

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО УЗЛА НАГРУЗКИ С ПОМОЩЬЮ НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ

На сегодняшний день в условиях формирования новых отношений между субъектами электроэнергетического рынка, в условиях физического износа электрооборудования энергосистем и промышленных предприятий остро стоит проблема надежности функционирования промышленных предприятий с непрерывными технологическими процессами, такими как доменное производство, сталеплавильные печи, непрерывные прокатные станы, цветная металлургия, электролизная промышленность и т.п.[1-4].

Для промышленных предприятий с непрерывными технологическими процессами важным условием надежного и бесперебойного функционирования электрического оборудования является устойчивая работа промышленной системы электроснабжения, основными элементами которой являются узлы нагрузки с асинхронными двигателями (АД). Существует ряд исследований и разработок [2-5], направленных на повышение надежной и бесперебойной работы АД промышленных предприятий. В частности, в [2, 4] предлагается установка нового оборудования, требующего больших финансовых затрат. Кроме того, эти разработки не учитывают объективно существующую неполноту и нечеткость исходной информации об энергосистеме, ее элементах и режимах их работы [6]. Таким образом, учет неполноты и нечеткости информации является важным условием как при определении состояния оборудования, так и при принятии решений по управлению энергообъектами, в том числе при обеспечении надежной работы промышленного узла нагрузки.

В работе предлагается метод обеспечения статической устойчивости промышленного узла нагрузки, основанный на нечеткой логике, что позволяет принимать решения при наличии

нечетких предпосылок или условий. При этом допускается субъективность знаний, используемых специалистом, и уменьшение неполноты информации при помощи предпочтений пользователя [7].

Для апробации предложенного метода обеспечения статической устойчивости выбран типовой узел нагрузки, представленный на рис.1, где: Д1, Д2, Д3, Д4 - группа АД, один из которых (Д1) - ответственный по условиям технологического процесса (электропривод мощного насоса технической воды); СН – нелинейная статическая нагрузка; БСК – батарея статических конденсаторов. Питающий трансформатор Т снабжен устройством РПН.

Структурная схема контроллера, реализующего предлагаемый метод обеспечения статической устойчивости узла нагрузки, представлена на рис.2. Входной величиной контроллера является напряжение на шинах, а датчиком – трансформатор напряжения

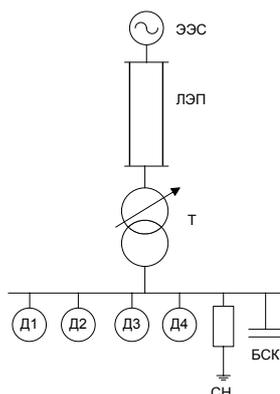


Рис.1. Промышленный узел нагрузки

Здесь четкая входная величина, которой является напряжение, приводится к нечеткости, затем с помощью базы правил проводится операция нечеткого логического вывода, а нечеткая выходная величина приводится к четкости с помощью модели нечеткого вывода Мамдани [8]. Четким выходом является величина управляющего воздействия. Применительно к задаче обеспечения статической устойчивости узла энергосистемы с ответственными АД можно принимать следующие решения:

1. включение БСК;
2. изменение положения РПН трансформатора;
3. отключение менее ответственных потребителей;
4. комбинации вышеперечисленных решений.

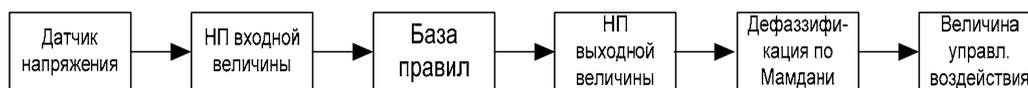


Рис.2. Структурная схема фаззи-контроллера

В качестве лингвистической переменной выбрана величина «напряжение узла нагрузки». Значением этой лингвистической переменной могут быть пять нечетких переменных: критическое снижение напряжения, большое снижение напряжения, малое снижение напряжения, допустимое снижение напряжения, повышение напряжения. Эти нечеткие переменные составляют базовое терм-множество [8].

Существует ряд методов построения функций принадлежности [7, 8, 9, 11]. Однако, учитывая небольшой объем вычислений при обработке в реальном масштабе времени по фаззи-алгоритму, для описания нечетких переменных предлагаются треугольные функции принадлежности (λ -типа) и для дефаззификации метод центра тяжести Мамдани [8].

Рассмотрим способ задания нечетких переменных треугольного типа. Функция принадлежности нечеткой переменной λ -типа в данном случае задается в виде тройки параметров:

$$A = (a, \alpha, \beta), \tag{1}$$

где a - среднее значение нечеткого числа,
 α, β - левый и правый коэффициенты нечеткости, которые определяют область рассуждений $X \in (a - \alpha; a + \beta)$.

Функция принадлежности переменной x множеству X имеет следующий вид:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 - \frac{a-x}{\alpha}; & a - \alpha \leq x \leq a; \\ 1 - \frac{x-a}{\beta}; & a < x \leq a + \beta; \\ 0; & x < a - \alpha, \quad x > a + \beta. \end{cases} \quad (2)$$

Для построения функций принадлежности нечетких переменных воспользуемся нормами качества потребляемой электроэнергии [10] и расчетными данными запаса статической устойчивости ответственного АД в узле нагрузки. Для оценки запаса статической устойчивости было проведено исследование модели асинхронной машины в форме уравнений Парка-Горева, которая имеет одну эквивалентную обмотку на роторе. Исследуемая модель была линеаризована. Для линеаризованной модели было получено ее характеристическое уравнение [12]. Потом был рассчитан ряд установившихся режимов узла нагрузки и ответственного АД (Д1) при различных значениях напряжения в узле нагрузки и при различных режимных состояниях элементов узла нагрузки. Для каждого расчета были определены коэффициенты характеристического уравнения ответственного АД (Д1) и получены его корни, на основании анализа которых определялись параметры нечетких термов входной лингвистической переменной.

1 Допустимое напряжение (ДН)

В соответствии с [10] АД должен работать при напряжении, равном $U_{\text{ном}}$, а предельно допустимое отклонение напряжения составляет $\pm 10\%$. Принимаем в качестве среднего значения нечеткого числа величину номинального напряжения, а в качестве области рассуждения – область предельно допустимых значений в соответствии с [10]. Таким образом:

$$a = 1; \quad \alpha = 0,1; \quad \beta = 0,1.$$

$$\mu_{\text{доп}}(x) = \begin{cases} 1 - \frac{1-U}{0,1}; & 0,9 \leq U \leq 1; \\ 1 - \frac{U-1}{0,1}; & 1 < U \leq 1,1; \\ 0; & U < 0,9, \quad U > 1,1. \end{cases} \quad (3)$$

2 Повышение напряжения (ПН)

В соответствии с [10] под повышением напряжения в узле нагрузки понимается превышение напряжением величины $1,1 U_{\text{ном}}$. Принимаем эту величину в качестве среднего значения нечеткого числа, в качестве левой границы – величину номинального напряжения. Ввиду того, что переменная «повышенное напряжение» является крайней справа и выходит за пределы интервала рассуждений, правая граница равна бесконечности. Таким образом:

$$a = 1,1; \quad \alpha = 0,1; \quad \beta = \infty.$$

$$\mu_{\text{пер}}(U) = \begin{cases} 1 - \frac{1,1-U}{0,1}; & 1,0 \leq U \leq 1,1; \\ 1; & 1,1 < U; \\ 0; & U < 1. \end{cases} \quad (4)$$

3 Снижение напряжения. В соответствии с [10] это снижение напряжения ниже значения $0,9 U_{\text{ном}}$. Поскольку именно при снижении напряжения возникает угроза нарушения устойчивости АД, появляется необходимость определения управляющего воздействия (включение, БСК, регулировка РПН, отключение неответственной нагрузки) и его величины, то данный интервал разбит на три нечетких подинтервала.

3.1 Критическое снижение напряжения (КСН)

Эта нечеткая переменная является крайней справа и ее правая граница области рассуждений равна бесконечности. Средним значением нечеткого числа является значение напряжения, при

котором происходит нарушение устойчивости ответственного АД (для Д1 типа АВ-8000/6000: $U_{\text{наруш}} = 0,62 U_{\text{ном}}$), а правой границей – значение напряжения, при котором запас ответственного двигателя по статической устойчивости снизится на 50% ($U_{50\%} = 0,75 U_{\text{ном}}$). Таким образом:

$$a = 0,62; \alpha = -\infty; \beta = 0,13.$$

$$\mu_{\text{кр.нед}}(U) = \begin{cases} 1; & 0,62 \leq U; \\ 1 - \frac{U - 0,62}{0,13}; & 0,62 < U < 0,75; \\ 0; & U > 0,75. \end{cases} \quad (5)$$

3.2 Большое снижение напряжения (БСН)

Эта нечеткая переменная описывает снижение напряжения от минимально допустимого значения [10] до напряжения, при котором происходит нарушение устойчивости ответственного асинхронного двигателя. Средним значением является значение напряжения, при котором запас статической устойчивости ответственного АД снизится на 50%. Таким образом:

$$a = 0,75; \alpha = 0,13; \beta = 0,15.$$

$$\mu_{\text{бол.нед}}(U) = \begin{cases} 1 - \frac{0,75 - U}{0,13}; & 0,62 \leq U \leq 0,75; \\ 1 - \frac{U - 0,75}{0,15}; & 0,75 < U \leq 0,9; \\ 0; & U < 0,62; U > 0,9. \end{cases} \quad (6)$$

3.3 Малое снижение напряжения (МСН)

Эта нечеткая переменная описывает снижение напряжения от номинального значения до напряжения, при котором запас ответственного АД по статической устойчивости снизится на 50%. Среднее значение равно минимально допустимому значению напряжения [10]. Таким образом:

$$a = 0,9; \alpha = 0,75; \beta = 1.$$

$$\mu_{\text{мал.нед}}(U) = \begin{cases} 1 - \frac{0,9 - U}{0,15}; & 0,75 \leq U \leq 0,9; \\ 1 - \frac{U - 0,9}{0,1}; & 0,9 < U \leq 1,0; \\ 0; & U < 0,75; U > 1. \end{cases} \quad (7)$$

В результате получаем следующие функции принадлежности нечетких входных переменных (рис.3).

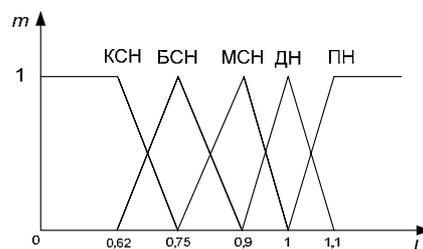


Рис.3. Нечеткие термы входной величины

После приведения входной величины к нечеткости осуществляется процедура нечеткого логического вывода. Основой для проведения нечеткого логического вывода является база правил, содержащая нечеткие высказывания в форме «ЕСЛИ - ТО» и функции принадлежности соответствующих лингвистических термов. При этом соблюдаются следующие условия:

- существует хотя бы одно правило для каждого лингвистического терма выходной переменной;

- для любого термина входной переменной имеется хотя бы одно правило, в котором этот терм используется в качестве предпосылки [12].

Для задачи обеспечения статической устойчивости промышленного узла нагрузки база правил имеет следующий вид (табл. 1).

Таблица 1

База правил принятия решения

ЕСЛИ	ТО
$U=$ «повышение напряжения»	УВ= «Положительное» (П)
$U=$ «допустимое напряжение»	УВ= «Нулевое» (И)
$U=$ «малое снижение напряжения»	УВ= «Отрицательное малое» (ОМ)
$U=$ «большое снижение напряжение»	УВ= «Отрицательное среднее» (ОС)
$U=$ «критическое снижение напряжения»	УВ= «Отрицательное большое» (ОБ)

Выходной величиной фаззи-контроллера является величина управляющего воздействия при отклонении напряжения в узле нагрузки. Выходная лингвистическая переменная описывается нечеткими терминами по типу принимаемых решений и их количеству. Границы нечетких термов определяются по корням характеристического уравнения ответственного асинхронного двигателя Д1 и из условия линейности выходной величины «**принимаемое решение**», что дает возможность определить степень истинности каждой предпосылки каждого правила и принять четкое решение на их основе.

1. Положительное (П):

$$a = 1; \alpha = 0,25.$$

$$\mu_{\text{П}}(D) = \begin{cases} 1 - \frac{1-D}{0,25}; & 0,75 \leq D \leq 1; \\ 0; & D < 0,75; D > 1,1; \end{cases} \quad (10)$$

2. Нулевое (И):

$$a = 0,75; \alpha = 0,25; \beta = 0,25.$$

$$\mu_{\text{И}}(D) = \begin{cases} 1 - \frac{0,75-D}{0,25}; & 0,5 \leq D \leq 0,75; \\ 1 - \frac{D-0,75}{0,25}; & 0,75 < D \leq 1; \\ 0; & D < 0,5, D > 1. \end{cases} \quad (11)$$

3. Отрицательное малое (ОМ):

$$a = 0,5; \alpha = 0,25; \beta = 0,25.$$

$$\mu_{\text{ОМ}}(D) = \begin{cases} 1 - \frac{0,5-D}{0,25}; & 0,25 \leq D \leq 0,5; \\ 1 - \frac{D-0,5}{0,25}; & 0,5 < D \leq 0,75; \\ 0; & D < 0,25, D > 0,75. \end{cases} \quad (12)$$

4. Отрицательное среднее (ОС):

$$a = 0,25; \alpha = 0,25; \beta = 0,25.$$

$$\mu_{\text{ОС}}(D) = \begin{cases} 1 - \frac{0,25-D}{0,25}; & 0 \leq D \leq 0,25; \\ 1 - \frac{D-0,25}{0,25}; & 0,25 < D \leq 0,5; \\ 0; & D < 0, D > 0,5. \end{cases} \quad (13)$$

5. Отрицательное большое (ОБ):

$$a = 0; \beta = 0,25.$$

$$\mu_{\text{об}}(D) = \begin{cases} 1 - \frac{D}{0,25}; & 0 \leq D \leq 0,25; \\ 0; & D < 0, D > 0,25. \end{cases} \quad (14)$$

Функции принадлежности нечетких выходных переменных, определяющих дозировку управляющих воздействий, имеют следующий вид (рис.4).

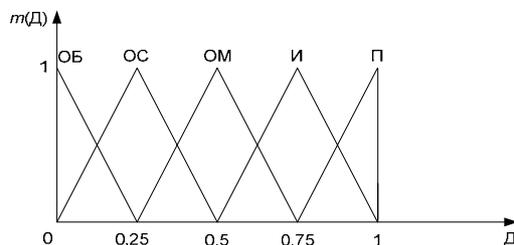


Рис.4. Нечеткие термы выходной величины

Приведение величины управляющего воздействия к четкости осуществляется по методу Мамдани, использующем минимальную композицию нечетких множеств [1]. Дефазификация осуществляется в следующей последовательности:

- 1) определение уровней «отсечения» для левой части каждого из правил;
- 2) определение «усеченных функций принадлежности»;
- 3) объединение полученных усеченных функций с помощью максимальной композиции нечетких множеств;
- 4) приведение к четкости методом среднего центра (центроидный метод):

$$y_c = \frac{\sum_i^M \mu(y_{ci}) y_{ci}}{\sum_i^M \mu(y_{ci})}. \quad (15)$$

Значение полученного центра тяжести y_c определяет управляющее воздействие, принимаемое для обеспечения статической устойчивости узла нагрузки, и его дозировку в соответствии с табл.2.

Таблица 2

Принятие решения и определение величины управляющего воздействия

y_c	Принимаемое решение
0,825-1	Перемещение РПН в положение $+9 \times 1,78$
0,625 – 0,825	Ничего не изменять
0,375 – 0,825	Включение БСК
0,125 – 0,375	Включение БСК и перемещение РПН в положение $-9 \times 1,78$
0 – 0,125	Включение БСК, перемещение РПН в положение $-9 \times 1,78$ и отключение неответственных потребителей

Пример. Рассмотрим работу синтезированного регулятора при возмущении в энергосистеме, в результате которого напряжение в узле нагрузки установилось равным $U_{\text{ост}} = 0,8 U_{\text{ном}}$.

Приведение к нечеткости. В соответствии с лингвистической переменной «напряжение узла нагрузки» величина напряжения $U_{\text{ост}} = 0,8 U_{\text{ном}}$ принадлежит нечеткой переменной «большое снижение напряжения» со степенью принадлежности

$$\mu_{\text{бол.нед}}(U) = 1 - \frac{0,8 - 0,75}{0,15} = 0,667, \quad (16)$$

а нечеткой переменной «малое снижение напряжения» со степенью принадлежности

$$\mu_{\text{мал.нед}}(U) = 1 - \frac{0,9 - 0,8}{0,15} = 0,333. \quad (17)$$

Процедура нечеткого логического вывода. В соответствии с базой правил принятия решений, ЕСЛИ U =«большое снижение напряжения», ТО $УВ$ =«ОС»; ЕСЛИ U =«малое снижение

напряжения», ТО УВ=«ОМ».

Значение нечеткой переменной выхода равно значению соответствующей нечеткой переменной входа.

$$\mu_{\text{мал.неч}}(U) = \mu_{\text{ОМ}}(D) = 0,333; \mu_{\text{бол.неч}}(U) = \mu_{\text{ОС}}(D) = 0,667.$$

В соответствии с функциями принадлежности нечетких величин выхода определим граничные значения областей рассуждения для полученных степеней принадлежности.

для $\mu_{\text{ОМ}}(D) = 0,333$:

$$y_{\text{ОМ1}} = 0,333 = 1 - \frac{0,5 - D}{0,25} \Rightarrow D_{\text{ОМ1}} = 0,333; \quad (18)$$

$$y_{\text{ОМ2}} = 0,333 = 1 - \frac{D - 0,5}{0,25} \Rightarrow D_{\text{ОМ2}} = 0,667. \quad (19)$$

для $\mu_{\text{ОС}}(D) = 0,667$:

$$y_{\text{ОС1}} = 0,667 = 1 - \frac{0,25 - D}{0,25} \Rightarrow D_{\text{ОС1}} = 0,167; \quad (20)$$

$$y_{\text{ОС2}} = 0,667 = 1 - \frac{D - 0,25}{0,25} \Rightarrow D_{\text{ОС2}} = 0,333. \quad (21)$$

Графическая интерпретация процедуры фаззификации и нечеткого логического вывода приведена на рис.5.

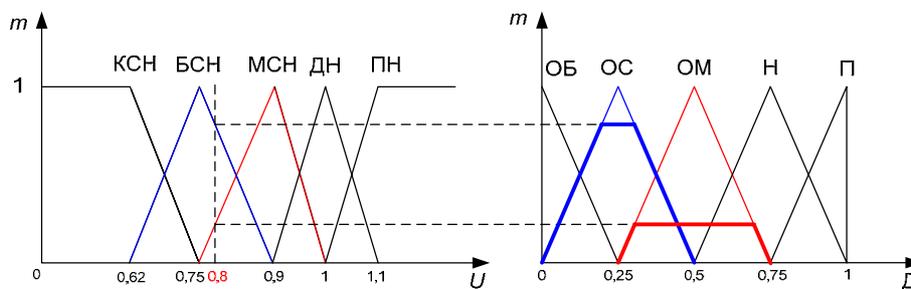


Рис.5. Работа фаззи-контроллера при $U_{\text{ост}} = 0,8 U_{\text{ном}}$

Приведение к четкости по Мамдани:

$$D_{\text{упр}} = \frac{\sum_i \mu(D_{Ci}) D_{Ci}}{\sum_i \mu(D_{Ci})} = \frac{0,333 \times 0,333 + 0,333 \times 0,667 + 0,667 \times 0,167 + 0,667 \times 0,333}{0,667 + 0,667 + 0,333 + 0,333} = 0,333. \quad (22)$$

Полученная величина управляющего воздействия соответствует «включению БСК и перемещению РПН трансформатора в положение $-9 \times 1,78$ » (табл.2).

Проведен расчет установившегося режима сети при этих изменениях в узле нагрузки. В результате получено напряжение $U_{\text{раб}} = 0,96 U_{\text{ном}}$, которое в соответствии с [10] является допустимым рабочим напряжением для ответственного АД.

Выводы

1. Для поддержания статической устойчивости узлов нагрузки с АД в условиях объективно существующей неполноты исходной информации об энергосистеме и ее элементах необходимо применение методов, основанных на нечеткой логике, которые позволяют принимать четкие обоснованные решения при наличии нечетких предпосылок или условий.
2. Применение фаззи-контроллера с входом по напряжению для реализации предложенного метода обеспечения статической устойчивости промышленного узла нагрузки с АД позволяют повысить запас статической устойчивости ответственного АД и надежность его работы.
3. На основании принятых норм качества электроэнергии и расчетных данных запаса статической устойчивости АД, полученных по корням характеристического уравнения ответственного АД, можно произвести оптимальную настройку функций принадлежности нечетких переменных фаззи-контроллера.

Литература

1. Бирюков Е.В., Корнев М.С. Практическая реализация нечеткой нейронной сети при краткосрочном прогнозировании электрической нагрузки. Сборник трудов научной сессии МИФИ, 2005. – С. 207-214.
2. Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Егоров А.В. Исследование новой системы электроснабжения, обеспечивающей повышение устойчивости двигательной нагрузки // Электричество. – 1997 – №8. – С. 19-23.
3. Ершов М.С., Егоров А.В., Федоров В.А. Некоторые вопросы повышения устойчивости электроприводов многомашинного комплекса с непрерывным технологическим процессом при возмущениях в системе электроснабжения // Промышленная энергетика. – 1997 – №5. – С.23-26.
4. Ершов М.С., Егоров А.В. Вопросы повышения устойчивости электрической нагрузки промышленных систем электроснабжения // Промышленная энергетика. – 1994 – №3. – С. 5-8.
5. Гуревич Ю.Е., Файбисович Л.Д., Хвошинский З.Г. Особенности электроснабжения промышленных предприятий с непрерывными технологическими процессами // Электричество. – 1990 – №1. – С. 16-23.
6. Веников В.А., Будзко И.А., Левин М.С. и др. О методах решения многокритериальных оптимизационных задач электроэнергетики с неопределенными величинами // Электричество. – 1987 – №2. – С. 1-7.
7. Сазыкин В.Г. Использование нечетких чисел в задачах электроснабжения // Электричество. – 1995 – №3. – С. 29-33.
8. Архангельский В.И. и др. Системы функции-управления. К.: Техніка, 1997. – 208 с.
9. Домарев В.В. Безопасность информационных технологий. Системный подход – К.:ООО ТИД «Диасофт», 2004. – 318 с.
10. ГОСТ 13109-97 Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения.
11. П.Л.Денисюк, В.В.Чумак, В.В.Литвинов, Г.А. Пархоменко. Модель контроллера управления узлом нагрузки в условиях нечеткой информации. Материалы международной конференции «Высокие технологии энергосбережения», Воронеж, 2007. – С. 154-157.
12. Круглов В.В., Дли М.И., Голупов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 226 с.