

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

MODELS AND METHODS FOR LINEAR MOTOR CONTROL IN INDUSTRIAL PROCESSES

**A. Gorozhankin
I. Bezukladnikov**

Summary. Mechatronic systems for various purposes are currently being actively developed. CNC machines, robotic manipulators, three-dimensional printing systems, medical robotics are just some of the typical applications of such devices. A special case of modern mechatronic systems are systems using the so-called Permanent magnet synchronous linear motors. The features of such engines do not allow for high-quality control using classic PID controllers, especially under conditions of random alternating loads and high requirements for the inadmissibility of overshoot, positioning accuracy, etc. This article is devoted to the consideration of algorithms and methods currently used for control systems based on linear motors. In addition, the article also provides a linear motor model performed in the LabView hardware-software (HIL) environment.

Keywords: control system; linear motor; PID-control; fuzzy controller; adaptation models.

Горожанкин Антон Игоревич

Аспирант, Пермский Национальный
Исследовательский Политехнический Университет
gorobrankin@yandex.ru

Безукладников Игорь Игоревич

К.т.н., доцент, Пермский Национальный
Исследовательский Политехнический Университет
corrector@at.pstu.ru

Аннотация. В настоящее время активно развиваются мехатронные системы различного назначения. Станки с ЧПУ, роботизированные манипуляторы, установки трехмерной печати, медицинская робототехника — лишь некоторые типовые сферы применения подобных устройств. Частным случаем современных мехатронных систем являются системы использующие в своей конструкции т.н. синхронные линейные двигатели на постоянных магнитах. Особенности таких двигателей не позволяют обеспечить качественное управление с использованием классических ПИД-регуляторов, особенно в условиях случайных знакопеременных нагрузок и высоких требований к недопустимости перерегулирования, точности позиционирования и т.д. Данная статья посвящена рассмотрению алгоритмов и методов, используемых в настоящее время для систем управления на основе линейных двигателей. Кроме того, в статье также приводится модель линейного двигателя, выполненная в среде аппаратно-программного (HIL) моделирования LabView.

Ключевые слова: система управления; линейный двигатель; ПИД-регулирование; нечеткое регулирование; адаптивные модели.

В настоящее время, с развитием промышленных систем автоматического управления технологическими процессами и производствами на основе устройств, обеспечивающих линейное перемещение, обуславливается сложностью корректной реализации как методов управления, так и конструктивной части данных механизмов. Одним из перспективных мехатронных устройств, требующих таких методов является линейный двигатель на постоянных магнитах (ЛДПМ). Подобные приводы способны обеспечивать решение широкого спектра промышленных задач. Они используются в производстве, промышленных роботах, манипуляторах, конвейерах, ЧПУ-станках и других технологических оборудованьях. Преимущество линейного

двигателя заключается в том, что он обеспечивает передачу усилия непосредственно к полезной нагрузке без преобразования вращательного движения в поступательное [3, с. 70]. Сложность корректной реализации мехатронных систем управления на основе линейного двигателя связана с особенностями их конструкции, стоимостью компонентов и требованиями к их управлению.

Сложность поставленной задачи характеризуется тем, что стандартные методы управления не способны адаптироваться к резко изменяющейся знакопеременной нагрузке, сохранять работоспособность при выходе из строя одного или нескольких датчиков обратной

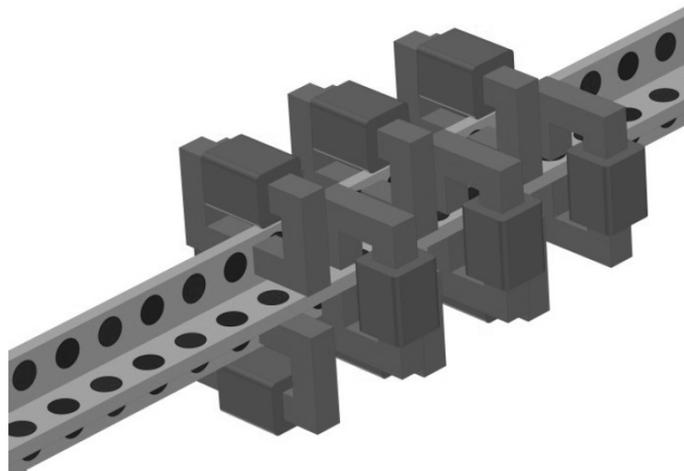


Рис. 1. Конструкция линейного двигателя, предлагаемая Saman Ahmadi

связи. К стандартным методам относятся классические системы управления (ПИД-регулирование). Расцвет ПИД-регуляторов начался после 1980 года с развитием микропроцессоров. В 2006 году количество патентов составило около 364 шт [1, с. 74]. ПИД-регуляторы нашли своё широкое применение не только в технологических процессах, но и в теплотехнических, гидродинамических и массообменных. Их основное преимущество заключается в простоте построения и практического применения, настройки, а также невысокой стоимости в совокупности с пригодностью для решения большого спектра промышленных задач. Денисенко, в своей работе [1, с. 67] говорит, что среди ПИД-регуляторов 64% занимают одноконтурные регуляторы и 36% — многоконтурные [14, с. 50]. Контроллеры с обратной связью охватывают 85% всех приложений, контроллеры с прямой связью — 6% и контроллеры, соединенные каскадно — 9% [14, с. 42].

Сегодня, рынок автоматизированных систем управления технологическими процессами должен предоставить конкурентоспособный продукт, который отвечает самым современным требованиям. Необходимо обеспечить баланс между оптимальными алгоритмами регулирования как с коммерческой, так и с технической стороны. Увеличение производительности и экономичности должно позволить уменьшить усилия на поддержку функционирования новых технологий и возможности масштабирования, при этом

В связи с этим, данные требования рынка к качеству регулируемых процессов и сложности проектирования объектов управления, привели к появлению большого количества модификаций ПИД-регуляторов и новых конструкций линейных двигателей, адаптивных к данным методам.

На данный момент существуют следующие виды модификации ПИД-регуляторов [2, с. 80]:

1. Регулятор с весовыми коэффициентами при установке
2. Регулятор с формирующим фильтром для сигнала установки
3. Принцип разомкнутого управления
4. Регулятор отношений
5. Регулятор с внутренней моделью
6. ПИД-регуляторы для систем с транспортной задержкой. Предиктор Смита

Каждый из них подбирается для конкретной задачи отдельно. При своих достоинствах, все методы обладают одним общим недостатком — обязательное наличие правильно определенной математической модели объекта управления. Математическое описание объекта должно содержать в себе совокупность критериев, допущений, уравнений, которые описывают законы изменения выходных параметров от входных. Линейные двигатели являются сложными физическими объектами, у которых сложно определить точное математическое описание. Использование различных принципов ПИД-регулирования возможно при модернизированной конструкции линейных двигателей. В работах [4; 20, с. 290; 19, с. 1665; 16, с. 4] рассматриваются различные конструкции линейных двигателей. Saman Ahmadi и Mojtaba Mirsalim в своей работе [4] предлагают новую конструкцию линейного двигателя для задачи линейного перемещения в 3D-принтере. На рисунке 1 представлена конструкция их линейного двигателя с цилиндрическими постоянными магнитами и поперечным потоком в С-образных модулях. По данным исследования [4], данная конструкция обладает преимуществом с точки зрения управления (уменьшается общее гармоническое искажение), высо-

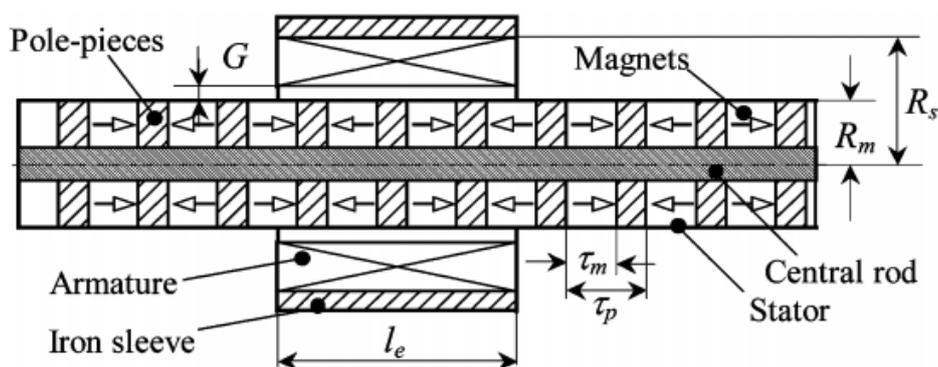


Рис. 2. Усовершенствованная конструкция линейного двигателя с постоянными магнитами, предложенная Wang, J.B.

кой скорости и низкой пульсацией момента, что делает данный линейный двигатель применимым для работы в 3D-принтерах, в которых требуется высокая точность позиционирования.

В работе [20, с. 291] авторы анализируют и разрабатывают улучшенную конструкцию для аксиального намагниченного трубчатого механизма с постоянными магнитами, представленным на рисунке 2. Данная конструкция имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционной топологией. Во-первых, такая конструкция устраняет необходимость в немагнитной трубке, которая содержит магниты и полюсной наконечник. Это приводит к уменьшению влияния воздушного зазора между статором и якорем на магнитные характеристики, которые позволяют более гибко управлять таким двигателем. Во-вторых, уменьшается количество постоянных магнитов, что приводит к уменьшению стоимости разработки данного двигателя.

Также, значимыми работами, связанными с исследованием конструкции линейных двигателей с постоянными магнитами, являются работа [18, с. 14] авторов Won-jong Kim, Bryan C. Murphy и [16, с. 2] Songhan Pan, Philip Anthony Commins, Haiping Du. Работа [18, с. 15] посвящена разработке нового линейного двигателя, способного к быстрому, плавному, точному позиционированию в диапазоне 10 см. Двигатель состоит из постоянных магнитов, намагниченных в осевом направлении. Также в работе определены уравнения коммутации, связывающие трехфазные токи как функцию положения и выходной силы. Во второй работе [16, с. 3] предлагается метод определения положения датчика Холла для трубчатого линейного двигателя с постоянными магнитами. Преимущество предлагаемой системы обнаружения позиции с использованием датчика Холла заключается в ее низкой стоимости, простоте и удобстве с приемлемой точностью.

В ходе анализа перечисленных статей можно выделить общие тенденции развития конструкций линейных двигателей с постоянными магнитами: 1) снижение стоимости производства, при этом с лучшими магнитными характеристиками; 2) Увеличение усилия при небольших размерах конструкции; 3) Возможность использования новых методов и алгоритмов для управления любой из представленных модификаций. 4) Возможность применения классических методов регулирования, в связи с устранением сложности и конструкции.

Таким образом желательно, чтобы создаваемая система управления линейным двигателем на постоянных магнитах была пригодна для любой из перечисленных топологий и конструкций. Альтернативным подходом является разработка и модификация конструкций линейных приводов с целью упрощения задачи управления ими и реализации недорогой системы управления с требуемыми показателями качества. За счет упрощения конструкции становится возможным применять классические модели и методы регулирования.

Важными работами с различными топологиями линейных двигателей являются [6, с. 9; 9; 12; 10; 11, с. 72; 17, с. 54] Предложенные конструкции характеризуются следующими общими подходами к разработке:

- ◆ Легкость обеспечения повторяемости конструкции двигателя и простоты изготовления
- ◆ Минимизация вычислительной мощности, требуемой для реализации алгоритмов управления (упрощение алгоритмов)
- ◆ Максимизация развиваемого усилия
- ◆ Увеличение скорости и точности перемещения
- ◆ Увеличение помехозащищенности, реализация успешного управления двигателем в условиях отказа одного или нескольких датчиков обратной связи

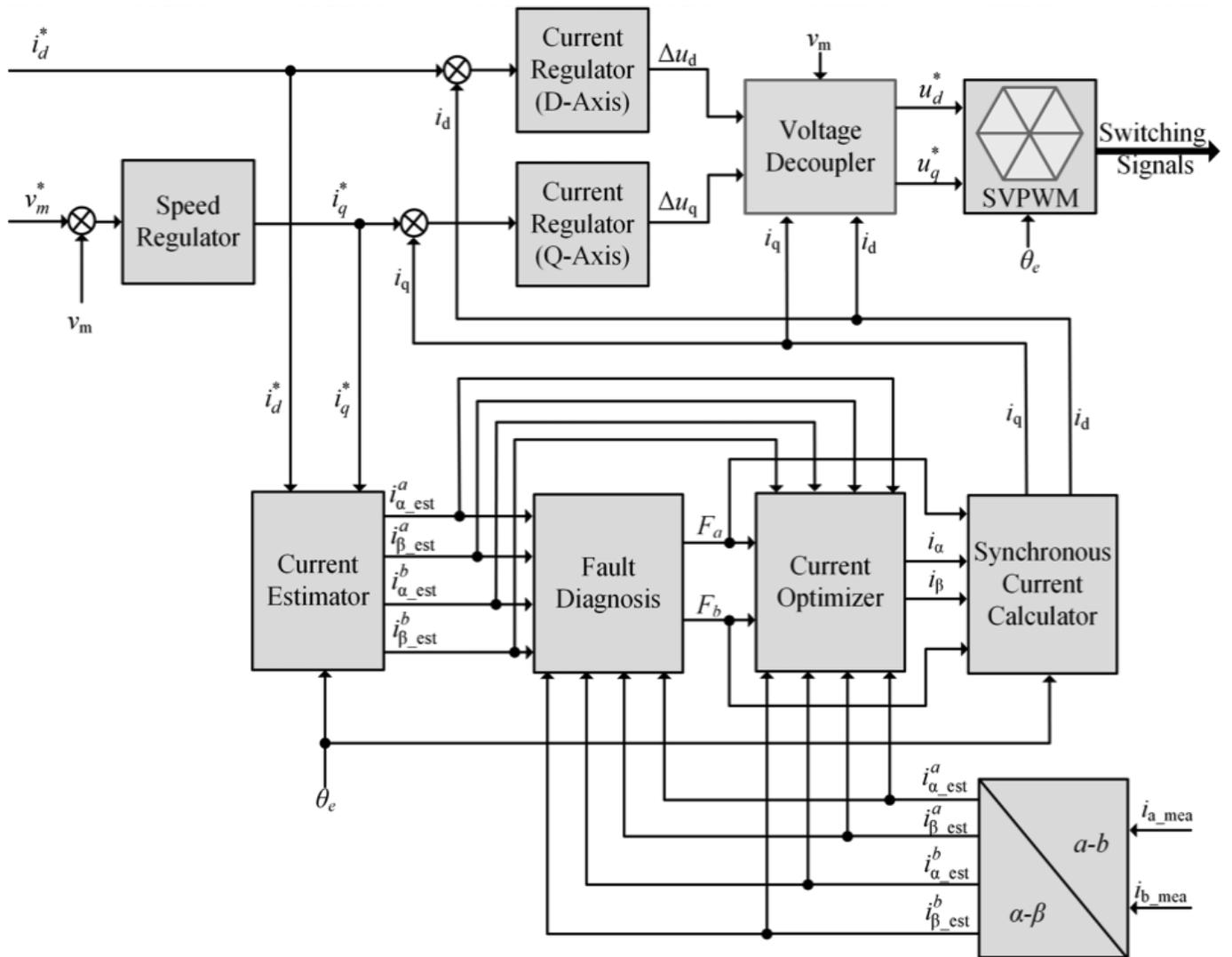


Рис. 3. Отказоустойчивая система работы линейного двигателя в метрополитене в работе Wei Wang

Как уже было отмечено, сложность корректной реализации автоматической системы управления для линейных двигателей, связана с нелинейностью объекта управления.

Для систем управления, где объект управления является нелинейным, можно использовать следующие методы:

- ◆ Нейронное регулирование
- ◆ Нейро-нечеткое управление
- ◆ Регулирование с использованием генетических алгоритмов

Нечеткое управление (управление на основе методов теории нечетких множеств) [2, с. 82] применяется, когда знаний об объекте управления недостаточно. Наличие опыта, физической модели исследования, проведения экспериментов для нелинейных систем, в которых иден-

тификация невозможна или слишком трудоемка, необходимо использовать знания эксперта, исходя из условия задачи [5, с. 554].

При сложном описании математической модели, также используются нейронные сети. Особенность нейронных сетей заключается в способности обучения системы. Это позволяет передать нейронной сети опыт эксперта. Такие сети используются для построения ПИД-регуляторов путем построения как отдельного регулятора, так и для построения блока настройки коэффициентов.

Регулятор с нейронной сетью похож на регулятор с табличным управлением, однако отличается специальными методами настройки («обучения»), разработанными для нейронных сетей, и методами интерполяции данных [2, с. 73].

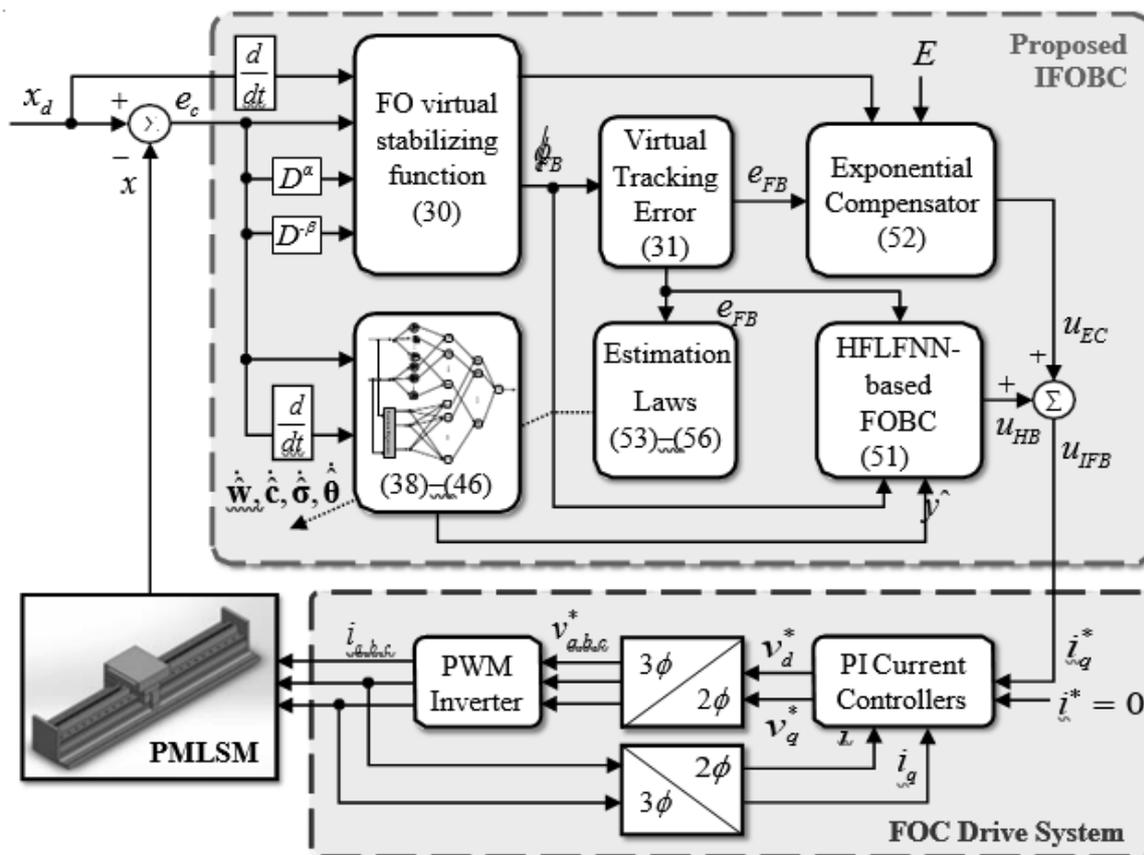


Рис. 4. Схема управления линейным двигателем, использующий предложенный метод Syuan-Yi Chen

Одной из разновидностей нейро-нечеткого регулирования, являются генетические алгоритмы [20, с. 290]. Они являются мощным методом оптимизации, позволяющим найти глобальный оптимум быстрее, чем другие методы случайного поиска. Существенным их достоинством является отсутствие проблем со сходимостью и устойчивостью. Эти методы используются для идентификации моделей объектов управления, для поиска оптимальных параметров регулятора, для поиска оптимальных положений функций принадлежности в фаззи-регуляторах и для обучения нейронных сетей. Чаще всего генетические алгоритмы используются совместно с нейронными сетями и регуляторами с нечеткой логикой [2, с. 79].

Сегодня, основными работами, описывающими функционирование таких систем являются [21, с. 10547; 19, с. 230]. В первом случае используется векторное управление линейным двигателем в случае выхода из строя одного из датчиков тока поездного состава в метрополитене. На рисунке 3 представлена схема отказоустойчивой системы [10, с. 10547]. Её особенностью является наличие блоков Current estimator — блок для оценки тока, Fault diagnosis — блок определения неисправности

и current optimizer — блок, который определяет конечное значение токов по осям α и β , с учетом как оцененных, измеренных токов, так и в случае неисправности датчика.

В работе [19, с. 220] используется гибридная система управления (см. рисунок 4), которая включает в себя нейро-нечеткое управление на основе полинома Эрмита, чтобы улучшить производительность моделирования и эффективность обучения традиционных векторных систем управления, сохраняя при этом философию FNN, предлагается новый алгоритм на основе полинома Эрмита, который сочетает в себе преимущества функций FNN, FLNN и Hermite.

Ранее, в работах [7, с. 552, 8, с. 130], была определена упрощенная математическая модель линейного двигателя:

$$\frac{d^2y}{dt^2} + 2,85 \frac{dy}{dt} + 1,85y(t) = 1,85x(t) \quad (1)$$

На рисунке 5 представлено моделирование полученной математической модели в программе Labview с использованием классического ПИД-регулятора. Пе-

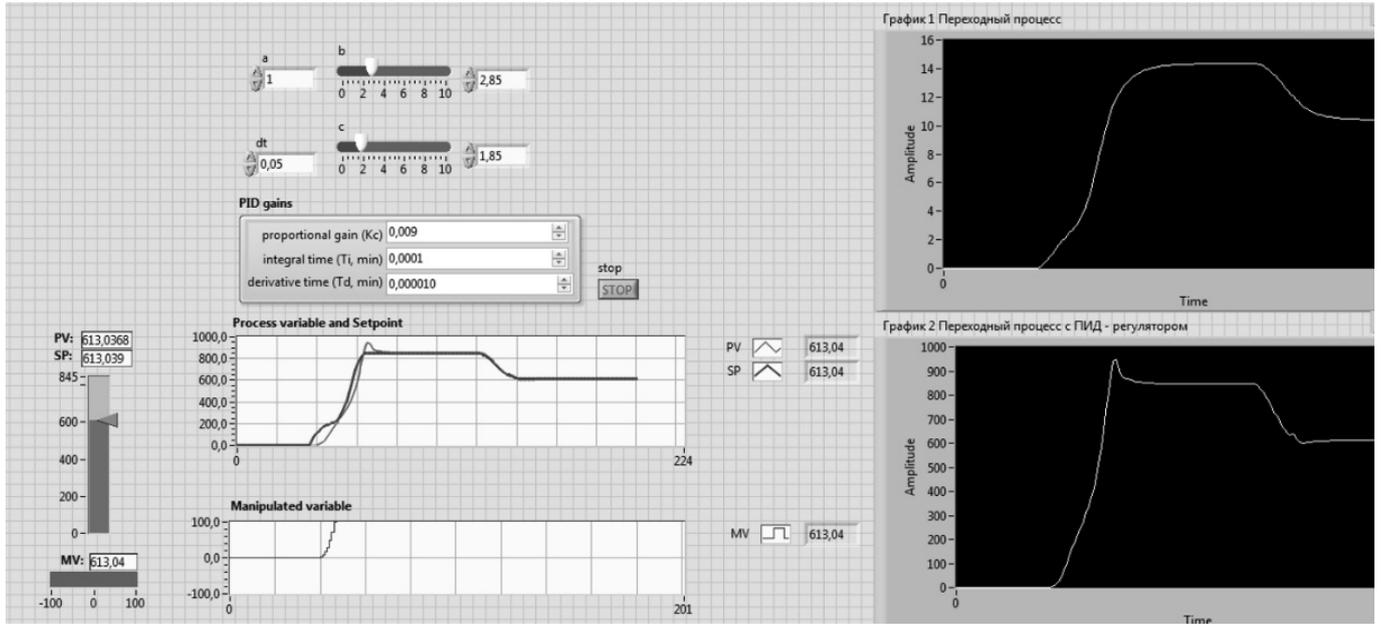


Рис. 5. Моделирование классического ПИД-регулятора

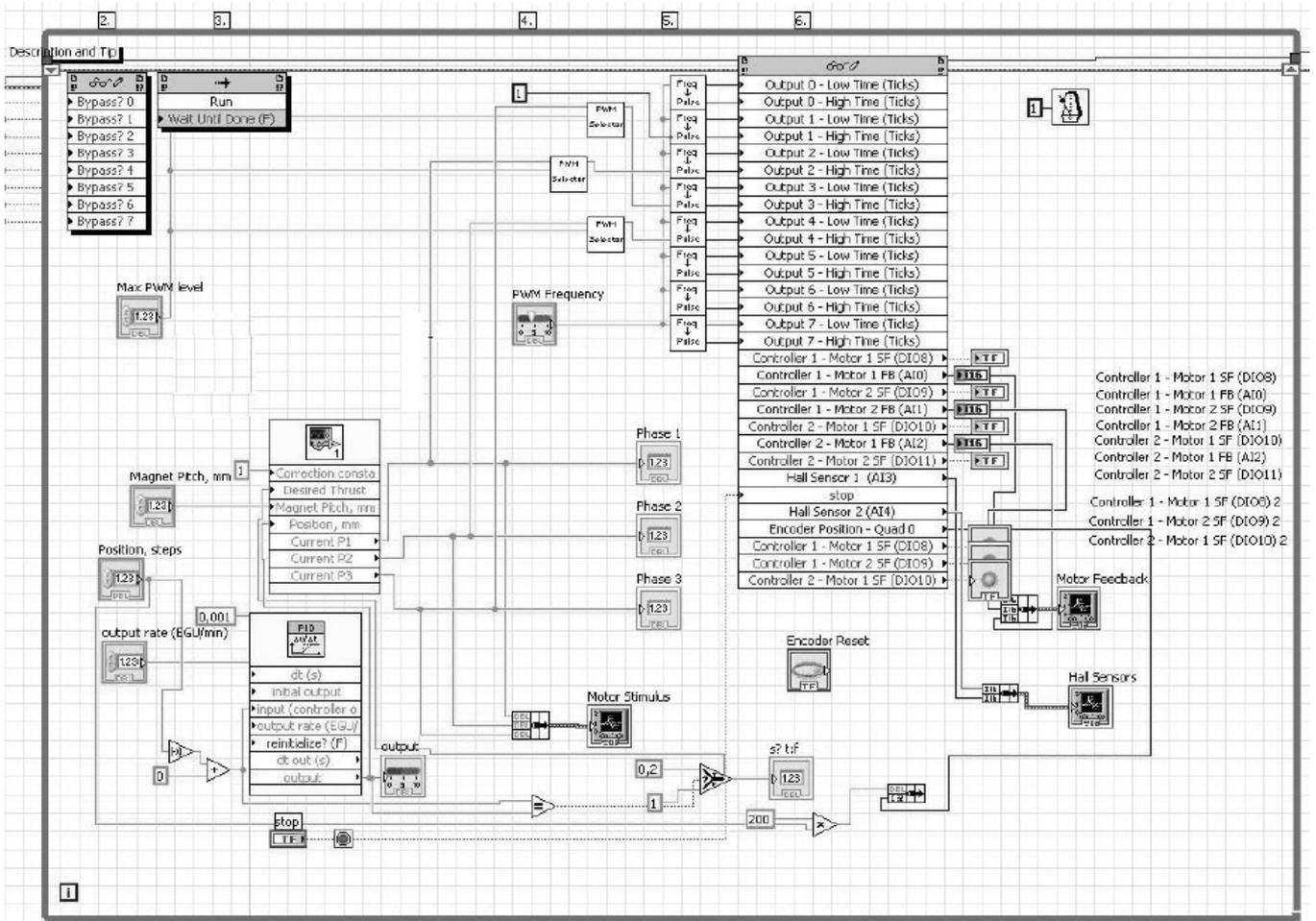


Рис. 6. Разработанный нейро-нечеткий регулятор с упрощенной математической моделью

реходный процесс имеет большое перерегулирования и большое время переходного процесса. Данная модель не учитывает изменяющиеся параметры работы линейного двигателя, поэтому было принято решение разработать нейро-нечеткий регулятор, представленный на рисунке 6.

Моделирование показывает, что предложенный регулятор, при одинаковом математическом описании, на 14% работает лучше, чем классический ПИД-регулятор. При этом, нейро-нечеткий регулятор имеет ряд преимуществ, таких как адаптивность, отсутствие необходимости математической модели и возможности проведения экспериментов на реальном объекте.

В заключении, необходимо отметить, что основными критериями для разработки системы управления мехатронными системами на основе линейного

двигателя являются простота конструкции и способность быстрой реакции системы на возмущения. В данной статье были кратко рассмотрены классические ПИД-регуляторы, определены их недостатки. Подтверждена актуальность исследования как самих линейных приводов, так и систем управления на их основе. Были рассмотрены и проанализированы работы, которые указывают на актуальность разработки новых методов и алгоритмов регулирования системы управления на основе линейного двигателя.

В дальнейшем, планируется разработать простую конструкцию линейного двигателя с датчиками Холла, в качестве обратной связи. Провести эксперименты с использованием разработанного нейро-нечеткого регулятора. Исследовать влияния различных активационных функций для достижения наилучших показателей качества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисенко В. ПИД — регуляторы: принципы построения и модификации. Ч. 1. // Современные технологии автоматизации. 2006. № 4.
2. Денисенко В. ПИД — регуляторы: принципы построения и модификации. Ч. 2. // Современные технологии автоматизации. 2007. № 1.
3. Католицкий Н. А. Линейный электродвигатель // Nauka-rastudent.ru. 2015. No. 04 (16) / [Электронный ресурс]. Режим доступа. URL: <http://naukarastudent.ru/16/2541/>
4. A Novel Quad-Leg Transverse-Flux Permanent Magnet Linear Motor for 3-D Printer Applications.
5. Antineskul A.V. "Novel algorithm for mover position measurement in linear motion systems". Soft Computing and Measurements (SCM) 2017 XX IEEE International Conference on. 2017.
6. Andriollo M, et al. Design optimization of slotless linear PM motors. In: Proceedings of the fourth international symposium on linear drives for industry applications. 2003.
7. Built identifier for the control circuit subject / T. S. Legotkina, A. V. Antineskul, A. I. Gorozhankin // Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017: [Conf. Paper], St. Petersburg, 24–26 May 2017. / Russia (Northwest) Section, St. Petersburg Electrotechn. Univ. LETI.— [S. l.]: IEEE Inc. 2017.
8. Fuzzy control system for 3D FDM extruder / T. S. Legotkina, I. I. Bezukladnikov, A. N. Andrievskaya, E. A. Tolchanov // Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017: [Conf. Paper], St. Petersburg, 24–26 May 2017. / Russia (Northwest) Section, St. Petersburg Electrotechn. Univ. LETI. [S. l.]: IEEE Inc. 2017.
9. Gieras IG, Piech ZJ. Linear synchronous motors. FL: Boca Raton: CRC; 2000.
10. Goldberg E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Reading MA: Addison-Wesley. 1989.
11. Jung IS, Yoon SB, Shim JH, Hyun DS. Analysis of forces in a short primary type and a short secondary type permanent magnet linear synchronous motor. IEEE Trans Energy Conv 1999;14(6).
12. Kang GH, Hong JP, Kim GT. A novel design of an air-core type permanent magnet linear brushless motor by space harmonics field analysis. IEEE Trans Magn 2001.37(5).
13. Kruzhilin, S.N., & Mishenina, M. P. Substantiation of rejuvenating tree pruning of representatives of the genus Populus l. In the urban city agglomerations. World Ecology Journal, 9(2). 2019. <https://doi.org/10.25726/worldjournals.pro/WEJ.2019.2.1>
14. LI Y., ANG K.H, and CHONG G.C.Y. Patents, Software, and Hardware for PID control. An overview and analysis of the current art. IEEE Control Systems Magazine. Feb. 2006.
15. Lovanov, I. (2018). Solution of the problem of the theoretical profile of non-dimensional speed on the thickness of the boundary layer at the turbulent flow in the boundary layer based on the solution of the differential equation of Abel of the second generation with the app. World Ecology Journal. 8(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.25726/NM.2018.1.1.004>
16. Pan, P.A. Commins, H. Du, "Tubular linear motor position detection by hall-effect sensors", Power Engineering Conference (AUPEC) 2015 Australasian Universities. 2015.
17. Rodger D, Lai HC, Leonard PJ. Coupled element for problems involving movement. IEEE Trans Magn 1990.26(2).
18. S. Won-jong Kim, Bryan C. Murphy, "Development of a Novel Direct-Drive Tubular Linear Brushless Permanent-Magnet Motor", Industry Applications Conference 2003. 38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the, vol. 3. 2003.

19. Syuan-Yi Chen, Tung-Hung Li, Chih-Hun Chang «Intelligent fractional-order backstepping control for an ironless linear synchronous motor with uncertain nonlinear dynamics», *ISA Transactions* Volume 89. June 2019.
20. Wang, J.B., Howe, D. and Jewell, G.W. (2004) Analysis and design optimization of an improved axially magnetized tubular permanent-magnet machine. *IEEE Transaction on Energy Conversion*. 19 (2). ISSN0885–8969
21. Wei Wang, Yanan Feng, Yan Shi, Ming Cheng, Wei Hua, Zheng Wang, “Fault-Tolerant Control of Primary Permanent-Magnet Linear Motors With Single Phase Current Sensor for Subway Applications”, *Power Electronics IEEE Transactions on*, vol. 34, no. 11. 2019.

© Горожанкин Антон Игоревич (gorobrankin@yandex.ru), Безукладников Игорь Игоревич (corrector@at.pstu.ru).
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

