

# Применение нечеткой логики в солнечных панелях

Л. П. Козлова

Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
tigrenok59@mail.ru

О. А. Козлова

Санкт-Петербургский государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича  
k\_olga\_a@mail.ru

**Аннотация.** Рассматривается возможность применения нечеткой логики в солнечных панелях, которые представляют собой сложную техническую систему. Нечеткая логика позволяет легко и качественно настроить контроллер в нелинейной системе управления солнечной панелью, обеспечивая ее надежную работу при изменяющихся параметрах, нагрузке и напряжении питания.

**Ключевые слова:** солнечная панель; нечеткая логика; система слежения; шаговый двигатель

## I. ВВЕДЕНИЕ

### A. Обзор литературы

На современном этапе солнечная энергетика получила широкое развитие, так как солнечная энергия экологически чистая и ресурсоемкая. Современные солнечные панели представляют собой сложные технические системы, которые имеют неопределенные параметры. Их эффективность зависит от интенсивности солнечного потока, падающего на панель; температуры панели; времени года; погодных условий и взаимного расположения панелей и Солнца.

В работе [1, 2] рассматривается влияние интенсивности солнечного излучения и температуры окружающей среды. Для оптимального преобразования энергии предлагается конструкция одноосной или двухосной системы слежения, управление которыми реализуется на основе двигателя постоянного тока.

В работе [3] представлена конструкция системы слежения с использованием сервосистемы, которая состоит из блока передачи солнечного света, блока нечеткой логики, блока управления выходным приводом, блока сравнения и настройки.

В работе [4] управление системой слежения выполняется с помощью нечеткой логики с тремя функциями принадлежности. Управляемыми переменными являются угол тангажа и угол рыскания в активной двухосной системе слежения за Солнцем. Управление нечеткой логикой на входе является ошибкой, а на выходе – широтно-импульсный модулятор.

В работе [5] рассматривается сравнительный анализ применения ПИД регулятора и нечеткой логики в системе слежения одноосной конструкции.

### B. Описание объекта

В данной работе рассматривается конструкция двухосной системы слежения с использованием шаговых двигателей.

На рис. 1 представлена схема системы слежения панели, где M1 и M2 – шаговые двигатели; P1 и P2 – редукторы; в качестве сенсора используется фоторезистор. С помощью двигателей, установленных на раме, изменяется углы азимута и места.

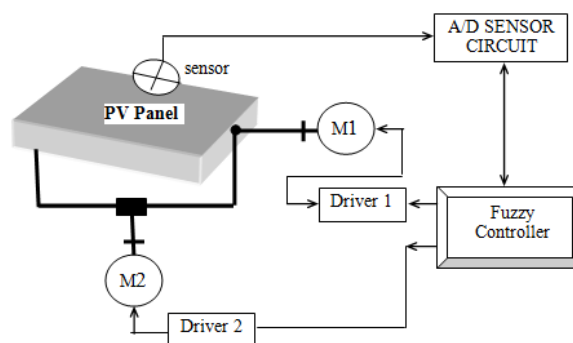


Рис. 1. Схема системы слежения панели

Существует единственная точка максимальной мощности (MPP), соответствующая конкретному напряжению и току (рис. 2).

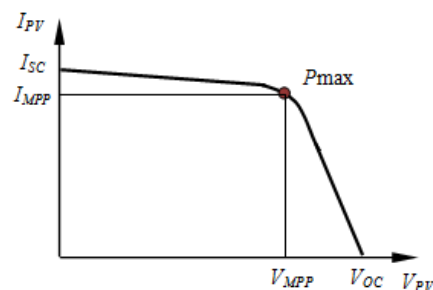


Рис. 2. Определение максимальной мощности на вольт-амперной характеристике

Изменяя температуру механизма слеживания точки максимальной мощности (MPPT) отслеживается новая измененная точка максимальной мощности на соответствующей кривой. MPPT позволяет извлекать максимальную мощность из солнечного фотоэлектрического модуля и передавать ее на нагрузку. Преобразователь переменного/постоянного тока выполняет роль интерфейса между нагрузкой и модулем.

MPPT изменяет рабочий цикл, чтобы поддерживать мощность передачи от солнечного фотоэлектрического модуля к нагрузке на максимальной отметке.

## II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА

Система слежения солнечной панели представляет сложную систему, точного математического описания

которой отсутствует. Выполним декомпозицию системы на подсистемы, записывая их соотношения в виде:

$$S = \{X, R\},$$

где  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  – подмножество элементов  $x_i$  системы,  $R$  – регулярность системы слежения, учитывающая порядок следования элементов  $x_i$  и их взаимообусловленность, взаимообусловленность внешних условий и подмножества  $X$ .

Для анализа системы слежения, нельзя не учитывать вектор  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ , являющийся выходной величиной, представленный в терминах {вход-выход}. При известных множествах  $X$  и  $R$  функция принадлежности запишется как:

$$f : \{X, R\} \xrightarrow{u_i} Y,$$

где  $u_i$  – универсальное множество, включающее управляющее воздействие в подсистеме [6].

Зададим управляющее воздействие на систему слежения в виде лингвистических правил, контролируя информацию о положении системы слежения в каждый момент времени, которое зависит от температуры. Затем запишем лингвистические термы температуры, определив их как: холодная, прохладная, нормальная, теплая, жаркая. На основании синтаксических правил ЕСЛИ-ТО, введенных в нечеткий контроллер, на выходе которого будет получено только одно значение управляющего воздействия  $U$  [7].

Математическое описание логического контроллера и объекта управления, записанных с помощью нечетких продукционных правил примет следующий вид:

$$P_{r1} : \text{если } x_1^1, \text{ то } A_{r11} \text{ и если } x_1^2 \text{ и... и, то } A_{r12}$$

$$\text{и если } x_1^2, \text{ то } A_{r12} \text{ и... и если } x_1^{n1} \text{ то } A_{r1n1}, \text{ то}$$

$$\bar{u}(t) = L_{kr1}(\bar{e}(t));$$

$$P_{r2} : \text{если } x_2^1, \text{ то } B_{r21} \text{ и если } x_2^2, \text{ то } B_{r22} \text{ и... и}$$

$$\text{если } x_2^{n2}, \text{ то } B_{r2n2}, \text{ то } \bar{y}(t) = L_{oyr2}(\bar{u}(t)),$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – размерности векторов  $\bar{x}_1$  и  $\bar{x}_2$  соответственно;  $r_1 = 1, 2, \dots, m_1$ , нечеткие продукционные правила;  $L_{kr1}(\cdot)$ ,  $L_{oyr2}(\cdot)$ , – линейная функция принадлежности.

Математическую модель двигателя, выходным параметром которого является скорость, запишем в виде алгоритма нечеткого вывода Сугено:

$$\bar{u}(t) = \frac{\sum_{r_1=1}^{m_1} \mu_{r_1}^A(\bar{x}_1) \cdot L_{kr1}(\bar{e}(t))}{\sum_{r_1=1}^{m_1} \mu_{r_1}^A(\bar{x}_1)},$$

$$\bar{y}(t) = \frac{\sum_{r_2=1}^{m_2} \mu_{r_2}^B(\bar{x}_2) \cdot L_{oyr2}(\bar{u}(t))}{\sum_{r_2=1}^{m_2} \mu_{r_2}^B(\bar{x}_2)},$$

где  $\mu_{r_1}^A(\bar{x}_1)$  и  $\mu_{r_2}^B(\bar{x}_2)$  – функции принадлежности  $n_1$ -мерных и  $n_2$ -мерных нечетких множеств  $A_{r_11} \cap A_{r_12} \cap \dots \cap A_{r_1n_1}$  и  $B_{r_21} \cap B_{r_22} \cap \dots \cap B_{r_2n_2}$  соответственно.

Математическое описание системы слежения можно представить в виде нелинейных разностных уравнений  $l$ -го порядка

$$y_i = f(y_{i-1}, \dots, y_{i-l}, u_i, u_{i-1}, \dots, u_{i-l}),$$

где  $f(\cdot)$  – функция, которая непрерывна и имеет ограничение на  $R^n$  ( $n = l + l_1 + 1$ ) нелинейной функцией.

Динамику нечеткой комплексной модели запишем в виде набора нечетких продукционных правил:

$$P_r : \text{если } x'_{1i}, \text{ то } A_{r1} \text{ и } x'_{2i}, \text{ то } A_{r2} \text{ и...}$$

$$\text{и } x'_{li}, \text{ то } A_{rl}, \text{ то}$$

$$y_i = \sum_{j=1}^l p_{rj} y_{i-j} + \sum_{j=l+1}^{l+l_1} p_{rj} u_{i-j+(l+1)},$$

где  $\bar{x}' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_{l_2})$ ;  $A_{rj}$  – заданные нечеткие числа,  $A_{rl}$  – заданные параметры.

Для реализации адаптивного управления в структуру МРРТ включается информационно-измерительная система, которая позволяет получить информацию о температуре и интенсивности солнечного света. Задача адаптивного управления сводится к поиску функции управления  $Q\pi \in |\pi(t)| \leq c\pi$  при  $t > t_0$ , который удовлетворяет условиям:

$$\begin{cases} x_i(t) = F[x(t), u(t), \xi] + \pi(t); \\ u(t) \in Q_u, x(t) \in Q_x, t \in \{t_0, t_T\}. \end{cases}$$

где  $x_i$  – некоторое значение положения в пространстве состояний  $\{x_0, x_1, \dots, x_T\}$ ,  $x(t)$  – состояние механизма слежения,  $\xi$  – вектор параметров механизма слежения,  $\pi(t)$  – вектор внешних возмущающих воздействий, включающий кинематические, силовые и информационные,  $Q_u, Q_x, Q_\pi$  – множества состояний, в которые входят переменные,  $c\pi$  – максимальные величины возмущающих воздействий,  $t_T, t_0, t$  – значения времен, соответствующих текущему, начальному и конечному.

Функция управления должна быть оптимальна, когда будет выполняться равенство:

$$F[u_i(t)] = \text{ext}\{F[u(t)]\} \text{ или } X[x_i(t)] = \text{ext}\{F[x(t)]\},$$

где  $F$  – функционал, соответствующий оптимальному управлению,  $X$  – функционал, соответствующий движению в заданную точку.

Движение механизма слежения взаимосвязано с определенной априорной средой. Безотносительно от геометрии окружения состояние МРРТ определяется переменной  $x$  в абсолютных координатах.

Рассмотрим переменную нечеткого состояния системы слежения:

$$s \in S = \{s_i, i = 1 : m\},$$

которая в момент времени  $t = kT$  обозначается как  $s = s^k$ , и которая представляет собой нечеткое отношение  $Y$  с переменной  $y = [y^1, y^2, y^3, y^4]$ , записанной в виде функции принадлежности вида:

$$\mu_{s_1}(y) \min\{\mu_{CM}(y^1), \mu_{LG}(y^2), \mu_{MD}(y^3), \mu_{LG}(y^4)\}.$$

Используемая команда до стадии деактивизации, представляет набор нечетких подмножеств  $U^i, i = 1 : 2$ , где  $\mu_{U^i}(u^i)$  – функция принадлежности.

Рассмотрим две команды:

- температура  $u^1$ ;
- интенсивность солнечного потока  $u^2$ .

Запишем два нечетких подмножества в виде вектора  $U = [U^1, U^2]^T$  с переменной  $u = [u^1, u^2]^T$ . В момент времени  $t = kT$  используется команда в нечетком контроллере вида  $U^k = [U^{1k}, U^{2k}]^T$ .

Пусть  $U$  множество всех нечетких векторов, являющихся входами, сформированных логическим контроллером. Каждое изменение положения системы слежения, которое отслеживает нечеткий контроллер, является нечеткой динамической системой, записанной в виде лингвистических термов:

$$s^{k+1} = f(s^k, U^k),$$

где функцию перехода  $f$  можно записать в виде:

$$f : S \times U \rightarrow S.$$

Систему слежения можно записать в виде нечеткой математической модели в виде набора правил, включающих в себя знания о температуре и интенсивности солнечного потока. Проаппроксимируем пространство  $U$  в вид конечного пространства соответствующих нечетких команд  $U^j$ :

$$U = \{U^j, j = 1 : p\},$$

где  $U^j$  – одно из возможных значений вектора нечеткой переменной  $U = [U^1, U^2]^T$ , функция принадлежности которого является вектором двух функций:

$$\mu_U(u) = [\mu_{U^1}(u^1), \mu_{U^2}(u^2)]^T.$$

Запишем лингвистические значения как "ТС" = "холодная"; "ТН" = "нормальная"; "ТW" = "теплая"; "ТН" = "жаркая" как показано на рис. 3.

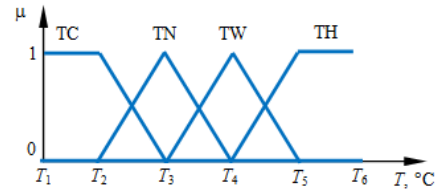


Рис. 3. Лингвистическая переменная – температура

Так как нечеткие значения  $s^i, U^j$  представляют собой нечеткие множества, включающие переменные  $y$  и  $u$  соответственно, то команды можно представить в виде:

$$C : Y \times U \rightarrow [0, 1];$$

$$\mu_c(y, u) = \sup\{\mu_Q(s^i, U^j) \wedge \mu_{s_i}(y) \wedge \mu_U(u)\};$$

$$s^i \in S, U^j \in U.$$

Для реализации работы солнечной панели необходимо привести математическое описание шагового двигателя.

При выборе шагового двигателя (ШД) и системы управления его фазами необходимо учитывать зависимость момента от скорости. Обмотки двигателя являются индуктивностями, которые определяют время нарастания и спада тока. Поэтому в математической модели будем учитывать, что если к обмотке приложено напряжение прямоугольной формы, то ток не будет прямоугольной формы.

Питание обмоток осуществляется от источника постоянного напряжения.

В соответствии с работами [8, 9] запишем математическое описание в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{di_{sa}}{dt} = \frac{1}{L_{sa}} \left( u_{sa} - r_{sa} \cdot i_{sa} - Kr \cdot M \cdot \cos(\beta) + \right. \\ \quad \left. + M \cdot i_{ra} \cdot \sin(\beta) \cdot w_r \right) \\ \frac{di_{sb}}{dt} = \frac{1}{L_{sb}} \left( u_{sb} - r_{sb} \cdot i_{sb} - Kr \cdot M \cdot \sin(\beta) + \right. \\ \quad \left. + M \cdot i_{ra} \cdot \cos(\beta) \cdot w_r \right) \\ \frac{di_{ra}}{dt} = Kr \\ \frac{d\beta}{dt} = w_r \\ \frac{dw_r}{dt} = \frac{p}{J} (M_e - M_c - k \cdot w_r) \end{cases} \quad (1)$$

где  $i_{sa}, i_{sb}, i_{ra}$  – токи в фазах обмоток статора и ротора;  $U_{sa}, U_{sb}, U_{ra}$  – напряжения в фазах на

обмотках статора и ротора;  $r_{sa}$ ,  $r_{sb}$ ,  $r_{ra}$  – активные сопротивления фаз обмоток статора и ротора;  $L_{sa}$ ,  $L_{sb}$ ,  $L_{ra} = L_{r0} + L_{r1} \cdot \cos(4\beta)$  – индуктивности фаз обмоток статора и ротора;  $M$  – взаимная индуктивность;  $\beta$  – угловое положение ротора;  $\omega_r$  – угловая скорость;  $M_c$  – момент сопротивления;  $M_e$  – электромагнитный момент;  $J$  – момент инерции ротора;  $p$  – число полюсов.

Механическая характеристика шагового двигателя имеет две зоны, неблагоприятно воздействующих на его работу: резонансную и гистерезиса, и его управление осуществляется с помощью драйвера, поэтому для улучшения качества переходных процессов в системе уравнений (1) необходимо учитывать условия (2) в каждой обмотке:

$$\begin{cases} \text{если } ga(t) = 1 \text{ то } u_{sa} = U; r_{sa} = r + 2R_{ON}; \\ \text{если } ga(t) = 0 \text{ и } ga(t-h) = 1 \text{ то} \\ \begin{cases} \text{если } i_{sa} > 0 \text{ то } u_{sa} = -(E + 2U_D); r_{sa} = r + 2R_{ON}; \\ \text{если } i_{sa} \leq 0 \text{ то } u_{sa} = 0; r_{sa} = 2R_{OFF} \end{cases}; \\ \text{если } ga(t) = -1 \text{ то } u_{sa} = -U; r_{sa} = r + 2R_{ON}; \\ \text{если } ga(t) = 0 \text{ и } ga(t-h) = -1 \text{ то} \\ \begin{cases} \text{если } i_{sa} < 0 \text{ то } u_{sa} = (E + 2U_D); r_{sa} = r + 2R_{ON} \\ \text{если } i_{sa} \geq 0 \text{ то } u_{sa} = 0; r_{sa} = 2R_{OFF} \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

где  $ga(t)$  – формирователь импульсов ( $ga(t) = 1$  – формирует положительный импульс тока или напряжения на обмотке;  $ga(t) = 0$  – на обмотке нет тока;  $ga(t) = -1$  – обмотка имеет отрицательный импульс тока или напряжения);  $h$  – шаг интегрирования при реализации системы уравнений (1), описывающую шаговый двигатель;  $U$  – питающее напряжение шагового двигателя;  $U_D$  – прямое падение напряжения на диоде;  $R_{ON} \ll R_{OFF}$  – сопротивления открытого и закрытого ключа.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для реализации системы слежения используем шаговый двигатель, параметры которого приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА I ПАРАМЕТРЫ ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Параметр	Значение
Номинальное напряжение, В	24
Номинальный ток, А	3
Номинальный крутящий момент, Н·м	0,1
Номинальная частота отработки шагов, Гц	16000
Номинальный момент инерции нагрузки, кг·м <sup>2</sup>	4·10 <sup>-6</sup>
Единичный шаг при использовании драйвера, градус	0,03
Номинальный момент инерции ротора, кг·м <sup>2</sup>	7·10 <sup>-6</sup>
Активное сопротивление обмотки, Ом	1±0,1
Индуктивность обмотки, мГн	16±4
Предельное повышение температуры обмоток, °С	+170

На основании рис. 1 построим модель в MatLab Simulink (рис. 4).

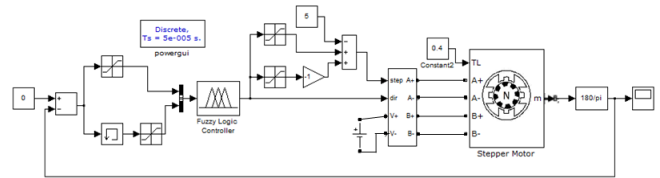


Рис. 4. Модель в MatLab Simulink

Нахождение ошибки при работе системы слежения рассчитывается как разность значений, которые получены с фотоэлектрического датчика и положения панели в текущий момент времени относительно Солнца. Если ошибка положения панели не соответствует заданной, то с логического контроллера поступает управляющий сигнал, позволяющий устранить ошибку.

Переходная характеристика выходного сигнала от времени показана на рис. 5.

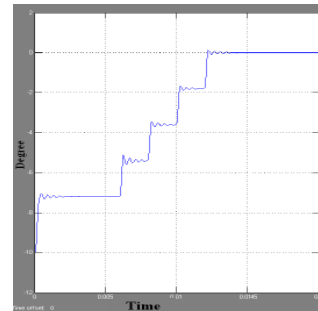


Рис. 5. Переходная характеристика выходного сигнала

На рис. 6 представлена переходная характеристика работы двигателя.

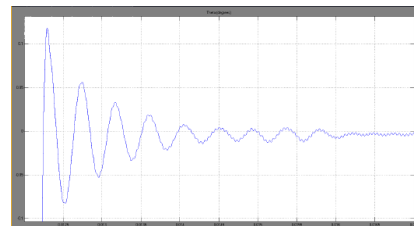


Рис. 6. Переходная характеристика работы двигателя

В табл. 2 представлены расчеты потребляемой энергии в режиме слежения шаговым двигателем.

ТАБЛИЦА II ПОТРЕБЛЯЕМАЯ ЭНЕРГИЯ ШАГОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Параметр	Значение
Установившееся значение тока двигателя $I$ , А	3
Напряжение двигателя $U$ , В	24
Время изменения положения рамы на 3 градуса $t$ , с	1,67
Время изменения положения на 180 градусов по азимуту $t$ , с	100,2
Мощность в установившемся режиме $P$ , Вт	72
Необходимая энергия для двух шаговых двигателей в режиме покоя, кВт·ч	1,724

Из результатов моделирования видно, что солнечная панель обрабатывает необходимый угол поворота, перерегулирование двигателя составляет 1,2 %, время переходного процесса 0,015 с.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из вышеприведенных результатов видно, что учитывая допущения (2), в системе слежения уменьшается затрачиваемая энергия на перемещение от 4,0 до 4,8 %, а энергоэффективность увеличивается при увеличении перемещения по положению.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] I. Abadi, A. Soeprijanto, A. Musyafa, A. Design of single axis solar tracking system at photovoltaic panel using fuzzy logic controller. 5th Brunei International Conference on Engineering and Technology (BICET 2014). (Bandar Seri Begawan, Brunei). IET Conference Proceedings, 2014, URL: <https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2014.1086> (Дата обращения: 20.11.2021)
- [2] H.-C. Lu, T.-L. Shih, Fuzzy system control design with application to solar panel active dual-axis sun tracker system, IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics., pp. 1878–1883, 2010. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5642275> (Дата обращения: 20.11.2021)
- [3] W. Luo, Y. Wu, A servo system of tracking automatically for solar cell based on fuzzy controller, 2010 International Conference on Management and Service Science, (Wuhan, China, 2010), pp. 1–4. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5578527> (Дата обращения: 20.11.2021)
- [4] Chairul Imron, Imam Abadi, Nurika Brillianti, Muhammad Khamim Asy'ari, Yusilawati Ahmad Nor, and Aep Saepul Uyun. Fuzzy Logic Controller Application for an Active Two-Axis Solar Tracking System, E3S Web of Conferences 190, 00004 (2020). URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019000004> (Дата обращения: 20.11.2021)
- [5] Emre Kiyak, Gokhan Gol. A comparison of fuzzy logic and PID controller for a single-axis solar tracking system // Renewables: Wind, Water, and Solar volume 3, Article number: 7 (2016). URL: <https://jrenewables.springeropen.com/articles/10.1186/s40807-016-0023-7> (Дата обращения: 20.11.2021)
- [6] Козлова О.А., Козлова Л.П. Основы теории нечетких множеств: учеб. пособие. СПб., СПбГУТ, 2014. 160 с.
- [7] Kozlova O.A., Kozlova L.P. Using of fuzzy set theory when designing technical systems технических систем // Proceedings of International Conference on Soft Computing and Measurements SCM, 2015, pp. 193-194. DOI: 10.1109/SCM.2015.7190453
- [8] Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высш. шк., 2001. 327 с.
- [9] Солоха А.А. Математическая модель шагового двигателя // Математические методы в технике и технологиях: материалы XVII междунар. научн. конф. Кострома. 2004. Т.5.