

УДК 621.316.1.024

С.А. Тимчук, канд. техн. наук

А.А. Мирошник, канд. техн. наук

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенка, г. Харьков, Украина

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В СИЛОВЫХ
ТРАНСФОРМАТОРАХ 10/0,4 КВ В НЕЧЕТКОЙ ФОРМЕ**

Рассмотрена возможность представления потерь электрической энергии в трансформаторе в нечеткой форме с учетом вида нагрузки. Получены коэффициенты регрессии и построена нечеткая регрессионная зависимость мощности потерь в трансформаторе от номинальной мощности трансформатора.

Ключевые слова: потери электрической энергии, силовой трансформатор, нечеткие множества.

Розглянуто можливість представлення втрат електричної енергії в трансформаторі в нечіткій формі з урахуванням виду навантаження. Отримані коефіцієнти регресії і побудована нечітка регресійна залежність потужності втрат в трансформаторі від номінальної потужності трансформатора.

Ключові слова: втрати електричної енергії, силовий трансформатор, нечіткі множини.

The opportunity of representation of electric power losses in the transformer in the fuzzy form for the type of load. The coefficients of the regression and built Fuzzy dependence of the power loss in the transformer of the rated power of the transformer.

Key words: loss of power, the power transformer, fuzzy sets.

Постановка проблемы. На современном этапе развития электроэнергетики Украины остро стоит задача радикального повышения эффективности процессов производства и транспортировки электроэнергии, что напрямую связано со снижением потерь и затрат различной природы в электросетях вообще и в силовых трансформаторах в частности. Наиболее радикально проблему снижения потерь и затрат в сетях электроснабжения можно решить при их проектировании и реконструкции, минимизировав таким образом сложность задач, решаемых при их эксплуатации.

Одной из ключевых, но в то же время и наименее изученной для объектов энергетики является проблема разрешения неопределенности информации. Несмотря на сравнительно большой опыт и научные исследования в этой области, принятие решений в процессе проектирования и реконструкции сетей электроснабжения в условиях неопределенности и неполноты исходной информации осуществляется все же при дефиците современных, всесторонне обоснованных рекомендаций и методик.

Анализ последних исследований и публикаций. На современном этапе математически корректно можно описывать неопределенность двух типов: случайность и нечеткость [1]. Неопределенность типа случайности целесообразно применять к процессам, связанным с ожиданием появления событий, последствия которых нам неизвестны. А нечеткость связана с проблемой неоднозначного решения последствий событий, которые уже состоялись.

При проектировании и реконструкции электросетей для оценки потерь мощности в силовых трансформаторах используются интегральные показатели за достаточно большие промежутки времени. Поэтому применение стохастических моделей в данном случае не является корректным. Традиционно применяемые детерминированные математические модели вносят существенные упрощения и порождают проблему точности, которую для достаточно сложных систем определить весьма затруднительно и которая часто в сложных случаях игнорируется.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. Поэтому представляется перспективным применение нечеткого подхода, который является более общим, чем детерминированный, автоматически решает проблему точности и может использовать наработки, полученные в рамках детерминированного подхода.

Целью данной статьи является разработка нечеткой математической модели потерь мощности в силовых трансформаторах с использованием детерминированного подхода.

Изложение основного материала. Теория нечетких множеств [1] предоставляет широкий спектр возможностей для раскрытия неопределенности в нечеткой форме.

Однако для сохранения преемственности исходная для модели потерь мощности в силовых трансформаторах информация должна быть в форме, удобной для использования в рамках детерминированного подхода.

Поскольку исходные данные для модели фигурируют в численной форме, то естественным является представление данной информации в виде частного случая нечетких множеств – в виде нечетких чисел. С вычислительной точки зрения удобно использовать нечеткие числа в форме аналитической аппроксимации с помощью так называемых (*L-R*)-функций, а точнее – в наиболее применяемой форме треугольных нечетких чисел.

Треугольное нечеткое число удобно представить в виде кортежа из трех чисел: $A_{\Delta} = \langle a, \alpha, \beta \rangle_{\Delta}$, где a – модальное значение треугольного нечеткого числа; α и β – левый и правый коэффициенты нечеткости.

При этом параметры треугольного нечеткого числа A_{Δ} , однозначным образом связаны с параметрами треугольной функции принадлежности $\mu_{\Delta} = f_{\Delta}(x; x_m, x_{\min}, x_{\max})$. А именно, $a = x_m$, $\alpha = x_m - x_{\min}$, $\beta = x_{\max} - x_m$.

Таким образом, для представления потерь мощности в силовых трансформаторах в виде треугольного нечеткого числа, необходимо определить границы носителя нечеткого множества и модальное значение.

Воспользуемся наработками детерминированного подхода [2].

Исходными являются паспортные данные по потерям мощности в силовых трансформаторах – это потери холостого хода $\Delta P_{x.x.}$, называемые также потерями в стали, и потери в режиме короткого замыкания $\Delta P_{к.з.}$. Указанные величины зависят от номинальной мощности и конструктивных особенностей трансформатора.

В [3] показано, что при отклонении величины напряжения на зажимах трансформатора от номинального значения изменяется индукция в стали магнитопровода, а поскольку потери в стали трансформатора зависят от индукции, их величина уже не будет соответствовать паспортным данным.

По данным экспериментальных исследований [3] потери в стали трансформатора связаны с индукцией эмпирической зависимостью

$$\Delta P_c \approx B^m f^n, \quad (1)$$

где $m = 3$ при значениях индукции $B = 1,5 \dots 1,8$ Тл для трансформаторов рассматриваемых мощностей.

В то же время индукция в стали трансформатора изменяется прямо пропорционально напряжению. Можно задаться отклонением напряжения на зажимах трансформатора в пределах $\pm 5\%$ от номинального значения, что является пределами регулирования напряжения для трансформаторов с ПБВ. То есть, целесообразно рассматривать изменение индукции в пределах $\pm 5\%$. Тогда потери в магнитопроводе могут быть представлены следующим треугольным нечетким числом

$$\begin{aligned} \Delta P'_{x.x.} &= \langle \Delta P_{x.x.}; \Delta P_{x.x.} - \Delta P_{x.x.\min}; \Delta P_{x.x.\max} - \Delta P_{x.x.} \rangle = \\ &= \langle \Delta P_{x.x.}; (1-0,95^3) \Delta P_{x.x.}; (1,05^3-1) \Delta P_{x.x.} \rangle = \\ &= \langle \Delta P_{x.x.}; 0,14 \Delta P_{x.x.}; 0,16 \Delta P_{x.x.} \rangle. \end{aligned} \quad (2)$$

Для расчета потерь мощности в трансформаторах целесообразно воспользоваться детерминированной методикой [4] определения годовых потерь энергии в трансформаторе

$$\Delta A = \Delta P_{x.x.} \cdot 8760 + \Delta P_{к.з.} k_3^2 \tau, \quad (3)$$

где τ – число часов потерь [4].

Отсюда

$$\Delta P = \Delta P_{к.з.} k_3^2 \frac{\tau}{8760} + \Delta P_{x.x.} \quad (4)$$

Число часов потерь мощности в трансформаторе можно оценить в зависимости от характера нагрузки потребителей сети. Известно, что для ТП 10/0,4 кВ величина τ изменяется в широких пределах:

- $\tau = 1100$ ч для коммунально-бытовой нагрузки;
- $\tau = 1500$ ч для производственной нагрузки;
- $\tau = 1800$ ч для смешанной с преобладанием производственной нагрузки;
- $\tau = 1400$ ч для смешанной с преобладанием коммунально-бытовой нагрузки.

При этом следует учитывать, что $\tau_{\min} = 0$; $\tau_{\max} = 8760$, а, следовательно, число часов потерь мощности можно представить нечетким числом вида

$$\tau' = \langle \tau, \tau, 8760 - \tau \rangle. \quad (5)$$

Коэффициент загрузки k_3 трансформатора представляет собой отношение расчетного значения тока нагрузок к номинальному току трансформатора.

Для оценки среднего значения потерь мощности величину коэффициента загрузки силового трансформатора на стадии проектирования можно принять $k_3 = 1$. При расчете потерь в режиме максимальных нагрузок задаются рекомендуемым для данной климатической зоны значением коэффициента допустимых перегрузок трансформатора $k_{зmax} = k_\delta$. Например, на территории Украины значение коэффициента допустимых перегрузок принимается $k_\delta = 1,4$ [4]. Кроме того, при низких температурах в зимний период вследствие улучшения процесса охлаждения коэффициент допустимых перегрузок трансформатора может быть увеличен.

Таким образом, значение коэффициента загрузки можно представить в виде треугольного нечеткого числа

$$k_3 = \langle 1; 1; 0,4 \rangle. \quad (6)$$

Подставив (2), (5), (6) в (4), получим выражение для определения потерь мощности в силовых трансформаторах в нечеткой форме

$$\begin{aligned} \Delta P' &= \langle \Delta P_m; \Delta P_m - 0,86\Delta P_{x.x.}; 1,96\Delta P_{к.з.} + 1,16\Delta P_{x.x.} - \Delta P_m \rangle = \\ &= \langle \Delta P_{к.з.} \frac{\tau}{8760} + \Delta P_{x.x.}; \Delta P_{к.з.} \frac{\tau}{8760} + 0,14\Delta P_{x.x.}; \\ &(1,96 - \frac{\tau}{8760})\Delta P_{к.з.} + 0,16\Delta P_{x.x.} \rangle. \end{aligned} \quad (7)$$

Результаты расчетов с использованием выражения (7) приведены в табл. Здесь ΔP_{m1} - ΔP_{m4} – модальные значения нечетких значений потерь мощности в силовых трансформаторах соответственно для коммунально-бытовой нагрузки, производственной нагрузки, смешанной с преобладанием производственной нагрузки, смешанной с преобладанием коммунально-бытовой нагрузки.

Для решения задач анализа эффективности работы силовых трансформаторов в конкретных условиях удобнее использовать не табличное, а аналитическое представление зависимости потерь мощности от номинальной мощности трансформатора. Для этого воспользуемся методикой нечеткого регрессионного анализа, приведенной в [2].

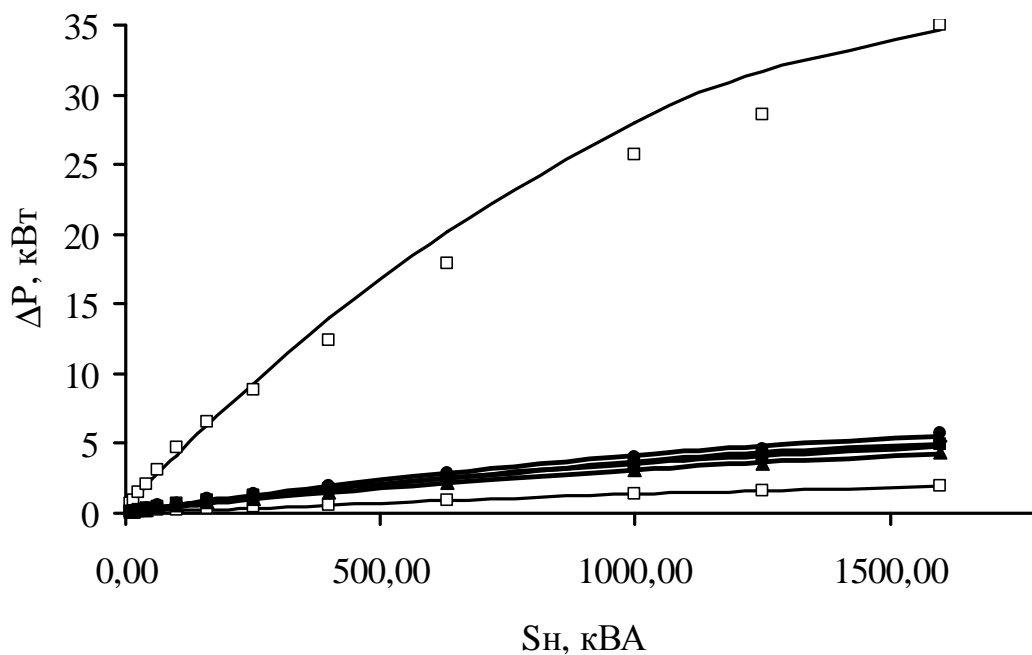
В результате получена нечеткая регрессионная зависимость (8) мощности потерь от мощности трансформатора (рис.).

$$\Delta P' = \alpha \cdot S_n^2 + \beta S_n + \gamma \quad (8)$$

Таблица

Паспортные данные и расчетные значения минимальных, максимальных и модальных значений потерь мощности в силовых трансформаторах 10/0,4 кВ

Номинал. мощн. трансф. S_n , кВА	$\Delta P_{x.x.}$, кВт	$\Delta P_{к.з.}$, кВт	ΔP_{min} , кВт	ΔP_{max} , кВт	ΔP_{m1} , кВт	ΔP_{m2} , кВт	ΔP_{m3} , кВт	ΔP_{m4} , кВт
10	0,075	0,3	0,06	0,67	0,11	0,13	0,14	0,12
16	0,08	0,43	0,07	0,94	0,13	0,15	0,17	0,15
25	0,09	0,69	0,08	1,46	0,18	0,21	0,23	0,20
40	0,14	1	0,12	2,12	0,27	0,31	0,35	0,30
63	0,22	1,47	0,19	3,14	0,40	0,47	0,52	0,45
100	0,27	2,27	0,23	4,76	0,56	0,66	0,74	0,63
160	0,41	3,1	0,35	6,55	0,80	0,94	1,05	0,91
250	0,56	4,2	0,48	8,88	1,09	1,28	1,42	1,23
400	0,73	5,9	0,63	12,41	1,47	1,74	1,94	1,67
630	1,1	8,5	0,94	17,93	2,17	2,56	2,85	2,46
1000	1,55	12,2	1,33	25,71	3,08	3,64	4,06	3,50
1250	1,85	13,5	1,59	28,60	3,55	4,16	4,62	4,01
1600	2,3	16,5	1,97	35,00	4,37	5,13	5,69	4,94



- P_{min}
- P_{max}
- Регрессия
- ◆ Производственная
- Смешанная с преобладанием производственной
- Смешанная с преобладанием коммунально-бытовой
- ▲ Коммунально-бытовая

Рис. Нечеткая регрессионная зависимость мощности потерь в трансформаторе от мощности трансформатора

Значения нечетких коэффициентов регрессии для коммунально-бытовой нагрузки $\alpha = \langle -1,42292\text{E-}07, -7,2213\text{E-}07, -1,023\text{E-}05 \rangle$, $\beta = \langle 0,0014, 0,0038, 0,0377 \rangle$, $\gamma = \langle 0,0457, 0,0897, 0,4966 \rangle$; для производственной нагрузки $\alpha = \langle -1,42292\text{E-}07; -8,8014\text{E-}07; -1,023\text{E-}05 \rangle$; $\beta = \langle 0,0014; 0,0045; 0,0377 \rangle$; $\gamma = \langle 0,0457; 0,0993; 0,4966 \rangle$; для смешанной с преобладанием производственной нагрузки $\alpha = \langle -1,42292\text{E-}07; -1,0179\text{E-}06; -1,023\text{E-}05 \rangle$; $\beta = \langle 0,0014; 0,0050; 0,0377 \rangle$; $\gamma = \langle 0,0457; 0,1064; 0,4966 \rangle$; для смешанной с преобладанием коммунально-бытовой нагрузки $\alpha = \langle -1,42292\text{E-}07; -8,5473\text{E-}07; -1,023\text{E-}05 \rangle$; $\beta = \langle 0,0014; 0,0043; 0,0377 \rangle$; $\gamma = \langle 0,0457; 0,0969; 0,4966 \rangle$.

Вывод. Таким образом, разработанные нечеткие зависимости позволяют рассчитать потери мощности в силовых трансформаторах на ранних стадиях проектирования при отсутствии конкретных характеристик потерь, могут использоваться в общих для сети оптимизационных расчетах, используют и обобщают разработанные ранее детерминированные математические модели.

Список использованных источников

1. *Zadeh L. A.* Fuzzy sets / Lotfy Zadeh // Information and Control, 1965. – Vol. 8. – P. 338-353.
2. *Тимчук С. А.* Получение регрессионных зависимостей для данных, представленных в виде треугольных нечетких чисел / С. А. Тимчук // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-25 : сб. трудов XXV Междунар. науч. конф. : в 10 т. Секция 6, 7, 13. – Волгоград : Волгogr. гос. техн. ун-т, 2012; Харьков : Нац. техн. ун-т «ХПИ», 2012. – Т. 4. – С. 25-26.
3. *Оцінка втрат неробочого ходу в трансформаторах з регулюванням під напругою* / О. В. Мірошник, О. О. Мірошник, В. Г. Пазій, О. А. Котляр // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Харків : ХНТУСГ, 2010. – Вип. 101. – С. 28-30.
4. *Будзко И. А.* Электроснабжение сельского хозяйства / И. А. Будзко, Н. М. Зуль. – М. : Агропромиздат, 1990. – 446 с.