УДК 621.314

А.Д. КУЗНЕЦОВА, аспирант (БГТУ им. В.Г. Шухова)
Научный руководитель А.В. БЕЛОУСОВ, канд. техн. наук, доцент (БГТУ им. В.Г. Шухова)
г. Белгород

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМОВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В СТАНДАРТНЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ КРАНОВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Контроллеры нечеткой логики на сегодняшний день широко применяются в системах управления объектами промышленной автоматизации. Некоторые исследования [1-3] показали возможным применение алгоритмов нечеткой логики и в частотном электроприводе мостового крана. К особенностям частотного управления можно отнести:

- высокую точность регулирования скорости при подборе оптимальных алгоритмов управления;
- регулируемый плавный пуск и торможение электроприводов перемещения крана и перемещения тележки;
- высокую перегрузочную способность электроприводов крана;
- плавное изменение скорости во всем диапазоне регулирования;
- возможность параллельного подключения нескольких электрических двигателей к одному преобразователю;
- удержание груза подъёмным механизмом при нулевой скорости до наложения тормоза;
- сокращенное потребление электрической энергии за счет методов оптимального управления;
- возможность рекуперации энергии торможения в сеть при использовании активного выпрямителя [4, 5].

Стандартные системы скалярного частотного управления асинхронными электрическими двигателями (АД), такие как: система скалярного управления со стабилизацией потокосцепления статора, взаимоиндукции или ротора, а также абсолютного скольжения; частотно-токовое управление со стабилизацией магнитного потока обеспечивают хорошие регулировочные характеристики в статических режимах работы. Управляющими сигналами в таких системах являются напряжение и частота [6].

Возможная реализация скалярного управления АД при постоянстве магнитного потока представлена на функциональной схеме (рис. 1). Здесь управляющий сигнал U_f определяет начальный уровень задания частоты f_1, закон изменения которой определяется задатчиком интенсивности ЗИ.

Ошибка рассогласования сигналов напряжения задания $U_{ЗИ}$ и напряжения $U_{ОС}$, полученного по каналу обратной связи по скорости с коэффициентом обратной связи $k_{ОС}$, компенсируется П- или ПИ-регулятором скорости. Закон управления *U/f* реализуется в функциональном преобразователе ФП. Ключи инвертора преобразователя частоты ПЧ получают управляющие сигналы от системы управления инвертором СУИ.

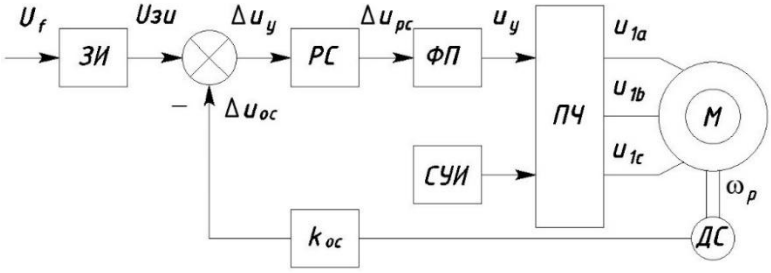

Рис. 1. Функциональная схема скалярного управления АД с датчиком скорости

Однако следует отметить, что механизмы мостового крана образуют в совокупности нелинейную систему со сложной динамикой, которая требует обеспечения высокого быстродействия без колебаний скорости. Для этого необходимо поддерживать магнитный поток и электромагнитный момент двигателя на заданном уровне, что невозможно осуществить использованием скалярных систем управления. [7].

По этой причине для электроприводов подъема, перемещения крана и перемещения тележки применяют векторные системы частотного управления, главным преимуществом которых является возможность раздельного регулирования потокосцепления и электромагнитного момента АД. Из многообразия моделей векторного управления можно выделить такие виды как:

- модель векторного управления с вычислителем потокосцепления и датчиком скорости;
- модель векторного управления без применения датчиков с вычислителями потокосцепления и скорости двигателя;
- модель косвенного векторного управление с датчиком;
- модель бездатчикового косвенного векторного управления [8].

В системах векторного управления АД наибольшее распространение получили классические ПИ-регуляторы тока, потокосцепления и скорости. На рисунке 2 представлена функциональная схема системы векторного управления АД.

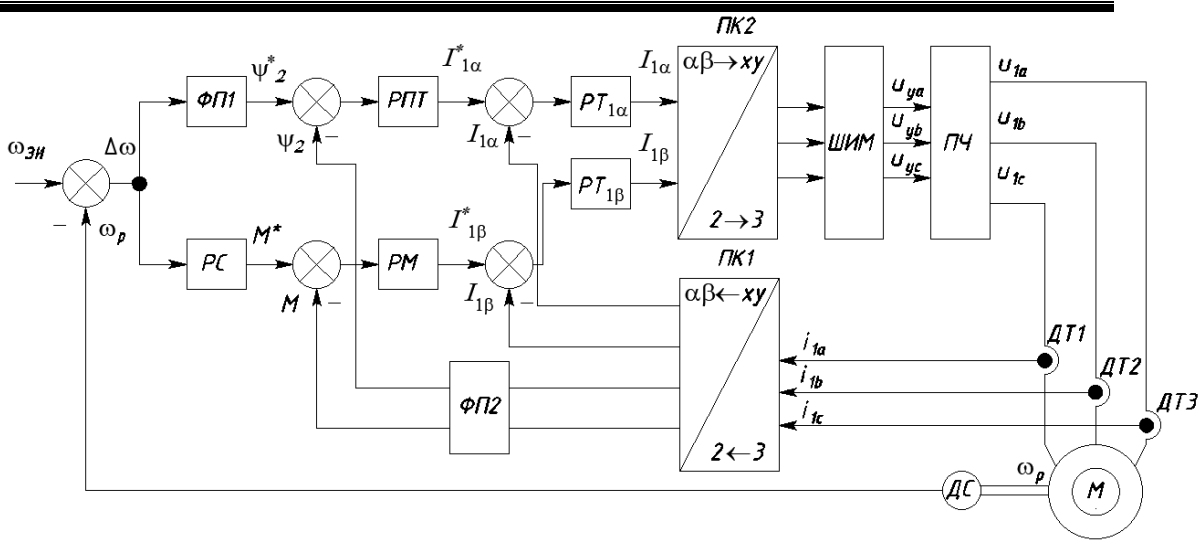

Рис. 2. Функциональная схема векторного управления АД с датчиком скорости

В работе [9] были получены характеристики переходных процессов в электроприводе подъёма для векторной системы управления, где все регуляторы являются ПИ-регуляторами. В результате анализа было установлено, что система имеет достаточно большое перерегулирование и продолжительный переходный процесс, что может оказывать негативное влияние на точность позиционирования груза и быстродействие системы.

Использование алгоритмов нечеткой логики в системе управления электроприводами мостового крана позволяет решить задачу оптимального управления в условиях присутствия нелинейностей [10]. На рисунке 3 приведена структурная блок-схема схема нечеткого ПИ-регулятора скорости для векторной системы управления АД.

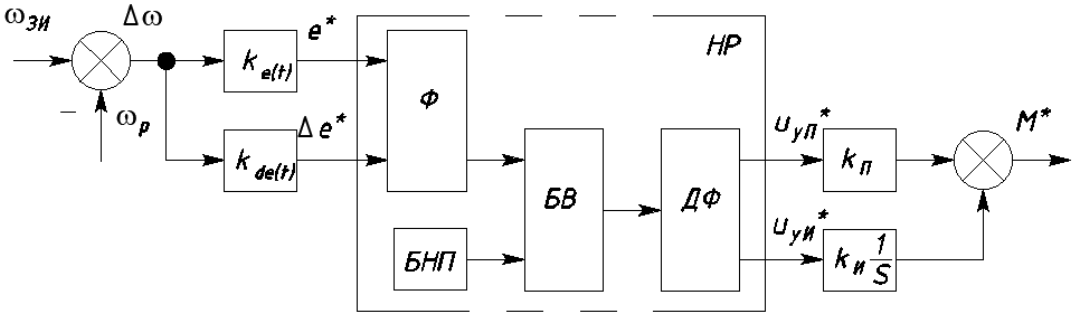

Рис. 3. Структурная блок-схема схема нечеткого ПИ-регулятора скорости для векторной системы управления АД

Как представлено на рисунке 3, на вход нечёткого регулятора НР в качестве управляющего сигнала подаются ошибка рассогласования между

заданным сигналом скорости и скоростью вращения ротора АД и скорость изменения этой ошибки:

$$e(t)=\omega^*(t) - \omega(t); \quad (1)$$

$$de(t)=e(t) - e(t-1), \quad (2)$$

где $\omega^*(t)$ – заданное значение скорости, рад/с;

$\omega(t)$ – скорость вращения ротора АД, рад/с.

Нечёткий регулятор состоит из блоков фазификации Ф, базы нечетких правил БЗ, блоков вывода БВ и дефазификации ДФ. На выходе нечёткого ПИ-регулятора с сигналами управления $u_{уП}^*$ $u_{уИ}^*$ формируется сигнал задания по моменту M^*.

Для формулирования нечётких правил управления АД требуется выполнить разбиение области изменения ошибки $e(t)$ на множества отрицательного отклонения О, отсутствия ошибки или нейтрального состояния Н и положительного отклонения П. Тогда, для осуществления регулирования с целью получения малого значения сигнала управления М или с целью получения большего значения сигнала управления Б, можно сформировать базу нечётких правил матричного вида, представленного в табл. 1. Здесь, О, Н, П, М, Б – лингвистические переменные.

Таблица 1

База нечётких правил

e(t) / *de(t)*	О	Н	П
О	ОБ	ОМ	Н
Н	ОМ	Н	ПМ
П	Н	ПМ	ПБ

В символьном виде база правил будет иметь следующий вид:

П1: ЕСЛИ $e(t)$ = О И $de(t)$ = О ТО u^* = ОБ;
П2: ЕСЛИ $e(t)$ = О И $de(t)$ = Н ТО u^* = ОМ;
П3: ЕСЛИ $e(t)$ = О И $de(t)$ = П ТО u^* = Н;
П4: ЕСЛИ $e(t)$ = Н И $de(t)$ = О ТО u^* = ОМ;
П5: ЕСЛИ $e(t)$ = Н И $de(t)$ = Н ТО u^* = Н; (3)
П6: ЕСЛИ $e(t)$ = Н И $de(t)$ = П ТО u^* = ПМ;
П7: ЕСЛИ $e(t)$ = П И $de(t)$ = О ТО u^* = Н;
П8: ЕСЛИ $e(t)$ = П И $de(t)$ = Н ТО u^* = ПМ;
П9: ЕСЛИ e(t) = П И de(t) = П ТО u* = ПБ.

На рисунке 4 представлены графики функций принадлежности *μ(e)* триангулярной формы для подмножеств ОМ, О и ПМ и трапецеидальной формы для подмножеств ОБ и ПБ. Степени принадлежности значения ошибки e_1 подмножествам ОБ и ОМ составляют $\mu_{ОБ}(e_1) = 0{,}8$ и $\mu_{ОМ}(e_1) = 0{,}2$ соответственно.

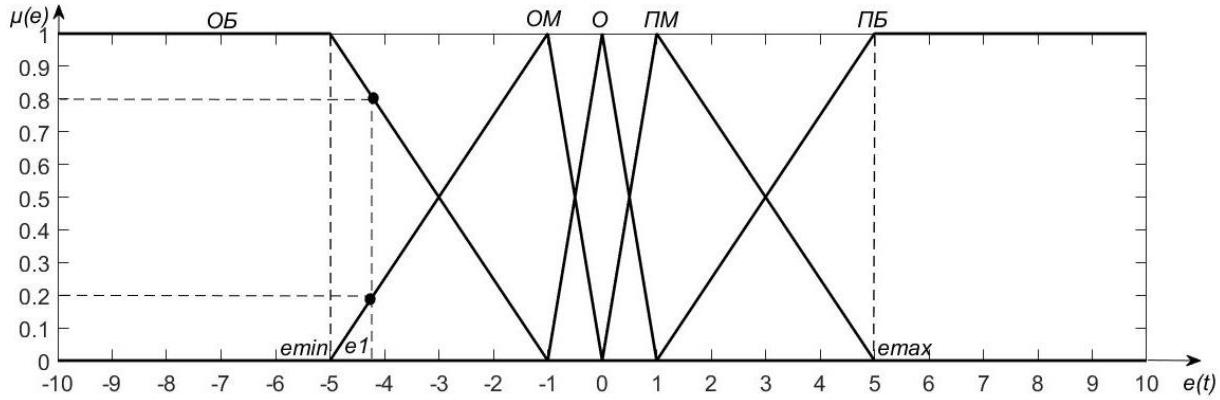

Рис. 4. Графики функций принадлежности для сигнала *e(t)*

Аналогичным образом строятся графики функций принадлежности *μ(de)* и определяются степени принадлежности для значений *de(t)*.

Используя операцию минимума min по методу Заде [11], определяются значения функций принадлежности для пересечения двух множеств *e(t)* и *de(t)* согласно базе правил (табл. 1) в функциональном виде и записываются в нечёткую переменную u^*:

$$\mu_{\Pi i}(u^*) = \min\{0, \min[\mu_{e(t)_i}(e(t)), \mu_{de(t)_i}(de(t))]\}, \qquad (4)$$

где i – номер правила.

Далее, используя метод максимума max, определяется значение результирующей функции принадлежности как:

$$\mu(u^*) = \max\{\mu_{\Pi i}(u^*), \mu_{\Pi i+1}(u^*), \dots, \mu_{\Pi n}(u^*)\}, \qquad (5)$$

где $n = 9$ – число правил.

Для перехода от нечёткого представления управляющего сигнала к чёткому, применяют различные методы дефазификации [12]. Одним из самых распространённых является метод центра тяжести:

$$u = \int_{umin}^{umax} u^*\mu(u^*)du^* \Big/ \int_{umin}^{umax} \mu(u^*)du^*. \qquad (6)$$

Таким образом, в системах управления крановым электроприводом наиболее эффективно применение гибридной системы управления на базе нечетких алгоритмов и ПИ-регулирования.

Список литературы:

1. Sun Z. et al. An adaptive DE algorithm based fuzzy logic anti-swing controller for overhead crane systems //International Journal of Fuzzy Systems. – 2020. – Т. 22. – №. 6. – С. 1905-1921.
2. Wang X. et al. A new approach of anti-swing control system based on run-to-run control and fuzzy control for overhead crane //2017 13th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD). – IEEE, 2017. – С. 1264-1270.
3. Qian D. et al. Design of simultaneous input-shaping-based SIRMs fuzzy control for double-pendulum-type overhead cranes //Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences. – 2015. – Т. 63. – №. 4.
4. Кузнецова, А. Д. Анализ особенностей применения активного выпрямителя в частотных электроприводах / А. Д. Кузнецова, М. А. Авербух // Энергетика и энергосбережение: теория и практика : Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции, Кемерово, 16–17 декабря 2020 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2020. – С. 321-1-321-6.
5. Юданов, А. Е. Преимущества перехода к частотному регулированию на примере электроприводов козлового контейнерного крана / А. Е. Юданов, И. Ю. Муллин // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2018. – № 6. – С. 147-151.
6. Karthik D., Chelliah T. R. Analysis of scalar and vector control based efficiency-optimized induction motors subjected to inverter and sensor faults //2016 International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT). – IEEE, 2016. – С. 462-466.
7. Chentouf B., Han Z. J. On the Stabilization of an Overhead Crane System With Dynamic and Delayed Boundary Conditions //IEEE Transactions on Automatic Control. – 2019. – Т. 65. – №. 10. – С. 4273-4280.
8. Фираго Б. И., Васильев Д. С. К вопросу векторного управления асинхронными двигателями //Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2015. – №. 5.
9. Авербух М. А., Кузнецова А. Д. Имитационное моделирование динамических процессов в крановом электроприводе с активным выпрямителем //Интеллектуальная электротехника. – 2021. – №. 1. – С. 7-18.

10. Salleh Z., Sulaiman M., Omar R. Tuning fuzzy membership functions to improve performance of vector control induction motor drives //Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC). – 2016. – Т. 8. – №. 2. – С. 1-4.

11. Демидова, Г. Л. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами / Г. Л. Демидова, Д. В. Лукичев. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2017. – 81 с.

12. Chakraborty A. et al. Hexagonal fuzzy number and its distinctive representation, ranking, defuzzification technique and application in production inventory management problem //Granular Computing. – 2021. – Т. 6. – №. 3. – С. 507-521.

Информация об авторах:

Кузнецова Альвина Дмитриевна, аспирант кафедры технической кибернетики, БГТУ им. В.Г. Шухова, 308029, г. Белгород, ул. Почтовая, д. 60, кв.72, kuznetsova.alvina@yandex.ru

Белоусов Александр Владимирович, канд. техн. наук, доцент, БГТУ им. В.Г. Шухова, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, ntk@intbel.ru