

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИНТЕРВАЛЬНЫХ ОЦЕНОК ОТКЛОНЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ*

С. Б. ПАТРУШЕВ

*Новосибирский государственный технический университет
Россия*

Предлагается метод для повышения точности интервальной оценки расчетных значений одного из основных показателей качества электрической энергии — отклонения напряжения от номинального значения. В основе метода лежит представление значения напряжения на зажимах электроприемников и его номинального значения посредством нечетких треугольных чисел. Показано, что форма симметричной функции принадлежности нечеткого числа не влияет на величину поправки расчетных значений допустимых отклонений напряжения.

1. Введение

Работа, представленная в этой статье, посвящена проблеме повышения точности интервальной оценки расчетных значений одного из основных показателей качества электрической энергии проектируемой системы электроснабжения промышленных предприятий. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения переменного трехфазного и однофазного тока частотой 50 герц устанавливаются стандартом [?]. Одним из основных показателей качества электрической энергии является отклонение напряжения δU . Отклонение напряжения оценивается разностью между действительным и номинальным значениями напряжения

$$\delta U = u - U_n,$$

где u — действительное, или рабочее, значение напряжения, В, кВ; U_n — номинальное значение напряжения, В, кВ.

При проектировании электрических сетей следует предусматривать применение устройств и мероприятий, обеспечивающих требуемое стандартом [?] качество электрической энергии в точках присоединения электроприемников. Расчет, который выполняется для определения необходимости и достаточности выбираемых мероприятий, обычно проводится для режимов наибольших и наименьших нагрузок и определяет нижний $u_- = U_n - \delta U_-$ и верхний $u_+ = \delta U_+ + U_n$ пределы допустимого отклонения напряжения. Здесь δU_- — расчетное отклонение напряжения при наибольших нагрузках, а δU_+ — при наименьших нагрузках. В этом случае возможны ситуации, показанные на рис. 1.

*©С. Б. Патрушев, 1997

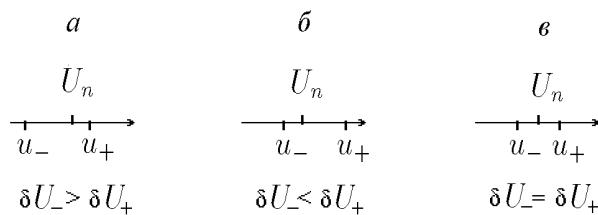


Рис. 1. Отклонения напряжения.

Необходимость в мероприятиях и средствах регулирования напряжения определяется сравнением расчетных значений с допускаемым стандартом отклонением напряжения. Так, в нормальном режиме работы электрической сети общего назначения допускается отклонение напряжения от номинального $\pm 5\%$. Этую необходимость можно выразить правилом (1):

если

$$0.05U_n \geq \begin{cases} \delta U_-, & u < U_n, \\ \delta U_+, & u > U_n, \end{cases} \quad (1)$$

то

средства регулирования напряжения в выбранной точке сети можно не предусматривать,

иначе

следует предусмотреть средства местного регулирования напряжения (статические конденсаторы, установки продольной компенсации и пр.).

Опыт проектирования электрических сетей общего назначения [?] показывает, что существует расхождение между расчетными значениями электрической нагрузки и фактическими нагрузками действующего предприятия. Причиной этого является непринятие во внимание на стадии проектирования интервальной или нечеткой формы расчетных коэффициентов электрических нагрузок. Вследствие этого многие параметры проектируемой электрической сети часто принимаются завышенными, в частности такой показатель качества электрической энергии, как отклонение напряжения, что приводит к необходимости включения в проекты дополнительных устройств. Выбор же устройств и мероприятий по таким завышенным расчетным значениям отклонений напряжения, в соответствии с правилом (1), не является экономически обоснованным и не обеспечивает требуемого качества электрической энергии в точках присоединения электроприемников. Рассматриваемый нами метод предлагается для обоснования необходимости корректировки расчетных значений допустимых отклонений напряжения на стадии проектирования систем электроснабжения.

2. Интервальная интерпретация действительного значения напряжения

В связи с тем, что напряжение является непрерывной величиной, сделаем следующее основное допущение, которое позволит упростить последующие построения. Пусть действительное значение напряжения в нормальном режиме в рассматриваемый момент времени и номинальное напряжение моделируются одинаковыми функциями принадлежно-

сти треугольного вида, как нечеткие треугольные числа “приблизительно u ” и “приблизительно U_n ”

$$\tilde{u} = (u, c_l, c_r) \quad \text{и} \quad \tilde{U}_n = (U_n, c_l, c_r).$$

Здесь $c_l \stackrel{\text{def}}{=} \delta U_-$, $c_r \stackrel{\text{def}}{=} \delta U_+$ — величины нечеткостей слева и справа соответственно, которые определяются расчетными значениями допустимых отклонений напряжения в режимах наибольших и наименьших нагрузок. Графическое представление предлагаемого метода показано на рис. 2.

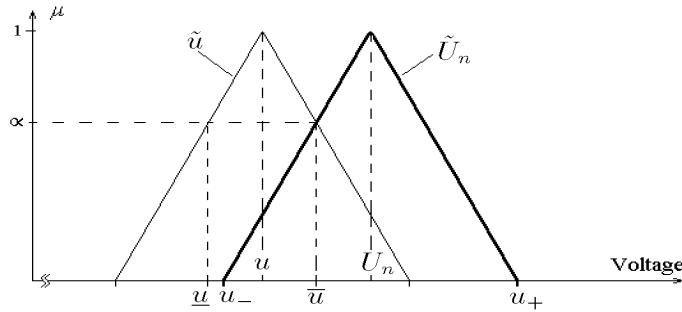


Рис. 2. Представление действительного и номинального значений напряжения нечеткими числами.

Так как значение номинального напряжения переменного тока является рекомендуемым [?] значением действительного напряжения, при котором все электрические параметры электроприемников являются самыми оптимальными, а качество электроэнергии (в совокупности с другими показателями) является наивысшим, то представим его фиксированным нечетким треугольным числом (утолщенная линия). Нечеткое число, моделирующее действительное значение напряжения в рассматриваемый момент времени, как-бы “плавающее” около функции принадлежности номинального напряжения, изображается тонкой линией. Представление действительного напряжения функцией принадлежности, имеющей ту же форму, что и номинальное напряжение, обусловлено следующими положениями:

рассматривается одна и та же физическая величина;

рассматриваемые значения напряжения не имеют статистических оценок.

В основе предлагаемого метода лежит идея интервальной интерпретации нечеткого числа посредством сравнения действительного значения напряжения с номинальным напряжением, которая заключается в использовании обычной операции пересечения нечетких множеств, введенной вместе с понятием нечеткого множества в [?]. В этом случае точка пересечения нечетких чисел

$$\sup\{\mu_{u \cap U_n}(u) \mid u \in \text{Voltage}\}$$

(см. рис. 2) определяет в нашей модели множество α -уровня u_α нечеткого числа \tilde{u} . В приведенном выражении $\mu_{u \cap U_n}(u)$ — функция принадлежности нечеткого множества $\tilde{u} \cap \tilde{U}_n$. Поскольку u_α является четким множеством, оно представляется интервалом. Таким образом, нечеткое число (u, c_l, c_r) , моделирующее действительное значение напряжения, может соответствовать замкнутому интервалу $[\underline{u}, \bar{u}]_\alpha$ некоторого α -уровня, где \underline{u}, \bar{u} — нижняя и верхняя границы интервала в соответствии с [?].

Подобная интервальная интерпретация действительного значения напряжения не противоречит широко распространенному представлению электрического напряжения как непрерывной случайной физической величины, параметры распределения которой могут быть оценены интервалами с выбранной доверительной вероятностью.

Введем следующие обозначения: $\omega = c_l + c_r$ — ширина интервала расчетных значений допустимых отклонений напряжения, а $k_l = \frac{c_l}{\omega}$ и $k_r = \frac{c_r}{\omega}$ — коэффициенты нечеткостей (слева и справа) расчетных значений отклонений напряжения. В этом случае справедливо равенство $k_l + k_r = 1$. Обозначим через $\Delta = |\delta U|$ модуль отклонений напряжения.

Рассмотрим случай отклонений напряжения, когда $c_l \neq c_r$ (см. рис. 1). При этом будем считать, что условия по выбору средств регулирования напряжения определяются правилом (2):

если

$$[\underline{u}, \bar{u}]_\alpha \subseteq [u_-, u_+], \quad (2)$$

то

средства регулирования напряжения в выбранной точке сети можно не предусматривать,

иначе

следует предусмотреть средства местного регулирования напряжения (статические конденсаторы, установки продольной компенсации и пр.).

Общую формулу, с учетом введенных выше обозначений, для определения интервальных границ действительного значения напряжения можно записать в следующем виде:

$$[\underline{u}, \bar{u}]_\alpha = \begin{cases} [U_n - (k_l + 1)\Delta, U_n - k_l\Delta], & u \leq U_n, \\ [U_n + k_r\Delta, U_n + (k_r + 1)\Delta], & u \geq U_n. \end{cases} \quad (3)$$

В этом случае представляется возможным определение предельно допустимых действительных значений напряжения при допущении, что условная часть правила (2) верна, то есть выполняются условия: $\underline{u} = u_-$ при $u < U_n$ и $\bar{u} = u_+$ при $u > U_n$. Эти значения определяются с помощью выражений

$$\begin{aligned} u = u'_- &= \frac{1}{1 + k_l} (u_- + k_l U_n) && \text{при } u < U_n, \\ u = u'_+ &= \frac{1}{1 + k_r} (u_+ + k_r U_n) && \text{при } u > U_n. \end{aligned}$$

Представим приведенные выше выражения интервалом (4):

$$[u'_-, u'_+] = \left[\frac{u_- + k_l U_n}{1 + k_l}, \frac{u_+ + k_r U_n}{1 + k_r} \right]. \quad (4)$$

Здесь интервал $[u'_-, u'_+]$ определяет *скорректированный* допустимый диапазон отклонений напряжения. Таким образом, становится возможным переопределение расчетных отклонений напряжения при наибольших и наименьших нагрузках:

$$\delta U'_- = U_n - u'_-, \quad \delta U'_+ = u'_+ - U_n.$$

Обозначим через $\omega' = u'_+ - u'_-$ ширину скорректированного интервала. Из выражения (4) видно, что скорректированный допустимый диапазон отклонений напряжения полностью включается в интервал расчетных значений допустимых отклонений напряжения.

При этом рассмотрение конкретных числовых примеров позволяет высказать гипотезу о том, что разность $\Delta\omega$ между шириной интервала расчетных значений ω и шириной интервала скорректированных допустимых отклонений напряжения ω' лежит в пределах 33–50 % (рис. 3).

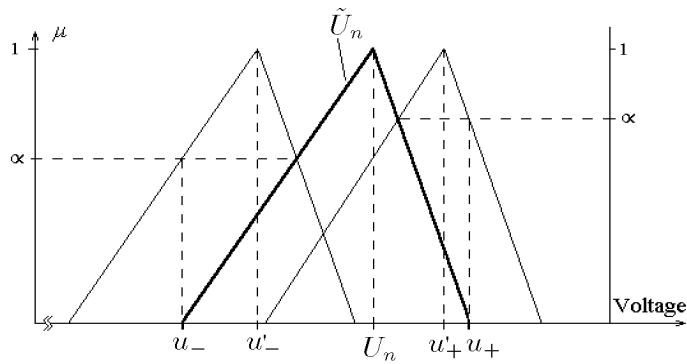


Рис. 3. Графическая интерпретация определения скорректированного допустимого диапазона отклонений напряжения при неравенстве нечеткостей слева и справа при $c_l > c_r$.

С учетом рассматриваемого в работе метода, необходимость в средствах регулирования напряжения можно представить правилом:

если

$$0.05 \cdot U_n \geq \begin{cases} \delta U'_-, & u < U_n, \\ \delta U'_+, & u > U_n, \end{cases} \quad (5)$$

то

средства регулирования напряжения в выбранной точке сети можно не предусматривать,

иначе

следует предусмотреть средства местного регулирования напряжения (статические конденсаторы, установки продольной компенсации и пр.).

Рассмотрим для другого частного случая отклонений напряжения (см. рис. 1, в) представление нечетких треугольных чисел, когда величины нечеткостей слева и справа равны между собой (см. рис. 2). Из (4) и условия равенства коэффициентов нечеткостей, после эквивалентных преобразований с учетом введенных выше обозначений, интервальная интерпретация действительного значения напряжения определяется с помощью выражения

$$[\underline{u}, \bar{u}]_\alpha = \begin{cases} [U_n - 1.5\Delta, U_n - 0.5\Delta], & u < U_n, \\ [U_n + 0.5\Delta, U_n + 1.5\Delta], & u > U_n. \end{cases} \quad (6)$$

Из выражения (6) также можно вывести формулу для определения предельно допустимых действительных значений напряжения, при которых не потребуется проведение мероприятий по регулированию напряжения. В этом случае необходимо и достаточно, чтобы $\underline{u} = u_-$ при максимальных нагрузках и $\bar{u} = u_+$ при $u > U_n$ (рис. ??).

Путем эквивалентных преобразований устанавливается, что предельно допустимые действительные значения напряжения для рассматриваемых условий определяются выражением

$$[u'_-, u'_+] = \left[\frac{1}{3} (2u_- + U_n), \frac{1}{3} (2u_+ + U_n) \right]. \quad (7)$$

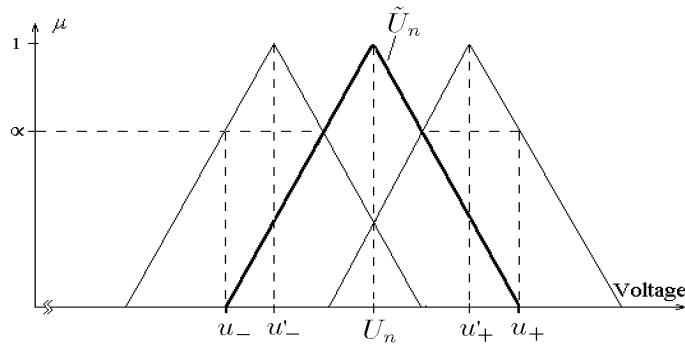


Рис. 4. Графическая интерпретация определения скорректированного допустимого диапазона отклонений напряжения при равенстве нечеткостей слева и справа.

Из рис. ?? и равенства (7) видно, что разность $\Delta\omega$ равна 33.3 %:

$$\Delta\omega = \omega - \omega' = \frac{1}{3} (u_+ - u_-). \quad (8)$$

Таким образом, применение данного метода позволяет теоретически обосновать возможность корректировки расчетных значений допустимых отклонений напряжения на стадии проектирования электрических сетей общего назначения.

В заключение рассмотрим более общую ситуацию, когда функции принадлежности симметричны, но не являются треугольными (рис. ??). При моделировании значений напряжения с помощью симметричных нечетких чисел применение правила (5) также является справедливым и приемлемым для экономически обоснованного выбора средств регулирования напряжения.

Очевидно, что применение предложенного метода в этой ситуации дает значение разности $\Delta\omega$, одинаковое (около 33 %) для всех симметричных функций принадлежности. По нашему мнению, такое свойство предлагаемого метода поможет снять для многих пользователей иногда трудноразрешимый вопрос о способах построения функций принадлежности нечетких понятий и достоверности предлагаемых нечетких моделей.

Об интерпретации значений α -уровня можно сказать следующее. Предлагается использовать его, в некоторой степени аналогично [?], в качестве индекса достоверности предлагаемых рекомендаций, направленных на повышение качества расчетных параметров

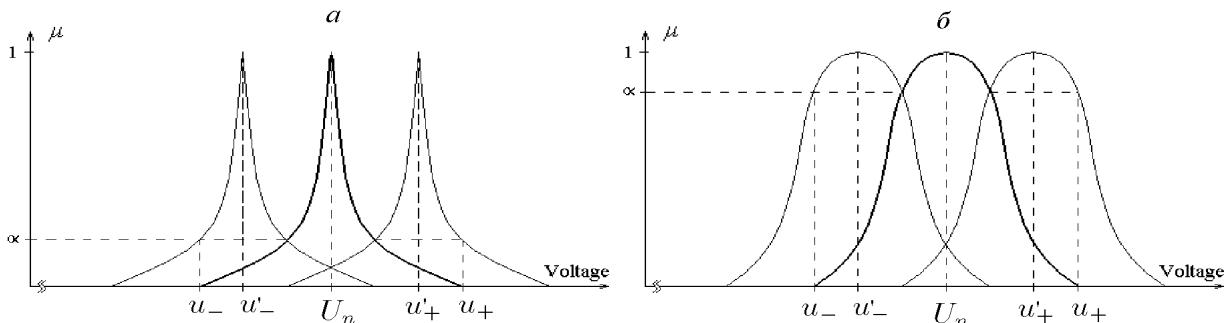


Рис. 5. Возможные формы функций принадлежности нечетких чисел.

исследуемых технических систем. Нами установлено, что в случае использования в обсуждаемой модели симметричных нечетких треугольных чисел (см. рис. ??), α -уровень как индекс достоверности предлагаемых рекомендаций, обусловленных сокращением интервала расчетного допустимого диапазона отклонений напряжения, равен 0.666.

3. Заключение

В работе показывается, что моделирование непрерывной физической величины симметричным или несимметричным нечетким числом позволяет повысить приблизительно на 33 % и до 50 % соответственно точность расчетных интервальных оценок тех параметров электрических сетей общего назначения, при расчете которых традиционно используются приближенные, так называемые практические методы. Как показали исследования, рассматриваемый метод инвариантен относительно различных форм симметричных функций принадлежности нечетких чисел. Работа носит методологический характер и, хотя некоторые аспекты определения мероприятий, направленных на повышение качества электрической энергии не были рассмотрены, демонстрирует плодотворность применения теории нечетких множеств на стадии проектирования сложных технических систем.

Автор выражает глубокую признательность С. П. Шарому, ст. научному сотруднику Института вычислительных технологий СО РАН г. Новосибирска, а также К. П. Кадомской, профессору, заслуженному деятелю науки и техники за ряд ценных замечаний и рекомендаций.

Список литературы

- [1] ГОСТ 13109-67*. Электрическая энергия. Нормы качества электрической энергии у ее приемников, присоединенных к электрическим сетям общего назначения. Изд-во стандартов, М., 1985.
- [2] Справочник по проектированию электроснабжения. Энергоатомиздат, М., 1990.
- [3] ГОСТ 21128-83. Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения до 1000 В и допускаемые отклонения. Изд-во стандартов, М., 1984.
- [4] ZADEH L. A. Fuzzy sets. *Information and Control* 8, №3, 1965, 338–353.
- [5] MOORE R. E. *Methods and applications of interval analysis*. SIAM, Philadelphia, 1979.
- [6] MIRANDA V., SARAIVA J. T. Fuzzy modelling of power system optimal load flow. *Transactions on Power Systems* 7, №2, 1992, 843–849.