

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В НЕЧЕТКОЙ ФОРМЕ

Кузнецов В. Г.¹, Тугай Ю. И.¹, Тимчук С. А.², Черемисин Н. М.²¹Институт электродинамики НАН Украины (Киев),²Харковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко

Предложена методика представления норм качества электроэнергии, 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 δU_{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 (Δt_{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 δU_y осуществляют в соответствии с рекомендациями, приведенными в [1 прил. Б]. В результате за период времени (24 ч) образуется множество значений ΔU_y размерности N_Δ . 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) δU_{yj} множеству ΔU_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 δU_{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 δU_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

$$\mu_{P_{st}} = 1; \mu_{P_{Li}} = 1. \quad (12)$$

Измерение коэффициента n -ой гармонической составляющей напряжения $K_{(n)i}$ осуществляют для междуфазных (фазных) напряжений согласно методике, аналогичной расчету δU . 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 ΔK_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 ΔK_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 ΔK_{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 ΔK_{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 ΔK_{0U} .

Измерение отклонения частоты Δf 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 ΔF 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) Δf_j множеству ΔF .

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) Δt_{nj} множеству ΔT . Множество ΔT 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

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

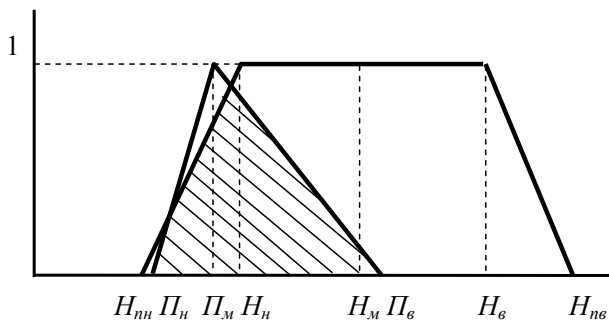


Рисунок 1 – Пересечение нечеткого числа и нечеткого интервала

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

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.