max} - K_{0U}}{K_{0U \max} - K_{0Um}} \right\} \right\}, \quad (17)$$

где

$$K_{0U \max} = \max_{\Delta K_{0U}} \{K_{0Uj}\}, K_{0U \min} = \min_{\Delta K_{0U}} \{K_{0Uj}\},$$

$$K_{0Um} = \frac{\sum_{j=1}^{N_A} \mu_{K_{0Uj}} K_{0Uj}}{\sum_{j=1}^{N_A} \mu_{K_{0Uj}}}, \quad (18)$$

здесь  $\mu_{K_{0Uj}}$  – функция принадлежности (степень доверия)  $K_{0Uj}$  множеству  $\Delta K_{0U}$ .

Измерение отклонения частоты  $\Delta f$  осуществляют согласно методике, приведенной в [1 п. Б.5]. Вычисляют усредненное значение частоты  $f$  в герцах как результат усреднения  $N$  наблюдений на интервале времени. Замеры проводятся в течение 24 ч. Полученное множество аналогично (9) аппроксимируется нечетким множеством  $\Delta F$  с функцией принадлежности

$$\mu_{\Delta F} = \max \left\{ 0, \min \left\{ \frac{\Delta f - \Delta f_{\min}}{\Delta f_m - \Delta f_{\min}}, \frac{\Delta f_{\max} - \Delta f}{\Delta f_{\max} - \Delta f_m} \right\} \right\}, \quad (19)$$

где

$$\Delta f_{\max} = \max_{\Delta F} \{\Delta f_j\}, \Delta f_{\min} = \min_{\Delta F} \{\Delta f_j\},$$

$$\Delta f_m = \frac{\sum_{j=1}^{N_A} \mu_{\Delta f_j} \Delta f_j}{\sum_{j=1}^{N_A} \mu_{\Delta f_j}}, \quad (20)$$

здесь  $\mu_{\Delta f_j}$  – функция принадлежности (степень доверия)  $\Delta f_j$  множеству  $\Delta F$ .

Измерение провала напряжения осуществляют согласно методике, приведенной в [1 п. Б.6].

Длительность провала характеризуется функцией принадлежности

$$\mu_{\Delta t_n} = \max \left\{ 0, \min \left\{ \frac{\Delta t_n - \Delta t_{n \min}}{\Delta t_{nm} - \Delta t_{n \min}}, \frac{\Delta t_{n \max} - \Delta t_n}{\Delta t_{n \max} - \Delta t_n} \right\} \right\}, \quad (21)$$

где

$$\Delta t_{n \max} = \max_{\Delta T} \{\Delta t_{nj}\}, \Delta t_{n \min} = \min_{\Delta T} \{\Delta t_{nj}\},$$

$$\Delta t_{nm} = \frac{\sum_{j=1}^{N_A} \mu_{\Delta t_{nj}} \Delta t_{nj}}{\sum_{j=1}^{N_A} \mu_{\Delta t_{nj}}}, \quad (22)$$

здесь  $\mu_{\Delta t_{nj}}$  – функция принадлежности (степень доверия)  $\Delta t_{nj}$  множеству  $\Delta T$ . Множество  $\Delta T$  состоит из результатов измерений в течение достаточно длительного периода (до одного года).

Импульсное напряжение и длительность импульса измеряют согласно методике, приведенной в [1 п. Б.7]. Данная методика достаточно трудоемка и запутанна.

Измерение коэффициента временного перенапряжения и длительность временного перенапряжения осуществляют согласно методике, приведенной в [1 п. Б.8].

Оценка соответствия показателей КЭ установленным нормам в нечеткой форме. Обобщенный показатель качества электроэнергии. Степень соответствия нечетких значений ПКЭ нечетким нормам КЭ можно

оценить по их пересечению

$$S = S_{НКЭ} \cap S_{ПКЭ}. \quad (23)$$

На рис. 1 индексы пн, н, м, в, пв – соответственно предельно низкое, низкое, модальное значение, высокое, предельно высокое.

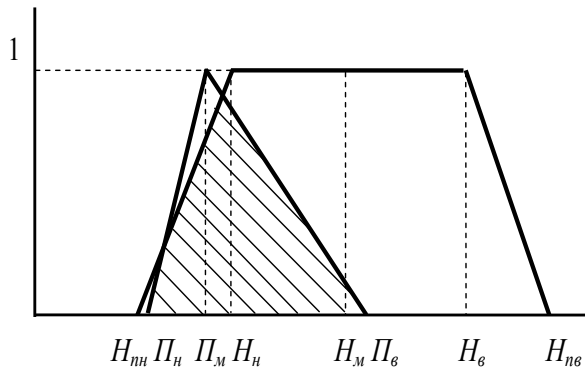


Рисунок 1 – Пересечение нечеткого числа и нечеткого интервала

Пересечение нечетких чисел в общем случае имеет функцию принадлежности, отличную от треугольной (рис. 1) и высоту  $h \neq 1$ . Численно пересечение нечетких чисел можно оценить по площади фигуры, образованной функцией принадлежности пересечения. Тогда функция принадлежности соответствия нечеткого ПКЭ нечетким нормам КЭ может быть представлена в виде

$$\mu_{КЭ} = S / S_{ПКЭ}. \quad (24)$$

Пересечение нечеткого интервала с синглтоном можно оценить не по площади пересечения фигур под функциями принадлежности, а по формуле

$$\mu_{КЭ} = \min(\mu_{НКЭ}, \mu_{ПКЭ}). \quad (25)$$

Таким образом, имея зависимости для расчета функций принадлежности нечетких норм КЭ (1) - (8) и рассчитанные с использованием замеров функции принадлежности ПКЭ (9) – (22), используя (24), (25), получим набор значений функций принадлежности соответствия нечетких ПКЭ нечетким нормам КЭ для каждого показателя качества электроэнергии.

Поскольку операции над нечеткими множествами однозначно проецируются на операции с их функциями принадлежности, то сформировать *единый показатель*, отражающий нечеткое понятие "качества электроэнергии" можно достаточно просто.

Например, с использованием логической операции пересечения единый показатель качества может быть представлен в следующем виде

$$КЭ = \bigcap_{i=1}^{N_{ПКЭ}} ПКЭ_i; \quad \mu_{КЭ} = \min_i(\mu_{КЭ_i}), \quad (26)$$

где  $N_{ПКЭ}$  – число рассматриваемых показателей качества. Тогда  $\mu_{КЭ}$  можно считать обобщенным показателем, оценивающим качество электроэнергии числом из диапазона [0, 1].

**Выводы.** Приведенная методология достаточно просто реализуется программно. Например, в виде

макросов или формальных расчетных схем в табличном процессоре Excel. Ее можно встроить в систему АСКУЭ и контролировать КЭ постоянно.

По сравнению с детерминированной методикой [1], которая предназначена скорее для фиксации наличия некачественной электроэнергии и определения мероприятий по нормализации КЭ по факту, разработанная методология позволяет отслеживать изменение качества электроэнергии даже если основные показатели не выходят за пределы допустимых значений, проводить анализ динамики изменения ПКЭ и определять упреждающие мероприятия по нормализации КЭ.

Выражение (26) отражает простейший подход к формированию обобщенного показателя качества электроэнергии. Но если структурировать показатели качества системой приоритетов, то можно сформировать более сложный вид обобщенного показателя качества с применением схем логического вывода Сугено или Мамдани.

#### Список использованных источников

1. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : ГОСТ 13109-97. — [Введен 1999-01-01]. — М. : Госстандарт РФ, 1997. — 33 с. — (Межгосударственный стандарт).
2. Mauris G., Lassere V., Foulley L. A fuzzy approach for the expression of uncertainty in measurement // - Measurement. - 2001. - №29. - С. 109-121.

#### Анотація

#### МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ У НЕЧІТКІЙ ФОРМІ

Кузнєцов В. Г., Тугай Ю. І., Тимчук С. О., Черемісін М. М.

*Запропоновано методику представлення норм якості електроенергії, показників якості електроенергії у вигляді трикутних нечітких чисел і інтервалів. Запропоновано підхід до нечіткої оцінки якості електроенергії і формування узагальненого показника якості електроенергії в нечіткій формі.*

#### Abstract

#### METHODOLOGY OF ESTIMATION OF QUALITY OF ELECTRIC POWER IS IN FUZZYFORM

V. Kuznetsov, Y. Tugay, S. Tymchuk, N. Chremisin

*Methodology of presentation of norms of quality of electric power is offered, indexes of quality of electric power as three-cornered fuzzy numbers and intervals. A hike is offered to the fuzzy estimation of quality of electric power and forming of the generalized index of quality of electric power in an fuzzy form.*