

УДК 621.313.33

БУРЯКОВСКИЙ С.Г., к.т.н., доцент,
 МАСЛИЙ Ар.С., аспирант, (УкрГАЖТ),
 МАСЛИЙ Ан.С., инженер, (ООО «Укртрансигнал»)

Синтез регуляторов скорости вентильно-индукторного электропривода стрелочного перевода

Основными задачами при разработке вентильно-индукторного привода (ВИП) стрелочного перевода (СП) было создание регулируемого электропривода, что позволит обеспечить возможность варьирования времени перевода. В данной работе ставилась задача синтеза П, ПИ, ПИД-регуляторов скорости, а также нечеткого регулятора. Получены осциллограммы переходных процессов, которые показывают качество работы регуляторов.

Ключевые слова: вентильно-индукторный электропривод, фаззи-регулятор, функция принадлежности.

Введение

В связи с развитием силовой полупроводниковой электроники и микропроцессорной техники в мире с каждым днем все более широкое применение в электроприводах получает достаточно новый тип двигателя вентильно-индукторный (ВИД). Интерес к такой машине со стороны ведущих мировых разработчиков различных систем с электрическим приводом обусловлен многочисленными преимуществами по сравнению с наиболее распространенными асинхронными двигателями (АД) с короткозамкнутым ротором. Однако специфика работы и существенная нелинейность магнитных характеристик двигателя сильно усложняют систему управления ВИД. Как следствие, существующие системы не позволяют получить хороших регулировочных характеристик, и на сегодняшний день ВИД используется, в основном, в установках, не требующих высоких динамических показателей привода.

Актуальность работы

Так как вентильно-индукторный двигатель (ВИД) характеризуется существенными нелинейностями, то для настройки регуляторов не приемлемы стандартные методы, применяемые для регуляторов линейных объектов управления. Поэтому, нахождение и настройка коэффициентов регуляторов будет производиться с использованием ранее полученной математической модели объекта регулирования [1].

Материал и результаты исследований

Система управления ВИД представляет собой систему подчиненного регулирования координат с возможностью использования П, ПИ и ПИД-регуляторов скорости.

В зависимости от типа регулятора его выходная переменная координата $u(t)$ и передаточная функция регулятора $W_p(p)$ определяются следующим образом.

Для П-регулятора:

$$u(t) = K_p e(t), \quad (1)$$

$$W_p(p) = K_p, \quad (2)$$

K_p – коэффициент передачи пропорциональной составляющей.

Для ПИ-регулятора:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt, \quad (3)$$

$$W_p(p) = \frac{K_p p + K_i}{p}. \quad (4)$$

K_i – коэффициент передачи интегральной составляющей.

Для ПИД-регулятора:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (5)$$

$$W_p(p) = \frac{K_d p^2 + K_p p + K_i}{p} \quad (6)$$

K_d – коэффициент передачи дифференциальной составляющей.

Продифференцировав уравнение (3), получим

$$u'(t) = K_p e'(t) + K_i e(t) \quad (7)$$

Перейдя к дискретному времени путём замены производных разницей, получим

$$\frac{u(n) - u(n-1)}{T_E} = K_p \frac{e(n) - e(n-1)}{T_E} + K_i e(n), \quad (8)$$

где T_E – период квантования;
 $n=0,1,2,\dots$ – номер периода квантования.

Из уравнения (8) получим закон функционирования дискретного ПИ-регулятора в виде:

$$u(n) = [K_p \Delta e(n) + T_E K_i e(n)] + u(n-1), \quad (9)$$

$$u(n) = T_E K_i \left[\frac{K_p}{T_E} \Delta e(n) + e(n) \right] + u(n-1), \quad (10)$$

где $\Delta e(n) = e(n) - e(n-1)$.

Уравнение для ПИД-регулятора получим в виде двух параллельно объединённых ПИ и ПД-регуляторов по схеме ПИД=ПИ+ПД. Уравнение (5) разложим на две составляющие:

$$u(t) = u_i(t) + u_d(t), \quad (11)$$

$$u_i(t) = \frac{K_p}{2} e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt; \quad (12)$$

$$u_d(t) = \frac{K_p}{2} e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Осуществив преобразования с выражениями (12) по аналогии с законом ПИ-регулирования, получим закон функционирования дискретного ПИД-регулятора в следующем виде:

$$u(n) = u_i(n) + u_d(n), \quad (13)$$

$$\begin{aligned} u_i(n) &= \left[\frac{K_p}{2} \Delta e(n) + T_E K_i e(n) \right] + u_i(n-1); \\ u_d(n) &= \left[\frac{K_p}{2} e(n) + \frac{K_d}{T_E} \Delta e(n) \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Используя выражения (14), построена структурная схема ПИД-регулятора, которая представлена на рис. 1.

Впервые методику расчета параметров регуляторов предложили Зиглер и Никольс в 1942 году. На сегодняшний день получили распространение два варианта этого метода.

Первый вариант основан на использовании запасов устойчивости. В этом варианте используются результаты экспериментального исследования системы, состоящей из П-регулятора и заданного объекта регулирования. Коэффициент передачи K_p П-регулятора увеличивается до тех пор, пока на выходе системы не установятся колебания с постоянной амплитудой, то есть система не окажется на границе устойчивости. Фиксируется и обозначается через K_p' значение коэффициента передачи регулятора, при котором система находится на границе устойчивости. Измеряется период T установившихся в системе колебаний. Значения параметров регулятора выбранного типа рассчитываются по формулам, приведенным в табл. 1.

Таблица 1

Расчет параметров регулятора по первому методу Зиглера-Николяса

	K_p	K_i	K_d
П-регулятор	$0,5K_p'$		
ПИ-регулятор	$0,45K_p'$	$\frac{0,54K_p'}{T'}$	
ПИД-регулятор	$0,6K_p'$	$\frac{1,2K_p'}{T'}$	$0,075K_p' T'$

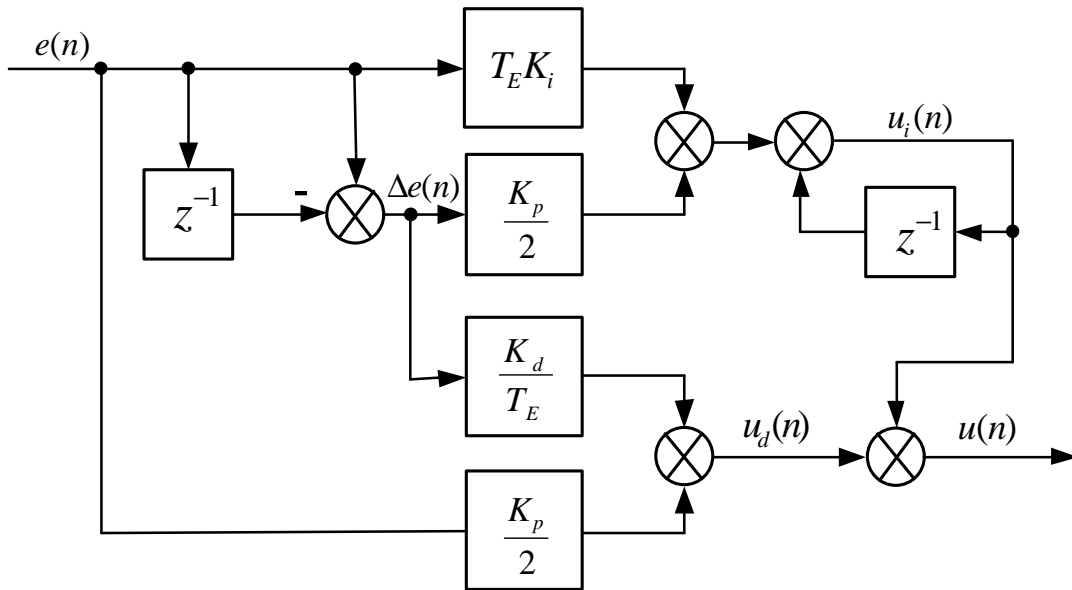


Рис. 1. Структура дискретного ПИД-регулятора

Во втором варианте используется реакция объекта управления на ступенчатое воздействие. Объекты управления, имеющие аperiodическую кривую разгона, как на рис. 2, аппроксимируются последовательным соединением аperiodического и запаздывающего звеньев.

регулятора. В частности в модели объекта управления присутствуют параметры, идентифицированные с некоторой погрешностью. Подстройку можно выполнить на основе правил. Эти правила получены из опыта, теоретического анализа и численных экспериментов.

После подстройки коэффициенты П, ПИ, и ПИД-регуляторов принимают вид, показанный на рис. 3.

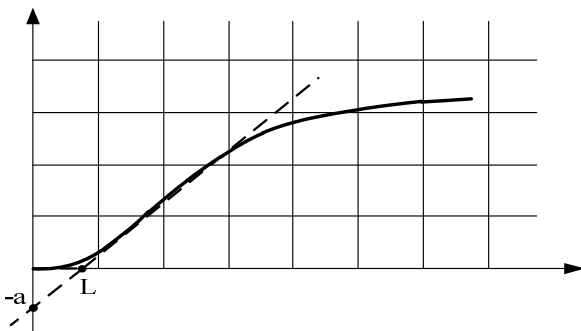


Рис. 2. Кривая разгона объекта управления

Для расчета регуляторов по второму методу Зиглера-Никольса используются всего два параметра: a и L . Формулы для расчета коэффициентов сведены в табл. 2.

После расчета параметров регулятора обычно требуется его ручная подстройка для улучшения качества регулирования, поскольку используемые методы не могут дать оптимальной настройки

Таблица 2

Расчет параметров регулятора по второму методу Зиглера-Никольса

	K_p	K_i	K_d
П-регулятор	$\frac{1}{a}$		
ПИ-регулятор	$\frac{0,9}{a}$	$\frac{1,5L}{K_p}$	
ПИД-регулятор	$\frac{1,2}{a}$	$\frac{0,9L}{K_p}$	$\frac{0,5L}{K_p}$

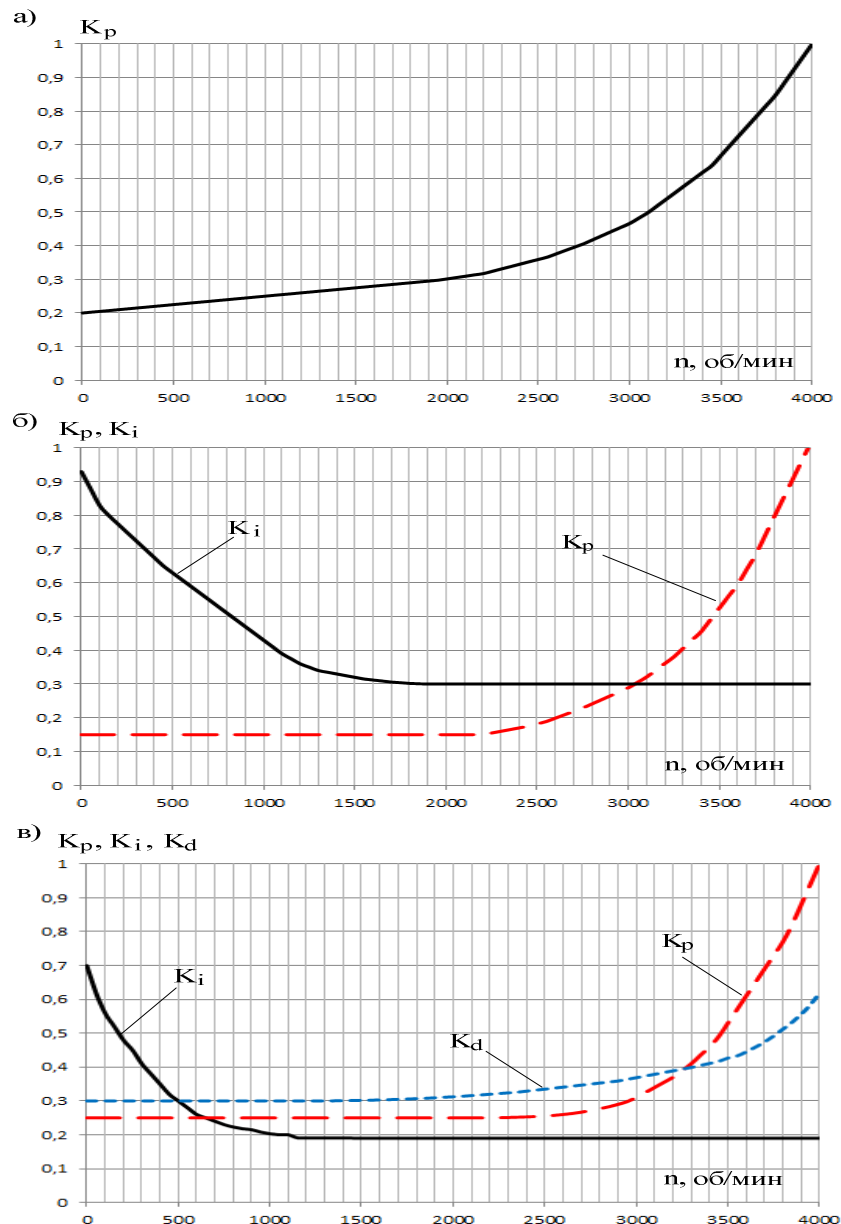


Рис. 3. Значения коэффициентов:

а) для П-регулятора; б) для ПИ-регулятора; в) для ПИД-регулятора

С учетом вышесказанного, структура ПИД-регулятора представлена на рис. 4. Однако регуляторы скорости, описанные выше, имеют недостаточно высокие показатели качества при управлении нелинейными и сложными системами. Характеристики регуляторов в некоторых случаях можно улучшить с помощью методов нечеткой логики. Под нечетким управлением (Fuzzy Control) понимается область применения общей методологии теории нечетких множеств и нечеткой логики для решения практических задач управления. В свою очередь нечеткая логика является обобщением классической

логики и теории множеств. Нечеткое управление возникло как технология, способная расширить возможности автоматизации производства, и предназначена для решения прикладных задач в области управления, которые в общем случае могут быть реализованы с помощью программируемых контроллеров.

Для построения фаззи-регулятора была использована выше полученная структура дискретного ПИД-регулятора. Структура нечеткого ПИД-регулятора представлена на рис. 5.

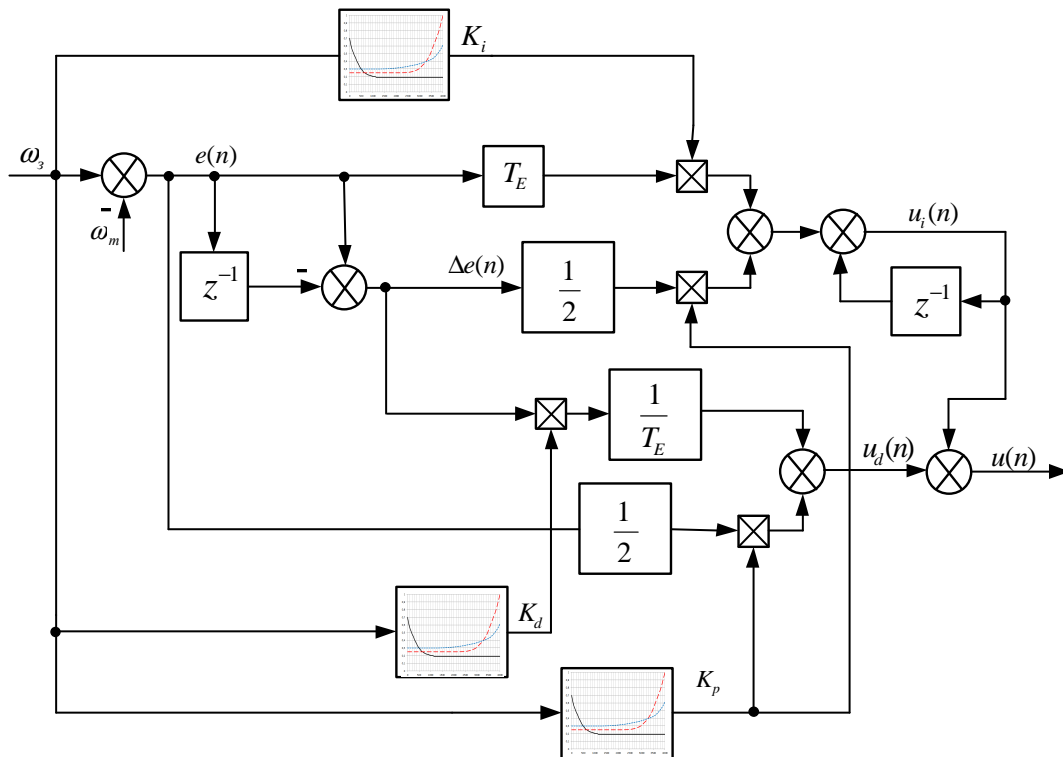


Рис. 4. Структура ПИД-регулятора скорости

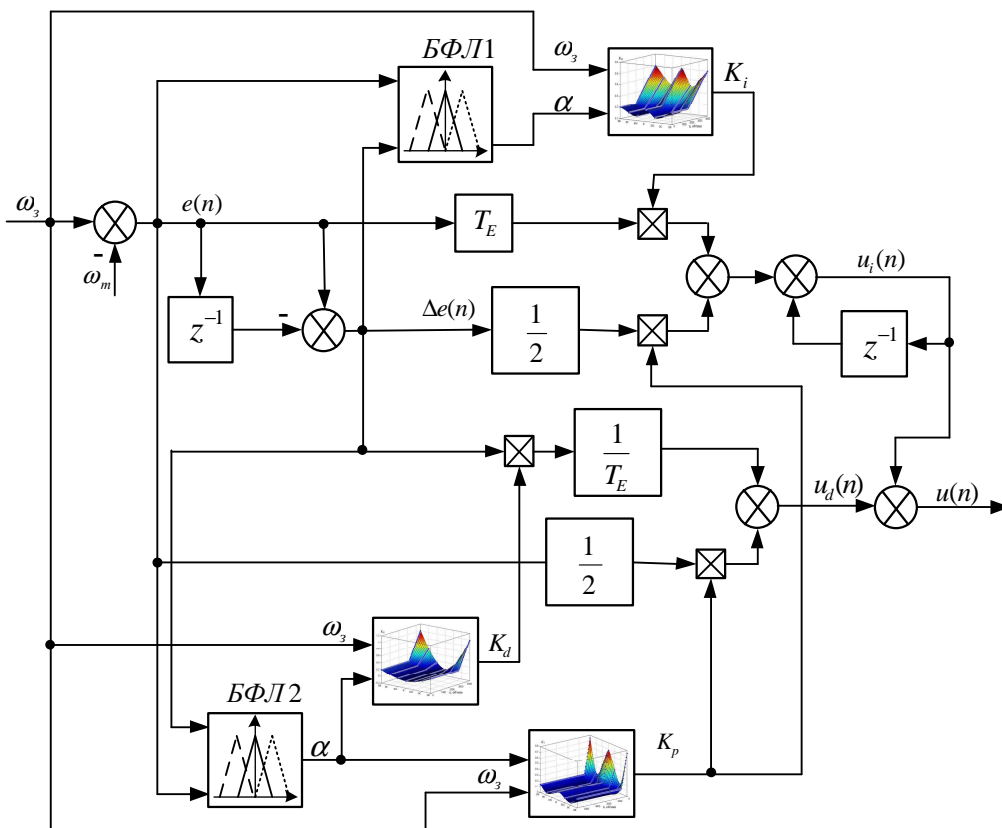


Рис. 5. Структурная схема нечеткого ПИД-регулятора

В блоке фаззи-логики (БФЛ) осуществляется три этапа обработки информации: фаззификация, инференция, дефаззификация.

Для применения методов нечеткой логики прежде всего необходимо преобразовать обычные четкие переменные в нечеткие. Процесс такого преобразования называется фаззификацией. Диапазон

изменения переменных $e(t)$ и $de(t)/dt$ разбивается на множества (подмножества), в пределах каждого из которых строится функция принадлежности переменных $e(t)$ и $de(t)/dt$ каждому из множеств. На рис.6 функции принадлежности, состоящие из семи лингвистических термов ($BB, BC, BM, H, DM, DC, DB$), предлагается задать в форме треугольника.

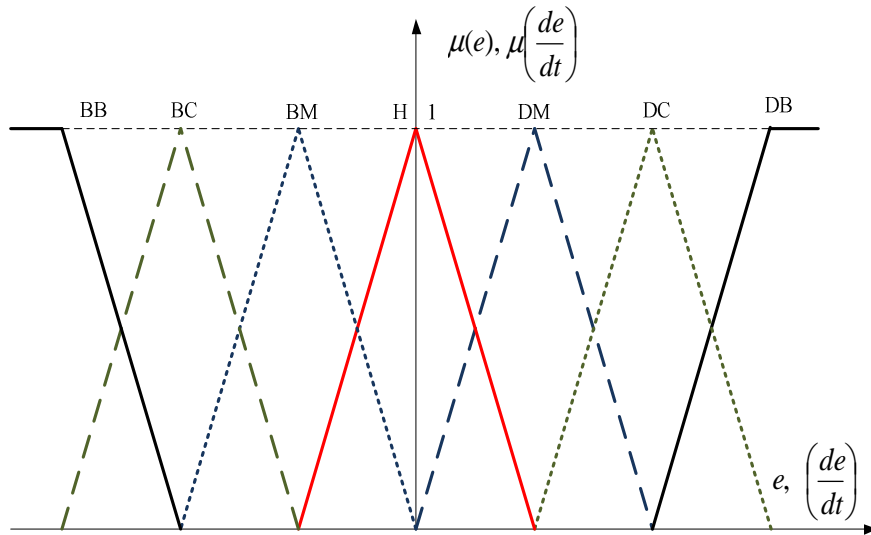


Рис. 6. Распределения функций принадлежности ошибки и скорости ее изменения

Задачей инференции, которая в свою очередь состоит из агрегации, импликации и аккумуляции, есть формирование выходного фаззи-множителя на основе

логических правил. База правил, примененная в нечетком ПИД-регуляторе представлена в табл. 3.

Таблица 3

Таблица нечетких правил

		Значение $\mu N(u1,0)$						
		BB	BC	BM	H	DM	DC	DB
Значение $\mu N(0, u2)$	DB	H	DM	DC	DB	DB	DB	DB
	DC	BM	H	DM	DC	DB	DB	DB
	DM	BC	BM	H	DM	DC	DB	DB
	H	BB	BC	BM	H	DM	DC	DB
	BM	BB	BB	BC	BM	H	DM	DC
	BC	BB	BB	BB	BC	BM	H	DM
	BB	BB	BB	BB	BB	BC	BM	H

Задачей дефаззификации есть преобразование аккумулярованного фаззи-множителя на четкую однозначную величину на выходе фаззи-блока. Существует несколько методов дефаззификации, один из которых, например, метод среднего центра представлен ниже.

$$\alpha = \frac{\int u \mu(u) du}{\int \mu(u) du}, \quad (15)$$

где α – выходная координата; $\mu(u)$ – степень принадлежности активированного терма; u – активированный терм.

С использованием математической модели ВИД [1], коэффициентов ПИД-регулятора (рис. 7), а также таблицы нечетких правил были получены коэффициенты нечеткого ПИД-регулятора. Они представляют собой трехмерные функции и после ручной подстройки показаны на рис. 7 - 9.

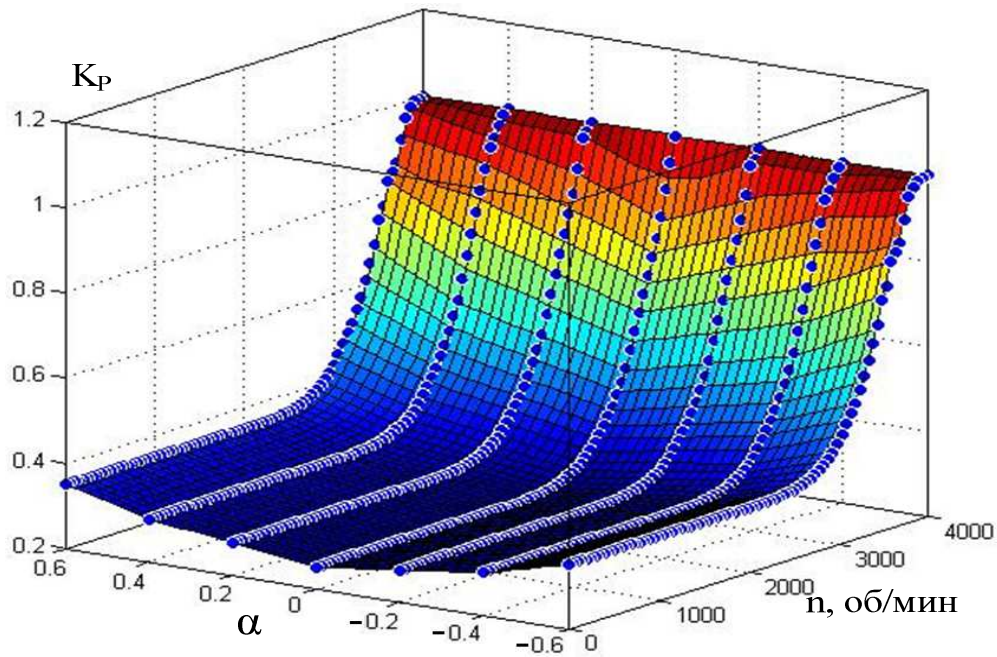


Рис. 7. Распределение коэффициента пропорционального звена нечеткого ПИД-регулятора

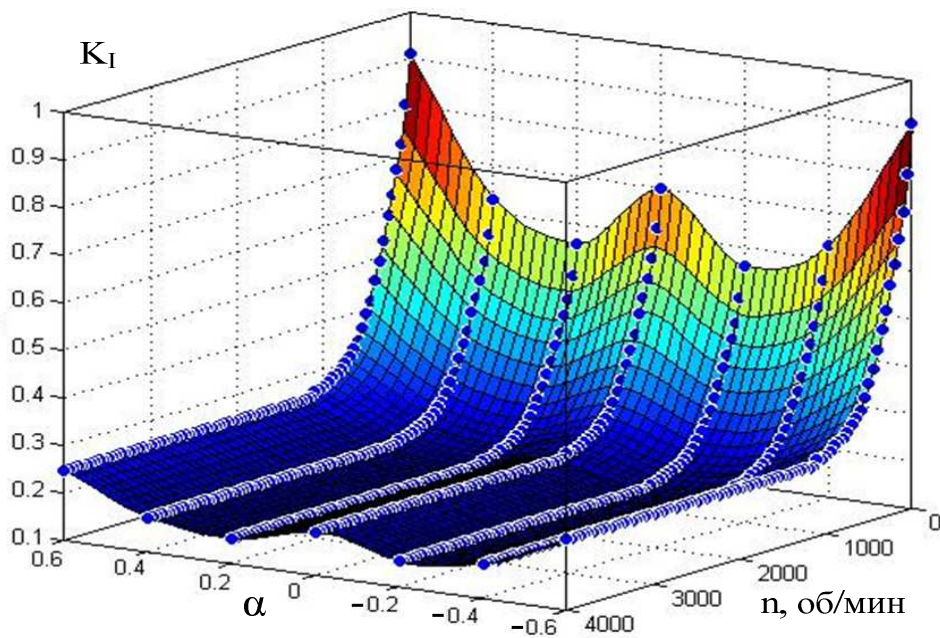


Рис. 8. Распределение коэффициента интегрального звена нечеткого ПИД-регулятора

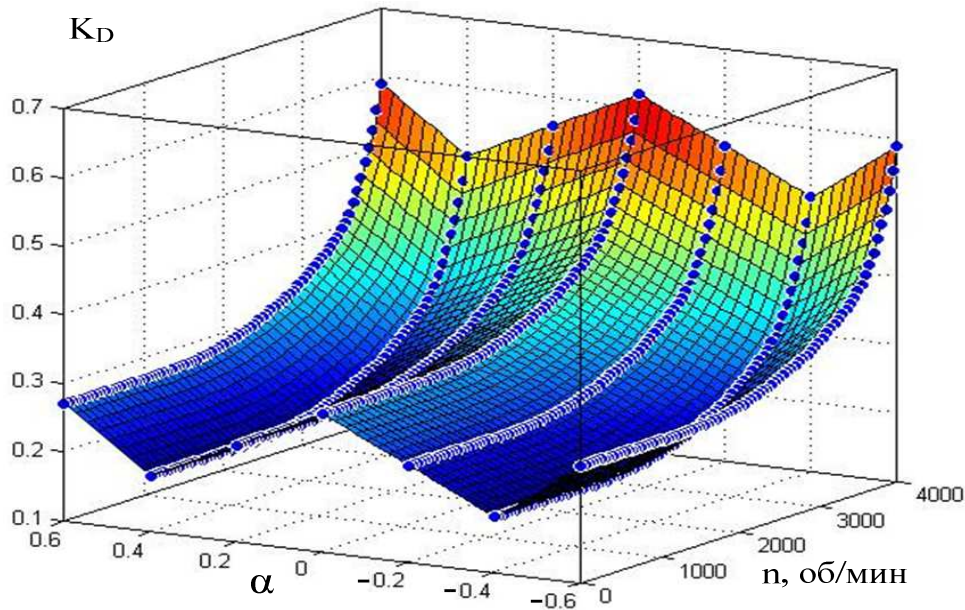


Рис. 9. Распределение коэффициента дифференциального звена нечеткого ПИД-регулятора

Для анализа работы синтезированных регуляторов скорости были созданы их математические модели, на основании которых получены осциллограммы работы двигателя при постоянной нагрузке (характеристики фазного тока, электромагнитного момента и скорости) (рис. 10). Выход двигателя на заданную скорость происходит без перерегулирования. Также в момент времени 0,6 с. к машине прикладывался дополнительный момент сопротивления. При этом просадки скорости для нечеткого ПИД-регулятора по сравнению с ПИ и ПИД-регуляторами практически не просматривается, что в свою очередь характеризует качество его работы.

Выводы

Применен метод Зигнера-Никольса для синтеза ПИ и ПИД-регуляторов скорости ВИП, получены функции распределения коэффициентов. Построены осциллограммы переходного процесса скорости, которые показывают качество работы регуляторов. Синтезирован ФПИД-регулятор скорости, создана база нечетких правил, получены функции распределения коэффициентов в виде трехмерных поверхностей. Представлены характеристики работы двигателя с нечетким ПИД-регулятором. На полученных осциллограммах показан характер его работы и доказана высокая эффективность в сравнении с традиционными регуляторами.

Литература

1. Любарский Б.Г. Математическая модель реактивного индукторного трехфазного электромеханического преобразователя / Б.Г. Любарский, А.С. Маслий, С.Г. Буряковский, Н.А. Гордеева // Вісник НТУ «ХПІ» – 2012. – с.95-105.
2. Буряковский С.Г. Оптимизация системы управления вентильно-индукторного двигателя для стрелочного перевода / С.Г. Буряковский, Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий, Б.Г. Любарский, А.В.Шевкунова // Вестник РГУПС – 2013. – с.61-67.
3. Рымша В. В. Моделирование и синтез реактивных и индукторных электромеханических преобразователей : дис. д-ра техн. наук : 05.09.01 /Рымша Виталий Викторович. – Одесса, 2004. – 323 с.
4. Гулый М.В. Вентильно-реактивный электродвигатель для аппаратов искусственной вентиляции лёгких: дис. к.т.н.: 05.09.01 / Гулый Михаил Викторович. Одесса, 2010. – 169 с
5. Rasmussen Peter Omand Design and Advanced Control of Switched Reluctance Motors / Rasmussen Peter. - Denmark : Aalborg University, 2002. – 256 p.

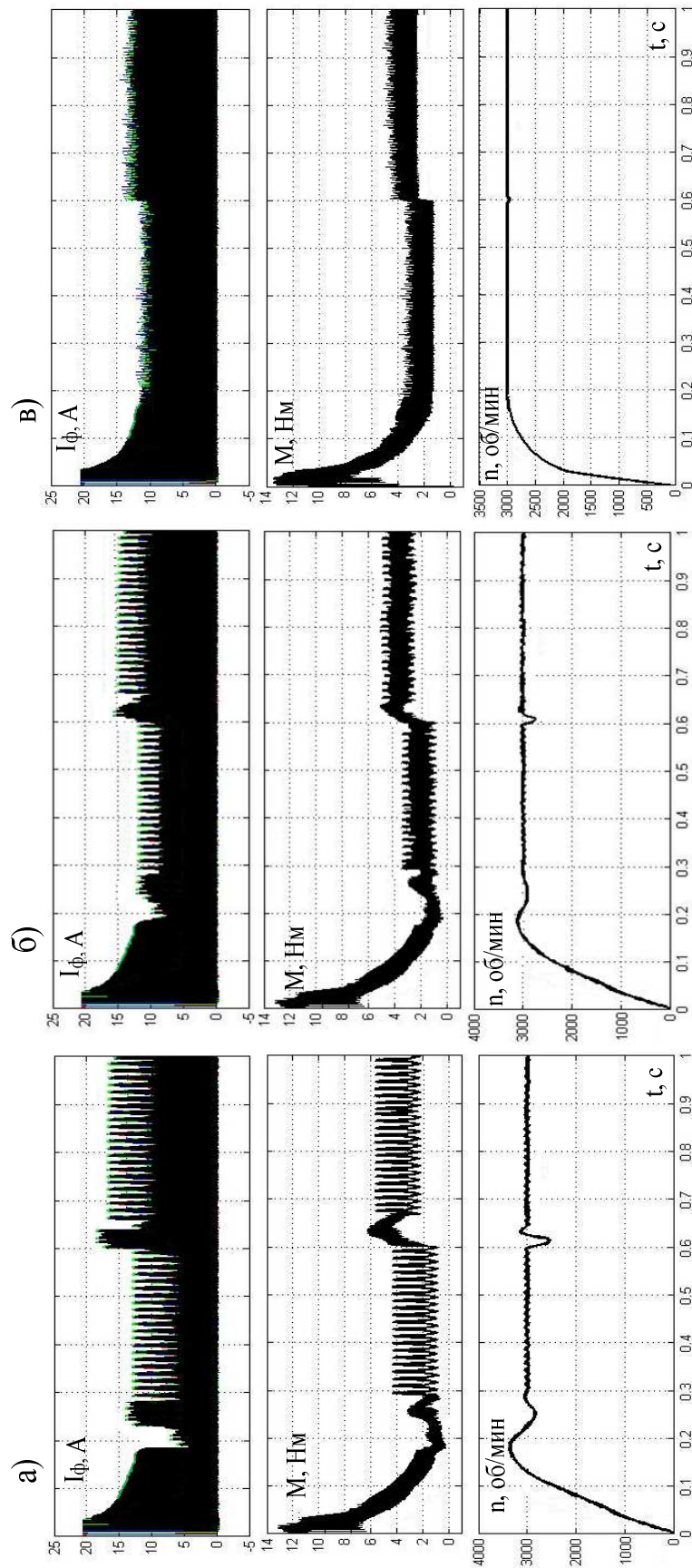


Рис. 10. Осциллограммы работы двигателя с различными регуляторами скорости:
 а) с ПИ-регулятором; б) с ПИД-регулятором; в) с нечетким ПИД-регулятором

С.Г. Буряковський, Ар.С. Маслій, Ан.С. Маслій,
Синтез регуляторів швидкості вентильно-індукторного електроприводу стрілочного переводу. Основним завданням при розробці вентильно-індукторного приводу (ВІП) стрілочного переводу (СП) було створення регульованого електроприводу, що дозволить забезпечити можливість варіювання часу переведення. В цій роботі ставилося завдання синтезу П, ПІ, ПІД- регуляторів швидкості, а також нечіткого регулятора. Отримані осцилограми перехідних процесів, які показують якість роботи регуляторів.

Ключові слова: вентильно-індукторний електропривід, фазі-регулятор, функція приналежності.

S.G. Buryakovskiy, Ar.S. Masliy, An.S. Masliy, B.G. Lyubarskiy. THE SYNTHESIS OF VALVULAR-INDUCTORY ELECTRIC DRIVE SPEED REGULATOR OF RAILROAD SWITCH. The main objectives of the development of railroad switch valvular-inductory electric drive was the creation of a controlled electric drive that will allow varying the time of operation. The task of the synthesis of P, PI and PID speed regulators as well as fuzzy regulator has been set in this paper. Oscillograms of transients that show the quality of regulator operation have been received.

Key words: valvular-inductory electric drive, fuzzy regulator, membership function.

Рецензент д.т.н., професор кафедри «Прибори и методы неразрушающего контроля» НТУ «ХПИ»
Б.М.Горкунов

Поступила 14.01.2014г