



## ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

### Математическое представление электрических нагрузок промышленных предприятий в задаче определения потерь электроэнергии с использованием аппарата теории нечетких множеств

Малафеев А. В., канд. техн. наук, Антоненко А. А., инж.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова

Рассмотрен способ представления электрических нагрузок в виде нечетких интервалов, позволяющий учесть неопределенность информации о законе распределения для отдельных присоединений в сетях напряжением 3 – 10 кВ промышленных предприятий. Выполнен анализ графиков нагрузок на соответствие нормальному закону распределения для основных цехов ОАО “ММК”. Проведено сравнение систематических погрешностей расчета потерь активной мощности при использовании Z-образной и сигмоидальной функций принадлежности и сделан вывод о их применимости для систем электроснабжения различных цехов комбината.

**Ключевые слова:** система электроснабжения, неопределенность информации, электрические нагрузки, нечеткий интервал, функция принадлежности, потери активной мощности, систематическая погрешность.

Прогнозирование потерь электроэнергии в системах электроснабжения в соответствии с большинством методик осуществляется с учетом их вероятностных характеристик. При известном оперативном состоянии схемы эти показатели в первую очередь определяются вероятностными характеристиками электрических нагрузок. Если нагрузки узловых подстанций, питающих промышленное предприятие, во многих случаях можно считать подчиняющимися нормальному закону распределения, то у нагрузок главных понизительных и распределительных подстанций законы распределения практически всегда отличаются от нормального, что делает некорректным использование доверительных интервалов. Анализ законов распределения нагрузки по каждому фидеру 3 – 10 кВ затруднителен вследствие чрезвычайно больших объемов информации. В связи с этим возникает вопрос о математическом представлении нагрузки как неопределенной величины, что удобнее всего реализовать на основе аппарата теории нечетких множеств.

Рассмотрим его применение на примере системы электроснабжения ОАО “Магнитогорский металлургический комбинат”, который наряду с основным производством осуществляет функции сетевой организации,

покупающей электроэнергию на розничном рынке. Технологический процесс цехов комбината различен, что обуславливает и разнородный характер графиков электрических нагрузок. Расчеты установившихся режимов и потерь активной мощности выполняли с помощью программного комплекса КАТРАН 6.0, разработанного в МГТУ им. Г. И. Носова [1]. Используемый в нем алгоритм расчета установившегося режима основан на модифицированном методе последовательного эквивалентирования, подробно рассмотренном в [2].

Проанализируем соответствие графиков нагрузки нормальному закону распределения. Анализ проводили с помощью программных пакетов Matlab R2009b (Statistics Toolboxes) и STATISTICA 7.0, использующих критерии Шапиро – Уилка, Колмогорова – Смирнова и Лиллиефорса. Графики нагрузок предоставляла центральная электротехническая лаборатория ОАО “ММК”. Расчеты выполняли для графиков нагрузок: доменного и коксового цехов, цеха улавливания и переработки химических продуктов, имеющих спокойную нагрузку; листопрокатных цехов ЛПЦ-5 и ЛПЦ-8 с резкопеременной нагрузкой; листопрокатного ЛПЦ-10 и сортового цехов горячей прокатки, также имеющих резкоперемен-

Таблица 1

Фидер	Критерий Колмогорова – Смирнова	Критерий Лиллиефорса	Критерий Шапиро – Уилка (уровень значимости – 5 %)	Соответствие нормальному закону распределения
2-31	1	1	0,782	Нормальность отклонена
2-34	1	1	0,635	То же
2-48	1	1	0,698	–”–
2-02	1	1	0,694	–”–
2-03	1	1	0,521	–”–
2-05	1	1	0,793	–”–
2-57	1	1	0,603	–”–
2-58	1	1	0,866	–”–
2-07	1	1	0,821	–”–
2-12	1	1	0,708	–”–

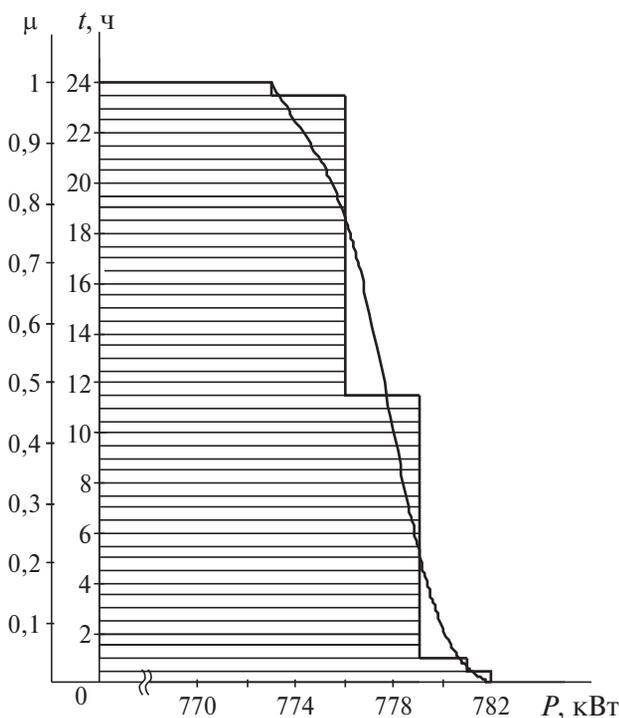


Рис. 1. Совмещенные упорядоченный график Z-образной функции принадлежности и график нагрузки фидера 2-31 ПС-2

ную нагрузку. В табл. 1 приведены критерии нормальности нагрузок фидеров, полученные применительно к подстанции ПС-2 10/3 кВ доменного цеха, на основе которых сделан

вывод о их несоответствии нормальному закону.

Для других рассмотренных цехов получены аналогичные результаты, что позволяет сделать вывод о целесообразности применения теории нечетких множеств [3]. Представим график нагрузки в виде нечеткого интервала с носителем  $[0, P_{max}]$  и ядром  $[0, P_{min}]$  (применительно к графикам активной нагрузки), для чего приведем имеющиеся графики к упорядоченной форме.

Упорядоченные графики нагрузки рассматриваемых цехов визуально более всего схожи с Z-образной и сигмоидальной функциями принадлежности. Пример для Z-образной функции показан на рис. 1. В данном случае Z-образная функция может быть задана аналитически в виде выражения

$$\mu_Z(P_i, P_{min}, P_{max}) = \begin{cases} 1, & P_i \leq P_{min} \\ 1 - 2 \left( \frac{P_i - P_{min}}{P_{max} - P_{min}} \right)^2, & P_{min} < P_i \leq \frac{P_{min} + P_{max}}{2} \\ 2 \left( \frac{P_{max} - P_i}{P_{max} - P_{min}} \right)^2, & \frac{P_{min} + P_{max}}{2} < P_i < P_{max} \\ 0, & P_{max} \leq P_i, \end{cases} \quad (1)$$

где  $P_i$  — текущее значение нагрузки.

Для уровня значимости  $(1 - \mu_Z)$  нагрузку можно определять с использованием функции принадлежности на основе двух значений (максимального и минимального) следующим образом:

$$P^* = P_{min} + (P_{max} - P_{min})\mu(P_i). \quad (2)$$

Полученные значения Z-образной функции принадлежности  $\mu$  и расчетные значения нагрузки  $P^*$  фидера 2-31 ПС-2 ОАО “ММК” приведены в табл. 2.

С целью оценки применимости предложенного способа задания электрических нагрузок выполнили расчеты потерь активной мощности в системах электроснабжения рассматриваемых цехов для замеренных значений нагрузки и для значений, рассчитанных на основе формулы (2). По полученным значениям определили систематическую погрешность предложенного способа как их разность. Результаты расчета потерь и погрешности в графической форме показаны на рис. 2. Как видно, для доменного цеха наибольшая погрешность расчета потерь активной мощности, наблюдаемая на уровне значимости 0,1,

Таблица 2

Временные интервалы	$P$ , кВт	$\mu$	$P^*$ , кВт	Временные интервалы	$P$ , кВт	$\mu$	$P^*$ , кВт
00:00	781	0,025	781,8	12:00	776	0,778	775
01:00	779	0,222	780	13:00	776	0,778	775
02:00	779	0,222	780	14:00	776	0,778	775
03:00	779	0,222	780	15:00	776	0,778	775
04:00	779	0,222	780	16:00	776	0,778	775
05:00	779	0,222	780	17:00	776	0,778	775
06:00	779	0,222	780	18:00	776	0,778	775
07:00	779	0,222	780	19:00	776	0,778	775
08:00	779	0,222	780	20:00	776	0,778	775
09:00	779	0,222	780	21:00	776	0,778	775
10:00	779	0,222	780	22:00	776	0,778	775
11:00	776	0,778	775	23:00	773	1,000	773

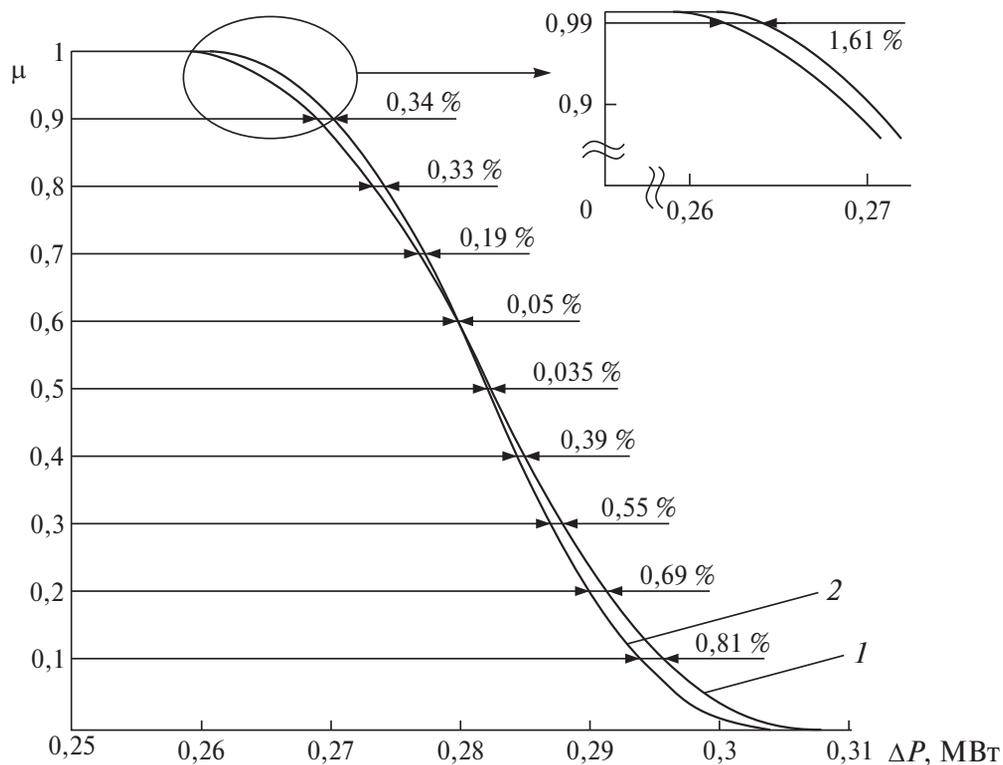


Рис. 2. Кривые  $\mu(\Delta P)$  погрешности расчета потерь активной мощности в системе электроснабжения доменного цеха при задании графиков нагрузки с использованием Z-образной функции принадлежности:

1 и 2 — при задании графиков нагрузки соответственно экспериментальными значениями и как нечетких интервалов

составляет 1,61 %, что является приемлемым значением.

Аналогичные расчеты выполнены и для остальных цехов. Полученные значения по-

Таблица 3

Цеха	Наибольшая погрешность расчета потерь мощности, %		Уровень значимости, соответствующий наибольшей погрешности	
	Z-образная функция принадлежности	Сигмоидальная функция принадлежности	Z-образная функция принадлежности	Сигмоидальная функция принадлежности
Спокойная нагрузка				
Доменный цех	1,61	13,1	0,1	0,1
Коксовый цех	1,575	1,48	0,1	0,1
Цех улавливания и переработки химических продуктов	9,39	12,442	0,1	0,4
Резкопеременная нагрузка				
Сортовой цех	11,495	13,37	0,1	0,1
ЛПЦ-5	1,81	10,97	0,9	0,9
ЛПЦ-8	1,651	1,68	0,1	0,3
ЛПЦ-10	16,584	16,59	0,9	0,6

Таблица 4

Временные интервалы	$P$ , кВт	$\mu_{\sigma}$	$P^*$ , кВт	Временные интервалы	$P$ , кВт	$\mu_{\sigma}$	$P^*$ , кВт
0:00	776	0,00	776,00	12:00	779	0,50	779,00
1:00	776	0,00	776,00	13:00	779	0,50	779,00
2:00	776	0,00	776,00	14:00	779	0,50	779,00
3:00	776	0,00	776,00	15:00	779	0,50	779,00
4:00	776	0,00	776,00	16:00	779	0,50	779,00
5:00	776	0,00	776,00	17:00	779	0,50	779,00
6:00	776	0,00	776,00	18:00	779	0,50	779,00
7:00	776	0,00	776,00	19:00	779	0,50	779,00
8:00	776	0,00	776,00	20:00	779	0,50	779,00
9:00	776	0,00	776,00	21:00	779	0,50	779,00
10:00	776	0,00	776,00	22:00	779	0,50	779,00
11:00	779	0,50	779,00	23:00	782	1,00	782,00

погрешностей сведены в табл. 3, из которой следует, что для доменного, коксового цехов, ЛПЦ-5 и ЛПЦ-8 погрешность не превышает 2 %, в то время как для остальных цехов она довольно велика.

Выполнен аналогичный анализ для сигмоидальной функции принадлежности. Эта

функция задается в виде аналитического выражения

$$\mu_{\sigma}(P_i; P_{min}, P_{max}) = \frac{1}{1 + e^{-P_{min}(P_i - P_{max})}} \quad (3)$$

Значения сигмоидальной функции принадлежности и расчетные значения нагрузки

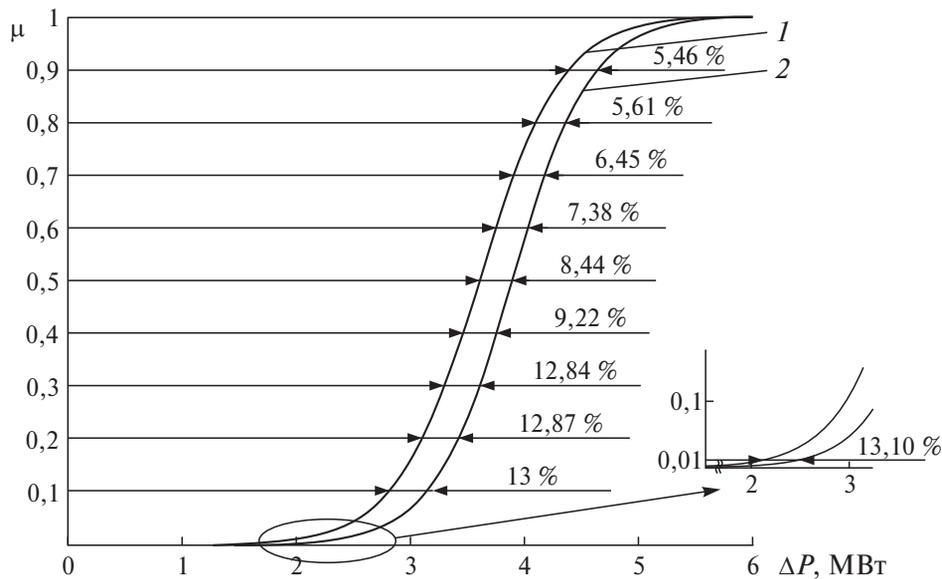


Рис. 3. Кривые  $\mu(\Delta P)$  погрешности расчета потерь активной мощности в системе электроснабжения доменного цеха при задании графиков нагрузки с использованием сигмоидальной функции принадлежности:

1 и 2 — при задании графиков нагрузки соответственно экспериментальными значениями и как нечетких интервалов

$P^*$  фидера 2-31 ПС-2 ОАО “ММК” приведены в табл. 4.

Значения систематической погрешности расчета потерь активной мощности для доменного цеха с использованием сигмоидальной функции показаны на рис. 3. В данном случае наибольшая погрешность составляет 13,1 %.

Наибольшие значения погрешностей для рассматриваемых цехов при использовании сигмоидальной функции приведены в табл. 3. Из нее видно, что наименьшая погрешность при расчете разброса значений потерь активной мощности для доменного, сортового цехов, ЛПЦ-5 и ЛПЦ-10 в соответствии с суточным изменением нагрузки наблюдается при использовании Z-образной функции принадлежности. Соответствующие наименьшие значения для коксового цеха, цеха улавливания и ЛПЦ-8 можно получить при использовании сигмоидальной функции принадлежности.

### Выводы

1. Анализ графиков электрических нагрузок на уровне напряжения 3 – 10 кВ в условиях ОАО “ММК” показал, что их вероятностные характеристики в большинстве случаев не соответствуют нормальному закону распределения. В связи с этим предложено применение аппарата теории нечетких множеств.

2. Для основных цехов ОАО “ММК” выполнено сравнение функций принадлежности, наиболее визуально схожих с их упоря-

доченными графиками нагрузки, — Z-образной и сигмоидальной функций. Сравнение осуществляли по систематической погрешности расчета потерь активной мощности для различных уровней значимости. Как показали расчеты, Z-образная функция принадлежности наиболее применима для учета неопределенности нагрузок доменного, сортового цехов, ЛПЦ-5 и ЛПЦ-10, а сигмоидальная — для коксового цеха, цеха улавливания и переработки химических продуктов и ЛПЦ-8 ОАО “ММК”.

3. Предложенный способ представления графиков электрических нагрузок в виде нечетких интервалов может использоваться для учета неопределенности информации о нагрузках при планировании режимов с учетом потерь активной мощности в сетях 3 – 10 кВ. При этом необходим анализ графиков нагрузки конкретного объекта.

### Список литературы

1. А.с. 2012612069 РФ. Программа “Комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 6.0” / В. А. Игуменшев, А. В. Малафеев, О. В. Буланова и др. — Оpubл. в бюл. “Программы для ЭВМ, БД, ТИМС”, 2012, № 2.
2. Модифицированный метод последовательного эквивалентирования для расчета режимов сложных систем электроснабжения / В. А. Игуменшев, Б. И. Заславец, А. В. Малафеев и др. — Промышленная энергетика, 2008, № 6.
3. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. — М.: Мир, 1976.