

Представлені в нечіткому вигляді втрати електричної енергії в залежності від показників якості електричної енергії для кожного виду навантаження в сільських розподільних мережах. Детерміновані залежності втрат електричної енергії представлені в нечіткому вигляді з урахуванням особливостей конкретних видів навантаження і елементів електричної мережі

Ключові слова: втрати електричної енергії, несиметрія напруги, несинусоїдальність напруги, нечіткі множини

Представлены в нечетком виде потери электрической энергии в зависимости от показателей качества электрической энергии для каждого вида нагрузки в сельских распределительных сетях. Детерминированные зависимости потерь электрической энергии представлены в нечетком виде с учетом особенностей конкретных видов нагрузки и элементов электрической сети

Ключевые слова: потери электрической энергии, несимметрия напряжений, несинусоидальность напряжения, нечеткие множества

УДК 621.311

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.36003

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕЕ КАЧЕСТВА В НЕЧЕТКОЙ ФОРМЕ В СЕЛЬСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

С. А. Тимчук

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: stym@i.ua

А. А. Мирошник

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: Miroshnyk@rambler.ru

*Кафедра автоматизации и

компьютерно-интегрированных технологий

Харьковский национальный

технический университет сельского хозяйства

ул. Энгельса, 19, г. Харьков, Украина, 61052

1. Введение

Проблема снижения потерь и повышения качества электрической энергии очень остро стоит в сельских распределительных сетях 0,38/0,22 кВ.

Традиционно методы определения потерь электроэнергии основывались на учете величин тока нагрузки и сопротивления элемента сети, по которому этот ток протекает, при этом, как правило, принимается, что показатели качества электрической энергии находятся в установленных стандартом границах. Последнее предположения как раз для сельских электросетей не является справедливым. В то же время отклонение показателей качества электрической энергии от нормированных значений практически всегда приводит к дополнительным потерям электроэнергии, как в элементах сети, так и в электрооборудовании электротехнологических объектов потребителей электроэнергии.

Знание величины и диапазонов отклонения показателей качества электрической энергии от нормы позволяет уточнить уровень потерь в сети и в электротехнологических объектах и применить соответствующие мероприятия по их снижению.

Можно выделить основные показатели качества электрической энергии, ухудшение которых приводит к увеличению потерь электроэнергии в сетях 0,38/0,22 кВ [1]: установившееся отклонение напря-

жения, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, коэффициент n -й гармонической составляющей, коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности, коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности, отклонение частоты.

Кроме увеличения потерь электроэнергии, низкое качество электрической энергии оказывает существенное влияние на технико-экономические характеристики элементов сети и электроприемников [2]. При ухудшении качества напряжения, происходит снижение эксплуатационной надёжности электродвигателей, возникает ряд отрицательных электромагнитных явлений в сетях. Несинусоидальность напряжения влечет за собой ускоренное старение изоляции электрических машин, трансформаторов, кабелей, ухудшение коэффициента мощности коммунально-бытовых потребителей, ухудшение или нарушение работы устройств автоматики, телемеханики, компьютерной техники и других устройств с элементами электроники. Несимметрия напряжений отрицательно влияет на работу практически всех электроприёмников. Например, при работе асинхронных двигателей, в условиях несимметрии нагрузок, наблюдается сбой в системе автоматического управления и контроля, уменьшается вращающий момент, появляется вибрация, сокращается срок службы почти вдвое.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Большая разветвленность и протяженность распределительных сетей, нестабильный и неоднородный характер нагрузки, низкая наблюдаемость электрических сетей, отсутствие информации о топологии и нагрузке за рассматриваемый период времени не позволяют эксплуатационному персоналу получать достоверные значения показателей качества электрической энергии и, следовательно, точно определить потери электрической энергии. Неопределенность исходной информации требует своего раскрытия.

Между тем потери электрической энергии в распределительных сетях невозможно измерить напрямую, а можно лишь определить расчетным путем. Нарботанные расчетные методики в основном детерминированные и не позволяют учесть неопределенность исходной информации.

В разных источниках литературы по-разному предлагают определять потери от некачественной электрической энергии, так в литературе [3] предлагается определять потери на основании измеренных токов высших гармоник и поправочных коэффициентов. В [4] предлагается метод определения дополнительных потерь в двигателе от высших гармоник ΔP_{Σ} по кривым, на которых представлены отношения потерь ΔP_v при напряжении, равном 1 % напряжения основной частоты, к суммарным номинальным потерям $\Delta P_{ном}$, достаточно прост в использовании. В [5] предлагается рассчитывать дополнительные потери в двигателе через коэффициент, который учитывает параметры асинхронного двигателя. В [6] дополнительные потери в трансформаторах от протекания токов высших гармоник предлагается определять в виде суммы потерь холостого хода и короткого замыкания. Но все перечисленные методы не позволяют определить диапазон изменения потерь электрической энергии.

Таким образом, общепринятые подходы к решению рассматриваемой проблемы базируются на принципе детерминизма. Исходные данные при этом подвергаются процедурам детерминизации, таким как усреднение, фильтрация и др. [7, 8]. Поэтому, в среднем получаемые зависимости правильно описывают закономерности образования потерь, но в конкретных случаях точность расчетов, как правило, низкая. Неопределенность исходной информации может быть раскрыта в рамках теории нечетких множеств [9–13]. Прикладные её аспекты позволяют судить об эффективности применения в технологических направлениях, среди которых и энергетика [14], и материаловедение [15]; технологии органических и неорганических веществ и экология [16, 17], металлургия [18–21]. Не составляет исключения, с точки зрения объекта приложения теории нечетких множеств, и электроэнергетические системы.

3. Цель и задачи исследования

Цель исследования – совершенствование математических моделей определения потерь электрической энергии в зависимости от ее качества для различных

видов нагрузок в сельских сетях путем представления данных моделей в нечетком виде.

Для достижения поставленной цели необходимо решить задачу преобразования детерминированных зависимостей к нечеткому виду с учетом особенностей конкретных видов нагрузки и элементов электрической сети.

4. Методика преобразования детерминированных зависимостей расчета потерь в зависимости от качества электроэнергии к нечеткому виду

В контексте поставленной цели предлагаемая методика использует детерминированные зависимости. Если исходные данные при этом не подвергать детерминизации, то результатом расчетов будет не единственное решение, а множество. Если же исходные данные представить в виде нечетких множеств, а это возможно, поскольку степень доверия к отдельным значениям может быть экспертно определена, то в результате расчетов, согласно принципу нечеткого обобщения Задэ, можно получить нечеткое множество. Полученный таким образом результат будет обладать большей информативностью по сравнению с детерминированным, поскольку он учитывает все доступное многообразие исходных данных, дает представление о диапазоне изменения определяемых потерь и о наиболее реальных их значениях. При этом сохраняется преемственность с предыдущими разработками.

Неопределенность исходных данных в первую очередь отражается на расчете показателей качества электроэнергии. Представление показателей качества электрической энергии в нечетком виде детально описано в [22].

Проиллюстрируем описанное выше на примере расчета добавочных потерь в электродвигателе от токов обратной последовательности. Добавочные потери в обмотке статора электродвигателя от токов обратной последовательности, обусловленные несимметрией подводимых напряжений, определяются по формуле [23]:

$$\Delta P_{2\Delta D} = \alpha_{2\Delta p} \cdot \Delta P_n \cdot K_{2U}^2, \quad (1)$$

где $\alpha_{2\Delta p}$ – коэффициент пропорциональности (для двигателя 5 кВт $\alpha_{2\Delta p} = 0,0072$); ΔP_n – номинальные потери мощности, (для двигателя 5 кВт $\Delta P_n = 0,61$ кВт); K_{2U} – коэффициент обратной последовательности.

Измерение коэффициента несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности K_{2U} , K_{0U} для междуфазных напряжений осуществляют согласно детерминированной методике, приведенной в [24].

Вычисляют значение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} в процентах как результат усреднения N наблюдений K_{2U_i} на интервале времени T_{vs} , равном 3 с. Замеры проводятся в течение 24 ч. Полученное множество аппроксимируется нечетким множеством ΔK_{2U} с функцией принадлежности [9]:

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

где

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

$$K_{2Um} = \frac{\sum_{j=1}^{N_A} \mu_{K_{2Uj}} K_{2Uj}}{\sum_{j=1}^{N_A} \mu_{K_{2Uj}}}, \quad (3)$$

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

Тогда в нечеткой форме

$$K_{2U} = \langle K_{2Um}, K_{2Um} - K_{2U_{min}}, K_{2U_{max}} - K_{2Um} \rangle, \quad (4)$$

и выражение (1) согласно обобщенным операциям Заде примет вид:

$$\Delta P_{2AD} = \langle \Delta P_{2ADm}, \Delta P_{2AD-}, \Delta P_{2AD+} \rangle, \quad (5)$$

где

$$\Delta P_{2ADm} = \alpha_{2\Delta p} \cdot \Delta P_H \cdot K_{2Um}^2,$$

$$\Delta P_{2AD+} = \alpha_{2\Delta p} \cdot \Delta P_H \cdot (K_{2Um}^2 - K_{2U_{min}}^2),$$

$$\Delta P_{2AD-} = \alpha_{2\Delta p} \cdot \Delta P_H \cdot (K_{2U_{max}}^2 - K_{2Um}^2). \quad (6)$$

В формуле (5) предполагается, что параметры $\Delta P_{м.ном}$ и I_n^2 заданы четко, что является упрощением. Если эти параметры могут быть представлены в нечеткой форме, то они могут быть введены в выражение (5) с помощью обобщенных операций Заде.

Степень соответствия нечетких значений показателя качества электроэнергии (ПКЭ) нечетким нормам качества электроэнергии (КЭ) в [22] предложено оценивать по их пересечению. 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

$$\mu_{КЭ} = S / S_{ПКЭ}, \quad (7)$$

где S – площадь пересечения фигур, ограниченных функциями принадлежности ПКЭ и КЭ.

Используя (7), можно оценить потери в электродвигателе от токов обратной последовательности, обусловленные отклонением несимметрии подводимых напряжений от их допустимых значений, изменив (6) следующим образом:

$$\Delta P_{2ADm} = (1 - \mu_{K_{2U}}) \cdot \alpha_{2\Delta p} \cdot \Delta P_H \cdot K_{2Um}^2,$$

$$\Delta P_{2AD-} = (1 - \mu_{K_{2U}}) \cdot \alpha_{2\Delta p} \cdot \Delta P_H \cdot (K_{2Um}^2 - K_{2U_{min}}^2),$$

$$\Delta P_{2AD+} = (1 - \mu_{K_{2U}}) \cdot 2\alpha_{2\Delta p} \cdot \Delta P_H \cdot (K_{2U_{max}}^2 - K_{2Um}^2). \quad (8)$$

Выражения (6), (8) иллюстрируют увеличение информативности результатов расчетов.

5. Применение методики преобразования детерминированных зависимостей расчета потерь к нечеткому виду для различных электрических нагрузок

Коэффициент обратной последовательности входит в расчет потерь и других электрических устройств. Например, дополнительные потери мощности в трансформаторах при несимметрии токов и напряжений определяются следующим образом [6]:

$$\Delta P_{2TP} = \frac{\Delta P_K}{u_K^2} \cdot K_{2U}^2, \quad (9)$$

где ΔP_K – потери короткого замыкания, (например, для ТМ 100 $\Delta P_K = 1970$ Вт); u_K – напряжение короткого замыкания (для ТМ 100 $u_K = 4,5\%$).

Подставив (4) в (9), получим нечеткие зависимости для дополнительных потерь мощности в трансформаторе в виде:

$$\Delta P_{2TP} = \langle \Delta P_{2TPm}, \Delta P_{2TP-}, \Delta P_{2TP+} \rangle, \quad (10)$$

где

$$\Delta P_{2TPm} = \Delta P_K / u_K^2 \cdot K_{2Um}^2,$$

$$\Delta P_{2TP-} = \Delta P_K / u_K^2 \cdot (K_{2Um}^2 - K_{2U_{min}}^2),$$

$$\Delta P_{2TP+} = \Delta P_K / u_K^2 \cdot (K_{2U_{max}}^2 - K_{2Um}^2). \quad (11)$$

Соответственно, по формулам, аналогичным (8) можно оценить эти потери вследствие выхода значения коэффициента обратной зависимости за установленные нормативные допуски.

Приведенный подход распространяется и на расчеты потерь электроэнергии, связанных с другими показателями качества.

Так, добавочные потери в асинхронном двигателе, обусловленные несинусоидальностью режима в [5] предлагается рассчитывать по формуле:

$$\Delta P_{AD\Sigma v} = P_H k_{AD} \sum_{v=2}^{40} \frac{K_{U(v)}}{v}, \quad (12)$$

где P_H – номинальная мощность двигателя, (для двигателя $P_H = 5$ кВт); k_{AD} – коэффициент дополнительных потерь, зависящий от номинальной мощности двигателя, ($k_{AD} = 3$); v – номер гармоники; $K_{U(v)}$ – коэффициент v -й гармоники.

Проведя операции, аналогичны (2)–(6), получим выражение (12) в нечетком виде:

$$\Delta P_{AD\Sigma v} = \langle \Delta P_{AD\Sigma vm}, \Delta P_{AD\Sigma v-}, \Delta P_{AD\Sigma v+} \rangle, \quad (13)$$

где

$$K_{U(v)} = \langle K_{U(v)m}, K_{U(v)m} - K_{U(v)min}, K_{U(v)max} - K_{U(v)m} \rangle,$$

$$\Delta P_{AD\Sigma vm} = P_H k_{AD} \sum_{v=2}^{40} \frac{K_{U(v)m}}{v},$$

$$\Delta P_{AD\Sigma v-} = P_H k_{AD} \left(\sum_{v=2}^{40} \frac{K_{U(v)m}}{v} - \sum_{v=2}^{40} \frac{K_{U(v)min}}{v} \right),$$

$$\Delta P_{AD\Sigma v+} = P_H k_{AD} \left(\sum_{v=2}^{40} \frac{K_{U(v)max}}{v} - \sum_{v=2}^{40} \frac{K_{U(v)m}}{v} \right). \quad (14)$$

Соответственно, дополнительные потери при несинусоидальном напряжении в трансформаторе, обусловленные высшими гармониками, в детерминированном виде определяются по формуле [6]:

$$\Delta P_{TP} = 0,607 \frac{\Delta P_{K3}}{u_{K3}^2} \sum_{n=2}^{40} \left(\frac{1}{v\sqrt{v}} + 0,05\sqrt{v} \right) K_{U(v)}^2, \quad (15)$$

где ΔP_{K3} – потери короткого замыкания; u_{K3} – напряжение короткого замыкания; v – номер гармоники; $K_{U(v)}$ – коэффициент v -й гармоники.

В нечетком виде данное выражение будет иметь следующий вид:

$$\Delta P_{TP} = \langle \Delta P_{TPm}, \Delta P_{TP-}, \Delta P_{TP+} \rangle, \quad (16)$$

где

$$K_{U(v)} = \langle K_{U(v)m}, K_{U(v)m} - K_{U(v)min}, K_{U(v)max} - K_{U(v)m} \rangle,$$

$$\Delta P_{TPm} = 0,607 \frac{\Delta P_{K3}}{u_{K3}^2} \sum_{v=2}^{40} \left(\frac{1}{v\sqrt{v}} + 0,05\sqrt{v} \right) K_{U(v)m}^2,$$

$$\Delta P_{TP-} = 0,607 \frac{\Delta P_{K3}}{u_{K3}^2} \times \left(\sum_{v=2}^{40} \left(\frac{1}{v\sqrt{v}} + 0,05\sqrt{v} \right) K_{U(v)m}^2 - \sum_{v=2}^{40} \left(\frac{1}{v\sqrt{v}} + 0,05\sqrt{v} \right) K_{U(v)min}^2 \right),$$

$$\Delta P_{TP+} = 0,607 \frac{\Delta P_{K3}}{u_{K3}^2} \times \left(\sum_{v=2}^{40} \left(\frac{1}{v\sqrt{v}} + 0,05\sqrt{v} \right) K_{U(v)max}^2 - \sum_{v=2}^{40} \left(\frac{1}{v\sqrt{v}} + 0,05\sqrt{v} \right) K_{U(v)m}^2 \right). \quad (17)$$

Таким образом, имея детерминированные зависимости для расчета потерь электроэнергии от показателей ее качества для различных типов нагрузок, используя предлагаемую методику, можно достаточно просто получить данные зависимости в нечеткой форме, повысив тем самым информативность расчетов.

6. Пример расчета потерь электроэнергии в зависимости от ее качества в нечеткой форме

Рассмотрим конкретный пример оценки потерь электрической энергии в нечетком виде.

В табл. 1 и на рис. 1 представлены результаты обработки данных автоматизированной системы контроля и управления электропотреблением одного из конкретных потребителей по выражениям (2)–(4). Отметим, что только для гармоники 15 в фазе А коэффициент $\mu_{K_{U(15)}} = 0,849$ (рис. 2), что свидетельствует о приближении данного показателя качества к предельно допустимым значениям. Остальные значения степени соответствия ПКЭ принятым нормам, вычисленные по выражению (7), равны 1. Это свидетельствует о достаточно высоком качестве электроэнергии.

В качестве примера запитанное оборудование от силового трансформатора ТМ-100. Для данного типа трансформатора $\Delta P_{K3} = 1970$ Вт, $u_K = 4,5$ %.

Потери в данном трансформаторе от несинусоидальности напряжения в нечеткой форме согласно выражениям (16), (17) составляют по фазам:

$$\Delta P_{TPm}^A = 5132,458, \text{ Вт},$$

$$\Delta P_{TP-}^A = 5132,458 - 1471,428 = 3661,030, \text{ Вт},$$

$$\Delta P_{TP+}^A = 26128,470 - 5132,458 = 20996,012, \text{ Вт},$$

$$\Delta P_{TP}^A = \langle 5132,458; 3661,030; 20996,012 \rangle, \text{ Вт},$$

$$\Delta P_{TPm}^B = 6749,509, \text{ Вт},$$

$$\Delta P_{TP-}^B = 6749,509 - 2125,705 = 4623,804, \text{ Вт},$$

$$\Delta P_{TP+}^B = 31610,891 - 6749,509 = 24861,382, \text{ Вт},$$

$$\Delta P_{TP}^B = \langle 6749,509; 4623,804; 24861,382 \rangle, \text{ Вт},$$

$$\Delta P_{TPm}^C = 9176,189, \text{ Вт},$$

$$\Delta P_{TP-}^C = 9176,189 - 1512,132 = 7664,057, \text{ Вт},$$

$$\Delta P_{TP+}^C = 39224,187 - 9176,189 = 30047,998, \text{ Вт},$$

$$\Delta P_{TP}^C = \langle 9176,189; 7664,057; 30047,998 \rangle, \text{ Вт}. \quad (18)$$

Воспользовавшись выражением, аналогичным (8), получим нечеткую оценку потерь электроэнергии от некачественной электроэнергии вследствие несинусоидальности напряжения

$$\Delta P_{TP}^A = \langle 0,0305; 0,025; 0,0332 \rangle, \text{ Вт},$$

$$\Delta P_{TP}^B = \langle 0; 0; 0 \rangle, \text{ Вт},$$

$$\Delta P_{TP}^C = \langle 0; 0; 0 \rangle, \text{ Вт}. \quad (19)$$

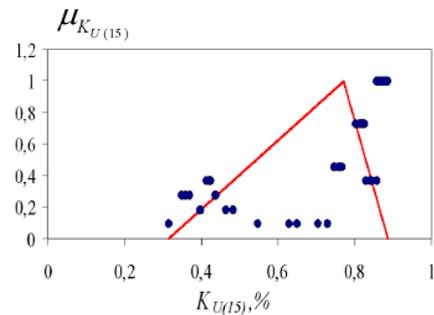


Рис. 1. Нечеткое представление коэффициентов несинусоидальности напряжения для 15-й гармоники

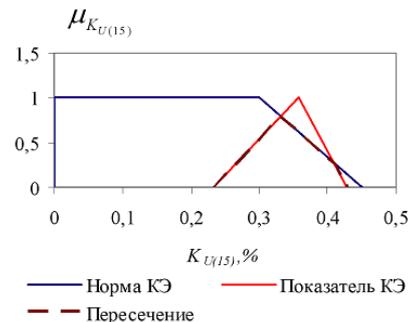


Рис. 2. Результат нечеткой оценки коэффициентов несинусоидальности напряжения для 15-й гармоники

Таблица 1

Нечеткие значения коэффициентов несинусоидальности, определенные по результатам измерений

Номер гармоники v	Фаза А			Фаза В			Фаза С		
	$K_{U(v)min}$	$K_{U(v)m}$	$K_{U(v)max}$	$K_{U(v)min}$	$K_{U(v)m}$	$K_{U(v)max}$	$K_{U(v)min}$	$K_{U(v)m}$	$K_{U(v)max}$
2	0,050	0,070	0,105	0,024	0,045	0,070	0,034	0,064	0,089
3	3,070	4,196	6,305	3,334	4,445	6,586	3,072	4,837	6,969
4	0,037	0,052	0,078	0,021	0,034	0,064	0,021	0,037	0,069
5	0,888	1,146	1,562	1,656	2,260	2,634	1,389	1,855	2,234
6	0,011	0,018	0,037	0,027	0,039	0,052	0,014	0,025	0,041
7	0,282	0,525	0,874	0,394	0,641	1,102	0,179	0,408	0,647
8	0,012	0,027	0,063	0,011	0,019	0,040	0,008	0,012	0,037
9	0,316	0,771	0,887	0,188	0,678	1,106	0,377	0,984	1,381
10	0,006	0,012	0,031	0,003	0,012	0,034	0,012	0,024	0,052
11	0,259	0,386	0,514	0,133	0,365	0,545	0,209	0,422	0,775
12	0,006	0,012	0,027	0,003	0,013	0,041	0,005	0,011	0,046
13	0,188	0,417	0,656	0,253	0,404	0,624	0,270	0,448	1,021
14	0,006	0,012	0,021	0,005	0,010	0,034	0,003	0,011	0,050
15	0,232	0,357	0,429	0,056	0,187	0,375	0,055	0,244	0,433
16	0,003	0,015	0,035	0,002	0,007	0,021	0,000	0,008	0,035
17	0,078	0,163	0,278	0,049	0,105	0,204	0,073	0,142	0,250
18	0,006	0,018	0,024	0,000	0,004	0,015	0,000	0,005	0,029
19	0,116	0,175	0,244	0,056	0,140	0,279	0,056	0,124	0,200
20	0,002	0,007	0,031	0,000	0,003	0,014	0,000	0,003	0,014
21	0,029	0,092	0,136	0,021	0,052	0,104	0,027	0,070	0,111
22	0,002	0,008	0,021	0,000	0,003	0,017	0,000	0,004	0,015
23	0,063	0,122	0,233	0,024	0,049	0,069	0,015	0,068	0,139
24	0,002	0,007	0,017	0,000	0,003	0,011	0,000	0,001	0,017
25	0,041	0,081	0,146	0,011	0,037	0,064	0,020	0,075	0,130
26	0,000	0,005	0,014	0,000	0,002	0,015	0,000	0,001	0,015
27	0,015	0,060	0,105	0,002	0,029	0,047	0,029	0,050	0,084
28	0,000	0,004	0,008	0,000	0,003	0,011	0,000	0,005	0,014
29	0,021	0,055	0,105	0,012	0,030	0,058	0,031	0,052	0,072
30	0,000	0,003	0,008	0,000	0,002	0,012	0,000	0,003	0,020
31	0,006	0,047	0,067	0,014	0,037	0,085	0,015	0,029	0,044
32	0,000	0,003	0,012	0,000	0,002	0,008	0,000	0,007	0,018
33	0,021	0,049	0,072	0,009	0,028	0,052	0,008	0,020	0,047
34	0,000	0,004	0,011	0,000	0,001	0,008	0,000	0,004	0,020
35	0,011	0,042	0,058	0,005	0,029	0,058	0,008	0,025	0,040
36	0,000	0,005	0,012	0,000	0,002	0,009	0,002	0,005	0,023
37	0,020	0,038	0,047	0,002	0,032	0,056	0,008	0,022	0,055
38	0,000	0,005	0,011	0,000	0,004	0,009	0,002	0,004	0,020
39	0,006	0,034	0,066	0,002	0,019	0,052	0,008	0,022	0,043
40	0,000	0,004	0,009	0,000	0,002	0,008	0,000	0,004	0,020

$$\Delta P_{\Delta D}^B = \langle 0,000243; 0,00209; 0,00009 \rangle, \text{ Вт,}$$

$$\Delta P_{\Delta Dm}^C = 0,000212, \text{ Вт,}$$

$$\Delta P_{\text{тр-}}^C = 0,000198, \text{ Вт,}$$

$$\Delta P_{\Delta D}^C = 0,00012, \text{ Вт,}$$

$$\Delta P_{\Delta D}^C = \langle 0,000212; 0,000198; 0,00012 \rangle, \text{ Вт. (20)}$$

Воспользовавшись выражением, аналогичным (8), получим нечеткую оценку потерь электроэнергии в асинхронном двигателе от некачественной электроэнергии вследствие несинусоидальности напряжения

$$\Delta P_{\Delta D}^A = \langle 0,0015; 0,004; 0,0026 \rangle, \text{ Вт,}$$

$$\Delta P_{\Delta D}^B = \langle 0; 0; 0 \rangle, \text{ Вт,}$$

$$\Delta P_{\Delta D}^C = \langle 0; 0; 0 \rangle, \text{ Вт. (21)}$$

Согласно стандарту [13] по результатам замеров нарушений предельных значений ПКЭ не отмечено и потери в силовом трансформаторе от несинусоидальности напряжения могут считаться допустимыми. Однако, в отличие от детерминированного подхода, нечеткий подход позволяет упредить появление потерь, обусловленных некачественной электроэнергией. В частности, полученные отличные от нуля значения потерь в (19) свидетельствует о наличии проблем в фазе А и необходимости провести анализ нагрузок, подключенных к данной фазе, на предмет выявления причин несинусоидальности и их нейтрализации.

Фазификация значений коэффициента несимметрии по обратной последовательности, проделанная по выражениям (2), (3), показала, что данный коэффициент (рис. 3) в обработанном диапазоне данных имеет существенное отклонение от нормы. Степень этого отклонения показана на рис. 4 и в нечеткой форме равна 0,6838.

Тогда добавочные потери в обмотке статора электродвигателя от токов обратной последовательности на основе зависимостей (5), (6) для двигателя мощностью 5 кВт будут

$$\Delta P_{2\Delta Dm} = 0,003975, \text{ кВт,}$$

$$\Delta P_{2\Delta D-} = 0,003504, \text{ кВт,}$$

$$\Delta P_{2\Delta D+} = 0,20033, \text{ кВт,}$$

$$\Delta P_{2\Delta D} = \langle 0,003975; 0,003504; 0,20033 \rangle, \text{ кВт. (22)}$$

Соответственно, потери в обмотке статора электродвигателя от токов обратной последовательности, обусловленные отклонением несимметрии подводимых напряжений от их допустимых значений на основании (8) будут

Аналогично, используя выражение (12) получим потери в асинхронном двигателе в нечетком виде

$$\Delta P_{\Delta Dm}^A = 0,000347, \text{ Вт,}$$

$$\Delta P_{\Delta D-}^A = 0,000204, \text{ Вт,}$$

$$\Delta P_{\Delta D+}^A = 0,00011, \text{ Вт,}$$

$$\Delta P_{\Delta D}^A = \langle 0,000347; 0,000204; 0,00011 \rangle, \text{ Вт,}$$

..., Вт,

$$\Delta P_{\text{тр-}}^B = 0,00209, \text{ Вт,}$$

$$\Delta P_{\Delta D+}^B = 0,00009, \text{ Вт,}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{2\Delta D_m} &= 0,001257, \text{ кВт}, \\ \Delta P_{2\Delta D} &= 0,001108, \text{ кВт}, \\ \Delta P_{2\Delta D^+} &= 0,063249, \text{ кВт}, \\ \Delta P_{2\Delta D} &= \langle 0,001257; 0,001108; 0,063249 \rangle, \text{ кВт}. \end{aligned} \quad (23)$$

Аналогично, используя выражение (9) получим потери в трансформаторе в нечетком виде

$$\begin{aligned} \Delta P_{2TP_m} &= 88,06, \text{ Вт}, \\ \Delta P_{2TP_-} &= 77,62, \text{ Вт}, \\ \Delta P_{2TP^+} &= 4430,79, \text{ Вт}, \\ \Delta P_{2TP} &= \langle 88,06; 77,62; 4430,79 \rangle, \text{ Вт}. \end{aligned} \quad (24)$$

Потери в трансформаторе от токов обратной последовательности, обусловленные отклонением несимметрии подводимых напряжений от их допустимых значений будут

$$\begin{aligned} \Delta P_{2TP_m} &= 27,84, \text{ Вт}, \\ \Delta P_{2TP_-} &= 24,54, \text{ Вт}, \\ \Delta P_{2TP^+} &= 1400,98, \text{ Вт}, \\ \Delta P_{2TP} &= \langle 27,84; 24,54; 1400,98 \rangle, \text{ Вт}. \end{aligned} \quad (25)$$

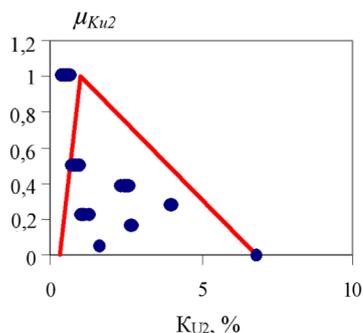


Рис. 3. Нечеткое представление коэффициентов несимметрии по обратной последовательности

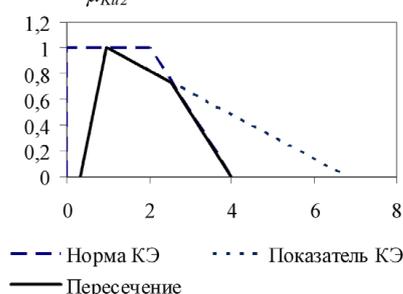


Рис. 4. Результат нечеткой оценки коэффициентов несимметрии по обратной последовательности

Результаты (18) содержат как информацию об ожидаемых потерях, которая близка к результатам детерминированных расчетов (модальные значения), так и информацию о диапазоне изменения данных потерь. Для решения проектных задач последнее актуально поскольку при проектировании неопределенность исходной информации наибольшая и оперирование точными значениями приводит к существенным ошибкам.

Результаты (18)–(25) дают представление как об ожидаемых общих потерях электроэнергии вследствие отличия коэффициента несинусоидальности и несимметрии по обратной последовательности от нуля, так и о диапазоне неопределенности данных результатов. Причем (19), (21), (23) и (25) дают представление о том, какую экономию по потерям ожидается получить при повышении качества электроэнергии в плане устранения несинусоидальности и несимметрии.

7. Выводы

Таким образом, предложена достаточно простая методика преобразования существующих детерминированных зависимостей расчета потерь от некачественной электроэнергии к нечеткому виду. Суть разработанной методики состоит в том, что появляется возможность представить потери в нечетком виде с учетом особенностей конкретных видов нагрузки и элементов электрической сети. Благодаря полученным зависимостям можно оценить в каком диапазоне и на сколько изменятся потери электрической энергии при несоответствии показателей качества допустимым нормам. То есть, получены зависимости для различных видов нагрузок обладают большей информативностью по сравнению с детерминированными поскольку кроме ожидаемых потерь позволяют оценить и диапазон их изменения.

Применение разработанных зависимостей, в отличие от детерминированных, позволяет не только фиксировать дополнительные потери в зависимости от качества электроэнергии, но и определить потери от некачественной электроэнергии и фиксировать фактор близости показателей качества к предельно допустимым значениям и, соответственно, планировать заранее мероприятия по предотвращению ухудшения качества электроэнергии.

Литература

1. Карташев, И. И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения [Текст] / И. И. Карташев; под ред. М. А. Калугиной. – М.: Издательство МЭИ, 2000. – 120 с.
2. Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов [Текст] / Ю. С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
3. Семичевский, П. И. Методика расчета дополнительных потерь активной мощности и электроэнергии в элементах систем электроснабжения промышленных предприятий, обусловленные высшими гармониками [Текст]: Дис. канд. тех. наук / П. И. Семичевский. – М., 1978. – 206 с.

4. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий [Текст] / И. В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 186 с.
5. Шидловский, А. К. Повышение качества энергии в электрических сетях [Текст] / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. – Киев: Наук. думка, 1985. – 268 с.
6. Железко, Ю. С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов [Текст] / Ю. С. Железко. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.
7. Попов, В. А. Теория нечетких множеств и задачи управления развитием и функционированием электроэнергетических систем [Текст] / В. А. Попов, П. Я. Экель // Техн. кибернетика: изв. АН СССР. – 1986. – № 4. – С. 143–151.
8. Wang, H.-F. Insight of a fuzzy regression model [Text] / H.-F. Wang, R.-C. Tsaur // Fuzzy Sets and Systems. – 2000. – Vol. 112, Issue 3. – P. 355–369. doi: /10.1016/s0165-0114(97)00375-8.
9. Кофман, А. Введение в теорию нечетких множеств [Текст] / А. Кофман. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.
10. Buckley, J. J. Linear and non-linear fuzzy regression: Evolutionary algorithm solutions [Text] / J. J. Buckley, T. Feuring // Fuzzy Sets and Systems. – 2000. – Vol. 112, Issue 3. – P. 381–394. doi: 10.1016/s0165-0114(98)00154-7
11. Дёмин, Д. А. Нечеткая кластеризация в задаче построение моделей «состав – свойство» по данным пассивного эксперимента в условиях неопределённости [Текст] / Д. А. Дёмин // Проблемы машиностроения. – 2013. – № 6. – С. 15–23.
12. Seraya, O. V. Linear regression analysis of a small sample of fuzzy input data [Text] / O. V. Seraya, D. A. Demin // Journal of Automation and Information Sciences. – 2012. – Vol. 44, Issue 7. – P. 34–48. doi: 10.1615/jautomatinfscien.v44.i7.40.
13. Раскин, Л. Г. Нечеткая математика [Текст]: моногр. / Л. Г. Раскин, О. В. Серая. – Харьков: Парус, 2008. – 352 с.
14. Лежнюк, П. Д. Застосування парето-оптимальності α -рівня для розв'язування задач енергетики з нечіткими параметрами [Текст] / П. Д. Лежнюк, О. О. Рубаненко // Вісник КДПУ. – 2006. – № 4(39). – С. 144–146.
15. Горбійчук, М. І. Спосіб відбору критеріїв оптимальності при адаптивному управлінні процесом буріння [Текст] / М. І. Горбійчук // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Технічна кібернетика та електрифікація об'єктів паливно-енергетичного комплексу. – 1997. – Вип. 34 (5). – С. 18–23.
16. Суздаль, В. С. Оптимизация задачи синтеза управления для процессов кристаллизации [Текст] / В. С. Суздаль // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Т. 6, № 3(54). – С. 41–44. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/2247/2051>.
17. Дилигенский, Н. В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология [Текст] / Н. В. Дилигенский, Л. Г. Дымова, П. В. Севастьянов. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 397 с.
18. Roffel, B. Fuzzy control of a polymerization reactor [Text] / B. Roffel, P. F. Chin // Hydrocarbon Processing. – 1991. – Vol. 6. – P. 47–50.
19. Данилова, Н. В. Применение метода нечетких s -средних для построения функций принадлежности параметров технологического процесса [Текст] : Сб. научн. тр. семинара / Н. В. Данилова // Инновационные технологии, моделирование и автоматизация в металлургии. – Санкт-Петербург, 2010. – С. 11–12.
20. Труфанов, И. Д. Математическое моделирование и опытно-экспериментальное исследование энергоэффективности электротехнологического комплекса мощной дуговой сталеплавильной печи [Текст] / И. Д. Труфанов, К. И. Чумаков, А. И. Лютый // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – Т. 4, № 1 (28). – С. 64–69.
21. Труфанов, И. Д. Энергосберегающее управление электротехнологическим комплексом как база повышения энергоэффективности металлургии стали [Текст] / И. Д. Труфанов, В. П. Метельский, К. И. Чумаков, О. Ю. Лозинский, Я. С. Паранчук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – Т. 6, № 1 (36). – С. 22–29.
22. Tymchuk, S. A. Quality assessment of power in distribution networks 0.38/0.22 kV in the fuzzy form [Text] : Materials of the II inter. scien. conf. / S. A. Tymchuk, A. A. Miroshnyk // Global Science and Innovation. – Chicago, USA. – 2014. – Vol. II. – P. 288–299.
23. Кузнецов, В. Г. Электромагнитная совместимость: несимметрия и несинусоидальность напряжения [Текст] / В. Г. Кузнецов, Э. Г. Куринный, А. П. Лютый. – Донецк: «Донбасс», 2005. – 249 с.
24. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109–97 [Text] / М.: Госстандарт РФ, 1997. – 33 с.