5. Максютин Е.В., Головкин А.В. Неоиндустриализация российской экономики на основе технологий четвертой промышленной революции и развития человеческого капитала // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2017. Т. 10. № 1. С. 43–52.
6. Электронный ресурс: <https://www.forbes.ru/brandvoice/sap/345779-chetyre-nol-v-nashu-polzu>
7. Электронный ресурс: <https://www.it.ua/ru/knowledge-base/technology-innovation/industry-4>
8. Электронный ресурс: <https://delo.ua/business/industrija-40-kakie-peremeny-grjadut-na-rynke-uslug-328161/>

Буянкин В.М.

Элементы искусственного интеллекта в системах управления электроприводом с нечеткой логикой

*МГТУ им. Н.Э. Баумана
(Россия, Москва)*

doi: 10.18411/lj-04-2020-21

idsp: ljjournal-04-2020-21

Аннотация

В статье рассматривается проектирование нейрорегулятора с нечеткой логикой. В последние годы резко повысился интерес к новым научным направлениям, с использованием нейронных сетей, которые являются элементами искусственного интеллекта. Нейронные сети позволяют эффективно обрабатывать полученные результаты, проводить достаточно глубокий анализ статических и динамических характеристик, отслеживать появление ошибок и нежелательных режимов технических объектов, имеющих нелинейные нечеткие характеристики (ТОННХ). Преимущество идеи использования нейронных сетей, элементов искусственного интеллекта заключается в нейрооптимизации сложных законов математических моделей ТОННХ с переменными параметрами. Управление ТОННХ классическими методами требует большее количество дифференциальных уравнений, приводящих к увеличению объемов расчетов, увеличению времени их обработки, поэтому классические методы управления не эффективны и не могут существенно повысить быстродействие и точность работы ТОННХ. Проблему улучшения работы ТОННХ возможно решить, разрабатывая новые системы управления нейрорегуляторами с нечеткой логикой.

Введение

Управление ТОННХ классическими методами требует большее количество дифференциальных уравнений, приводящих к увеличению объемов расчетов, увеличению времени их обработки, поэтому классические методы управления не эффективны и не могут существенно повысить быстродействие и точность работы ТОННХ. Проблему улучшения работы ТОННХ возможно решить, разрабатывая новые системы управления нейрорегуляторами с нечеткой логикой, которую впервые предложил ученый математик Лотфи Заде [1].

Механическая часть электропривода, ТОННХ, как правило, включает в себя: редуктор, ходовую винтовую пару (металлорежущий станок с ЧПУ). Реальным механическим передачам присущи нелинейные нечеткие параметры, такие как трение, зазоры и упругие переменные деформации, оказывающие существенное влияние на динамику электропривода. Пренебрежение влиянием упругой деформации на динамические свойства механизма может оказаться недопустимым, особенно в том случае, когда переменный момент инерции механической передачи, приведенной к валу электродвигателя, существенно выше момента инерции якоря электродвигателя. Недопустимость подобного подтверждается на практике: в ряде случаев регуляторы, рассчитанные без учета упругой деформации в механической передаче, не в состоянии обеспечить нормальную работу электропривода – переходные процессы затухают

сравнительно медленно. В ряде случаев теряется устойчивость работы ТОННХ. Переменные нелинейные нечеткие параметры иногда сложно измерить и рассчитать.

Рассмотрим математическую модель ТОННХ на примере металлорежущего станка [2,4]. В качестве исходных данных воспользуемся информацией диаграммы устойчивости скоростного контура электропривода от значения переменных, таких как коэффициент жесткости $L_{1,2n}$, коэффициент демпфирования $H_{1,2n}$, момент инерции механической передачи J_{2n} , рис.1.

Упрощенная механическая часть ТОННХ электропривода изображена на рис. 1 где: B_1 , B_2 – входной и выходной валы звена;

φ_1 , φ_2 – углы поворота входного и выходного валов звена;

J_2 – момент инерции на выходном валу;

$L_{1,2}$ – коэффициент жесткости без инерционного упругого элемента;

$H_{1,2}$ – коэффициент демпфирования, характеризующий наличие внутренних сил вязкого трения в упругом элементе;

$\Delta_{1,2}$ – безинерционный элемент, характеризующий зазор в зацеплении;

ЭЗ – безинерционный элемент зацепления с передаточным числом i .

$$i = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} . \quad (1)$$

Рис.1. Механическая часть ТОННХ электропривода

На первом этапе производится расчет коэффициента жесткости элементов кинематической цепи. При этом учитывается крутильная жесткость, приводимая к эквивалентной жесткости. Коэффициент жесткости рассчитываем по следующей формуле:

$$l = \frac{M_{кр}}{\varphi} , \quad (2)$$

где φ – угловое смещение;

$M_{кр}$ – крутящий момент.

Коэффициент жесткости винта при разных положениях :

Справа $L_{1,2} = 2,02 \cdot 10^{-6}$ [кГ см/ рад]

В центре $L_{1,2} = 2,05 \cdot 10^{-6}$ [кГ см/ рад]

Слева $L_{1,2} = 3,28 \cdot 10^{-6}$ [кГ см/ рад]

Далее производится расчет моментов инерции и масс вращающихся и поступательно движущихся деталей. Для расчета моментов инерции «жестких цилиндрических деталей» удобно воспользоваться готовой таблицей единичных моментов для участков длиной в 1мм с разными диаметрами. Для деталей, обладающих значительной протяженностью вдоль оси и подверженных закручиванию, таких как,

например, ходовой винт, производится определение приведенного момента инерции J_{np} . причем, для различных положений величина J_{np} будет различной.

Для подсчета приведенного момента инерции ходового винта он разбивается по длине на ряд участков. Величина каждого приведенного момента инерции J_{np} определяется по формуле:

$$J_{кр} = \frac{\sum_i^n J_i \varphi_i^2}{\varphi_{кр}^2}, \quad (3)$$

где J_i – момент инерции;

i –ый участок винта;

φ_1, φ_2 – углы закручивания соответственно i -ого участка винта и участка, к которому производится приведение.

Результаты расчета моментов инерции приведены в таблице 1.

Для удобства описания колебаний механической системы уравнениями движения производится приведение всех моментов инерции к якорю электродвигателя в соответствии с величинами передаточных отношений:

$$e^I = e \cdot i^{1/2}; J^I = J \cdot i^2, \quad (4)$$

где e^I и J^I – коэффициент жесткости и момент инерции, приведенные к валу электродвигателя (таблица 2).

Таблица 1

Моменты инерции (исходные данные)

Название элемента	Передаточное отношение	Момент инерции [кг см ²]	
		Натуральный	приведенный
Якорь электродвигателя	1	$2.05 \cdot 10^{-2}$	$2.05 \cdot 10^{-2}$
Ходовой винт при положении			
J слева		$4.2 \cdot 10^{-2}$	$4.2 \cdot 10^{-3}$
J в центре	3.17	$3.25 \cdot 10^{-2}$	$3.25 \cdot 10^{-3}$
J справа		$2.2 \cdot 10^{-2}$	$2.2 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2

Приведенные параметры механической передачи

Приведенные параметры механической передачи			
Момент инерции [кг см ²]	Коэффициент жесткости [кГ м/рад]	Коэффициент демпфирования [кГ см с]	Зазор [рад]
$J_I = 205 \cdot 10^{-4}$ $J_I = 100...400 \cdot 10^{-4}$	$L_{1,2} = 6 \div 24 \cdot 10^{-4}$	$H_{1,2} = 10^2$	$\Delta_{1,2} = 0 \div 6 \cdot 10^{-3}$

На рис.2 представлена двух массовая расчетная схема механической передачи ТОННХ.

Рис. 2. Двух массовая расчетная схема механической передачи ТОННХ

Приведем параметры $L_{1,2}$, $H_{1,2}$, J_2 к безразмерному виду. В качестве базовых единиц возьмем номинальные значения этих параметров.

$$L_{1,2n} = \frac{L_{1,2}}{L_{1,2ном}}. \quad (5)$$

$$H_{1,2n} = \frac{H_{1,2}}{H_{1,2ном}}. \quad (6)$$

$$J_{2n} = \frac{J_{2}}{J_{2ном}}. \quad (7)$$

На рис.3. представлена область устойчивости в зависимости от параметров коэффициента жесткости $L_{12п}$, коэффициента демпфирования $H_{12п}$ и момента инерции механической передачи $J_{2п}$ ТОННХ.

Рис. 3.. Область устойчивости в зависимости от параметров $L_{12п}$, $H_{12п}$, $J_{2п}$

Разработаем систему нечеткого управления для нейрорегулятора скоростного контура электропривода [2,3,6], который будет перестраиваться при изменении таких механических параметров как коэффициент жесткости L_{12} , коэффициент демпфирования H_{12} и момента инерции механической передачи J_2 .

Рассмотрим этапы метода [5] синтеза системы нечеткого управления для нейрорегулятора на базе нечеткой нейронной сети рис. 4:

1. Нейроидентификация с прогнозом статических и динамических характеристик ТОННХ;
2. Формирование нечеткой нейронной сети;
3. Обучение нечеткой нейронной сети;
4. Вывод поверхности параметров для нечетких входных и выходных переменных;
5. Формирование обучающей выборки для нейрорегулятора;
6. Обучение нейрорегулятора;
7. Моделирование и вычисление статических и динамических характеристик с обученным нейрорегулятором;
8. Сравнение статических и динамических характеристик с желаемыми.

Рис. 4. Структурная схема метода синтеза системы нечеткого управления нейрорегулятором на базе нейронной сети

Формирование системы управления нейрорегулятором на базе нейронной сети с нечеткой логикой

Система управления регулятором на базе нейронной сети с нечеткой логикой (рис.5) состоит из пяти слоев.

Слой 1 Input - входной слой нейронной сети для фазификации.

Слой 2 Inputmf - выходы нейронов этого слоя представляют собой значения функций принадлежности при конкретных значениях входов.

Слой 3 Rule - выходами нейронов этого слоя являются степени истинности предпосылок каждого правила базы значений системы. Все нейроны этого слоя могут реализовывать произвольную L- норму для моделирования операции «И».

Слой 4 Outputmf - нейроны этого слоя вычисляют и формируют значения выходов переменных.

Слой 5 Output - нейроны данного слоя выполняют операцию дефазификации.

Рис. 5. Система управления регулятором на базе нейронной сети с нечеткой логикой

Работа системы управления на базе нечеткой нейронной сети описывается уравнениями:

$$\begin{aligned}
 net_i^1 &= x_i^1; \\
 y_i^1 &= f_i^1(net_i^1) = net_i^1; \\
 i &= 1, 2 \\
 net_u^2 &= \frac{(x_i^2 - m_u)^2}{(\sigma_u)^2}; \\
 y_u^2 &= f_u^2(net_u^2) = \exp(net_u^2); \\
 j &= 1 \dots n \\
 net_{ki}^3 &= \prod_k x_u^3; \\
 y_i^3 &= f_k^3(net_k^3) = net_k^3; \\
 k &= 1 \dots l \\
 net_0^4 &= \sum \omega_{ko}^4 x_k^4; \\
 y_i^4 &= f_k^4(net_k^4) = net_k^4,
 \end{aligned} \tag{8}$$

где x_i^1 - первый сетевой ввод;

y_i^1 - первый сетевой вывод;

x_i^2 - второй сетевой ввод;

y_u^2 - второй сетевой вывод;

m_{ij} и σ_{ij} соответственно, среднее и стандартное отклонение функции;

x_u^3 - третий сетевой ввод;

y_i^3 - третий сетевой вывод;

x_i^4 - четвертый сетевой ввод;

y_i^4 - четвертый сетевой вывод;

n - общее количество лингвистических переменных относительно входных узлов.

1. Буянкин В. М., Захаров В. Г. Физические процессы нечеткого управления при обучении нейрорегуляторов токового контура электропривода с мягкими вычислениями // Вестник МАДИ (ГТУ). — 2007. — №2. — С. 72—75.
2. Буянкин В. М., Захаров В. Г. Физические процессы нечеткого управления при обучении нейрорегуляторов токового и скоростного контуров электропривода с мягкими вычислениями. Вестник МАДИ (ГТУ). — 2007. — №3. — С. 102—106.
3. Буянкин, В. М. Синтез нейрорегуляторов с нечеткой логикой для токового и скоростного контура электропривода с мягкими вычислениями // Автоматизация и современные технологии. — 2007. — №11. — С. 19—24.
4. Буянкин В. М., Пантюхин, Д. В. Нечеткое управление нейрорегуляторами для токового и скоростного контуров электропривода // Нейрокомпьютеры разработка и применение. — 2009. — №10. — С. 46—51.
5. Буянкин, В. М. Нейроуправление электродвигателями электроприводами. Издание LAMBERN Academic Publishing Germany, 2015г С. 160.