

# Применение теории нечеткой логики при обработке информации о техническом состоянии авиационных стартер-генераторов постоянного тока

Лобатый А.А., Шейников А.А., Суходолов Ю.В., Белегов А.Н.  
Кафедра авиационной техники и вооружения, авиационный факультет  
УО «Военная академия Республики Беларусь»  
г. Минск, Республики Беларусь  
e-mail: af.varb@yandex.ru

**Аннотация** – В статье описан алгоритм логического вывода, позволяющий комплексировать диагностическую информацию с целью обеспечения возможности автоматизированной оценки технического состояния авиационных стартер-генераторов постоянного тока.

**Ключевые слова:** авиационный стартер-генератор постоянного тока, оценка технического состояния, спектр сигнала напряжения, нечеткая логика

Несмотря на широкое внедрение в авиационных системах электроснабжения синхронных генераторов нестабильной частоты и статических полупроводниковых преобразователей, в настоящее время продолжают оставаться актуальными задачи обеспечения эксплуатационной надежности стартер-генераторов постоянного тока (СТГ).

Известно, что одним из самых уязвимых элементов СТГ является их щеточно-коллекторный узел [1]. Внешним проявлением неудовлетворительного протекания процесса коммутации служит искрение в скользящем контакте. Проявление нарушений коммутации в искрении традиционно рассматривается как показатель общего состояния машин постоянного тока [1, 2]. Согласно ГОСТ 183–74 степень искрения оценивается визуально (субъективно), что обуславливает неоднозначность оценки. Для решения этой проблемы при автоматизации диагностирования СТГ предлагается разработанная методика, основанная на использовании теории нечеткой логики.

Нечеткие системы основаны на правилах, позволяющих приблизиться к стилю мышления человека и использующих лингвистические переменные. Для построения нечеткой диагностической модели СТГ предлагается использовать лингвистическую переменную “степень искрения”. Множество ее значений  $D = \{D_i\}, (i = \overline{1, 5})$  соответствует степени искрения  $S = \{1, 1\frac{1}{4}, 1\frac{1}{2}, 2, 3\}$  ( $i$  – класс коммутации по ГОСТ).

Пусть каждое  $i$ - тое значение лингвистической переменной представляет собой пересечение нечетких подмножеств  $D_i = A_i \cap B_i \cap C_i$ , определенных на трех базовых шкалах  $(X, Y, Z)$ :

$$\left. \begin{aligned} D_i(s, \mu_{D_i}(s)), \quad s \in S \\ A_i(x, \mu_{A_i}(x)), \quad x \in X \\ B_i(y, \mu_{B_i}(y)), \quad y \in Y \\ C_i(z, \mu_{C_i}(z)), \quad z \in Z \end{aligned} \right\} (1)$$

$X, Y, Z$  - множества значений амплитуд гармоник искрения (гармонических составляющих, соответствующих частоте коммутации) спектра напряжения СТГ при частотах вращения якоря  $n_1, n_2, n_3$ , соответственно [3];

$A_i, B_i, C_i$  - множества значений амплитуд

гармоники искрения соответствующих  $i$ - му классу коммутации ( $i$ - му значению лингвистической переменной) при частотах  $n_1, n_2, n_3$ , соответственно [4];

$\mu_{D_i}(s), \mu_{A_i}(x), \mu_{B_i}(y), \mu_{C_i}(z)$  - функции принадлежности базовых переменных  $s, x, y, z$  нечетким множествам  $D_i, A_i, B_i, C_i$ .

Механизм нечеткого логического вывода основан на базе знаний, формируемой в виде совокупности нечетких продукционных правил  $\Pi_i$  [5]:

$$\left. \begin{aligned} \Pi_1 : \text{if } x \in A_1 \cap y \in B_1 \cap z \in C_1 \Rightarrow s \in D_1; \\ \Pi_2 : \text{if } x \in A_2 \cap y \in B_2 \cap z \in C_2 \Rightarrow s \in D_2; \\ \Pi_3 : \text{if } x \in A_3 \cap y \in B_3 \cap z \in C_3 \Rightarrow s \in D_3; \\ \Pi_4 : \text{if } x \in A_4 \cap y \in B_4 \cap z \in C_4 \Rightarrow s \in D_4; \\ \Pi_5 : \text{if } x \in A_5 \cap y \in B_5 \cap z \in C_5 \Rightarrow s \in D_5 \end{aligned} \right\} (2)$$

Правила, связывающие значения входных ( $D_i$ ) и выходных ( $A_i, B_i, C_i$ ) лингвистических переменных, можно найти из опыта эксплуатации и теории функционирования электрических машин [6]. Так, например если значения всех диагностических параметров близки к эталонным, то существует высокая степень уверенности в исправности агрегата.

Алгоритм логического вывода (обработки информации по правилам нечеткой логики) включает четыре этапа.

Первый этап представляет собой введение нечеткости для исходной информации (фазсификация). С этой целью предварительно было проведено моделирование процессов переключения тока в секциях якорей электрических машин с различным техническим состоянием и получено выражение зависимости амплитуды гармоники на частоте коммутации  $u_k$  от интенсивности искрения  $P$  и оборотов якоря  $n$  [4]:

$$u_k = 2\tau\omega_c l_\delta \left( \sqrt{\frac{2ar l_m P}{p\tau n L_c \beta_k}} + \left( \frac{\xi N p}{\pi D_a} + \frac{K_a}{\beta_k} \right) i_a \right) (3)$$

где  $p$  - число пар полюсов;  $\tau$  - протяженность полюсного деления;  $n$  - частота вращения якоря (об/сек);  $a$  - число параллельных ветвей обмотки якоря;  $r$  - сопротивление секции;  $\omega_c$  - число витков в секции;  $l_\delta$  - длина активной части деления обмотки якоря;  $\xi$  - удельная магнитная проводимость путей для магнитных потоков взаимоиндукции;  $N$  - количество активных проводников, составляющих обмотку якоря;  $D_a$  - диаметр якоря;  $K_a$  - эмпирический коэффициент, учитывающий изменение сопротивления скользящего контакта в процессе коммутации;  $i_a$  - ток якоря.

На основании выражения (3) с учетом (1) и (2) путем нормирования и транспонирования диагностической зависимости были получены функции принадлежности  $\mu_{Ai}(x)$ ,  $\mu_{Bi}(y)$ ,  $\mu_{Ci}(z)$  для степеней искрения  $1, 1\frac{1}{4}, 1\frac{1}{2}, 2, 3$ . Зависимость значений выходной лингвистической переменной от значений входных базовых переменных находится по аналогии с зависимостью значений диагностических признаков от интенсивности искрения  $P$  (3) [4].

С помощью этих функций на основании задаваемых четких значений входных базовых переменных ( $x=1В$ ,  $y=0,6В$ ,  $z=0,1В$ ) определяется степень уверенности в том, что выходная лингвистическая переменная (“степень искрения”  $D$ ) принимает конкретное значение ( $D_i = D_1 = 1$ ).

Второй этап логического вывода - нечеткая импликация представляет собой нахождение предпосылок изменения выходной функции принадлежности, создаваемых каждым отдельным правилом  $\alpha(i)$  при конкретных входных сигналах  $x_0$ ,  $y_0$  и  $z_0$  (значениях диагностических параметров при заданных оборотах якоря электрической машины):

$$\alpha(i) = \mu_{Ai}(x_0) \cap \mu_{Bi}(y_0) \cap \mu_{Ci}(z_0) \quad (4)$$

Результирующие функции принадлежности каждого правила вычисляются по формуле:

$$\mu_i(s) = \alpha(i) \cap \mu_{Di}(s) \quad (5)$$

Третий этап логического вывода - нечеткая композиция представляет собой нахождение результирующей функции принадлежности всей совокупности правил при заданных входных сигналах  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$ :

$$\mu_{\Sigma}(s) = \mu_1(s) \cap \mu_2(s) \cap \mu_3(s) \cap \mu_4(s) \cap \mu_5(s) \quad (6)$$

Четвертый этап логического вывода - приведение к четкости (дефаззификация) – определение искомого значения степени искрения. Выходная функция принадлежности при этом преобразуется в конкретное четкое число  $s_0$  в соответствии с выражением (центроидный метод):

$$s_0 = \frac{\int s \mu_{\Sigma}(s) ds}{\int \mu_{\Sigma}(s) ds} \quad (7)$$

Вычисленный в соответствии с (7) центр тяжести  $s_0$  представляет собой четкое значение базовой переменной – степень искрения при определенных входных сигналах ( $x_0, y_0, z_0$  (рис.1)). Благодаря этому свойству значение  $s_0$  может использоваться в качестве регистрируемого параметра в автоматизированных системах диагностики СТГ.

Прогнозирование изменения технического состояния СТГ основано на оценке степени отклонения центра тяжести  $s_0$  (центра тяжести фигуры, ограниченной функцией принадлежности  $\mu_{\Sigma}(s)$ ) от ближайшего значения класса коммутации. Это свойство результирующей функции принадлежности позволяет осуществлять корректировку режимов технического обслуживания СТГ исходя из потребности в выполнении работ.

Таким образом, разработанный алгоритм логического вывода обеспечивает возможность автоматизированной оценки технического состояния СТГ благодаря комплексированию диагностической информации.

[1] Котеленец Н.Ф. Испытания и надёжность электрических машин. / Н.Ф. Котеленец, Н.Л. Кузнецов – М.: Высш. шк., 1988. – 232 с.

[2] Гольдберг О.Д. Испытания электрических машин. / О.Д. Гольдберг – М.: Высш. шк., 2000. – 255 с.

[3] Шейников А.А. Диагностика коллекторных электрических машин по параметрам входного (выходного) напряжения / А.А. Шейников, В.Р. Вашкевич А.А. Саныо // Вестник Военной академии Республики Беларусь №4. – 2010. – С. 96–102.

[4] Шейников А.А. Спектральная оценка качества коммутации коллекторных электрических машин постоянного тока / А.А. Шейников, Ю.В. Суходолов, В.Р. Вашкевич // Вестник Военной академии Республики Беларусь №2. – 2011. – С. 103–108.

[5] Круглов В.В. Нечеткая логика, искусственные нейронные сети. / В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов. – М.: Физматлит, 2001. – 224 с.

[6] Вольдек А.И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. / А.И. Вольдек, В.В. Попов – Спб.: Питер, 2007. – 320 с.

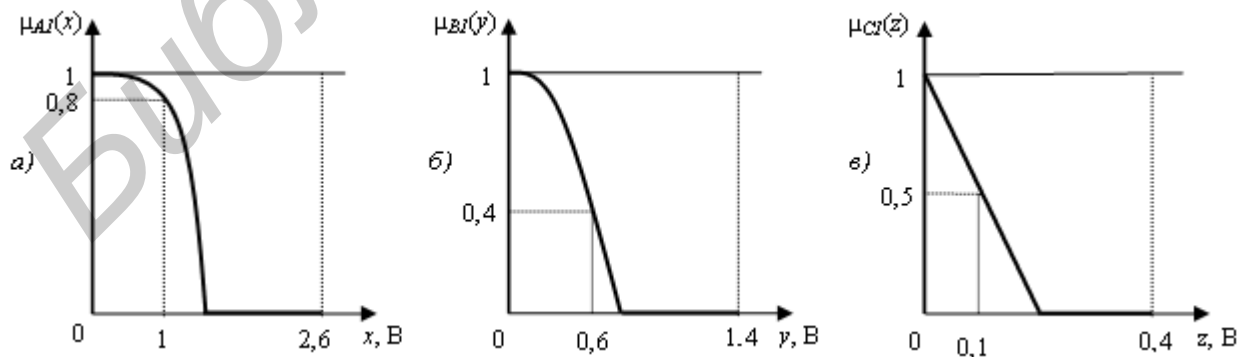


Рис. 1. Функции принадлежности для степени искрения 1