

лифтов до выхода наружу открыты. Это означает, что на первый посадочный этаж поступает наружный воздух, который предлагается подавать в нижнюю часть шахты КПВ через открывающийся при пожаре клапан ПДВ, монтируемый под потолком. В этом случае естественная тяга будет способствовать притоку наружного воздуха по шахте КПВ.

Этому техническому решению может способствовать и то обстоятельство, в соответствии с [3] при установке пожарных лифтов в группе с другими лифтами лифтовый холл на основном посадочном этаже допускается не выгораживать.

А это означает, что воздух беспрепятственно попадает на первый посадочный этаж здания.

Литература

1. Строительные нормы Республики Беларусь. Противодымная защита зданий и сооружений при пожаре. Системы вентиляции : СН 2.02.7-2020. – МАиС РБ. – Утв. 12.11.2020.
2. Противодымная защита зданий и сооружений. Методы прямо-сдаточных и периодических испытаний : НПБ 23-2010. – МЧС РБ. – Утв. 01.07.2020.
3. *. Нормы пожарной безопасности Республики Беларусь. Лифты пожарные. Общие технические требования : НПБ 14-2004. – МЧС РБ. – Введ. 01.01.2005.

УДК 004.032.26

СИНТЕЗ НЕЙРОСЕТЕВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ С ГАРАНТИЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ И КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

Хапкин Д.Л., Фефилов С.В., Козырь А.В.

*Тульский государственный университет
Тула, Российская Федерация*

Аннотация. В работе рассматривается синтез гарантированно устойчивого нейрорегулятора для следящих систем с оптимизацией по времени переходного процесса. Предлагаемый подход основан на одновременном формировании регулятора и функции Ляпунова в виде нейронных сетей. Рассмотрено применение целочисленного линейного программирования для поиска функции Ляпунова. Предлагается использовать комплексный критерий оптимизации, позволяющий обеспечивать устойчивость и настраивать нейросетевой регулятор с учетом качества переходного процесса.

Ключевые слова: нейронные сети, системы управления, функция Ляпунова, устойчивость, нейросетевой регулятор.

SYNTHESIS OF NEURAL NETWORK REGULATORS WITH GUARANTEE OF STABILITY AND QUALITY OF THE TRANSITION PROCESS

Khapkin D., Feofilov S., Kozyr A.

*Tula State University
Tula, Russian Federation*

Abstract. In this article we consider the synthesis of a guaranteed stable neuroregulator for tracking systems with transient time optimization. The proposed approach is based on the simultaneous formation of regulator and Lyapunov function in the form of neural networks. The application of integer linear programming to find the Lyapunov function is considered. It is offered to use complex criterion of optimization, allowing to provide stability and to adjust the neural network regulator taking into account quality of transition process.

Key words: neural networks, control systems, Lyapunov function, stability, neural network controller.

Адрес для переписки: Хапкин Д.Л., e-mail: dima-hapkin@ya.ru

Введение. В настоящее время активно развиваются методы применения нейронных сетей в задачах управления. Большим недостатком современных нейросетевых регуляторов является отсутствие теоретически обоснованной методики синтеза, гарантирующей устойчивость замкнутой системы по Ляпунову. В данной работе предлагается подход к исследованию устойчивости систем управления с нейросетевым регулятором, в котором задача поиска функции Ляпунова для замкнутой системы сводится к обучению дополнительной нейронной сети на данных, полученных в результате решения задачи целочисленного линейного программирования (ЦЛП) [1, 2].

Структура системы управления. В работе рассматривается замкнутая дискретная система управления (рис. 1).

Для обучения используется метод обратного пропускания ошибки через прямой нейроэмулятор $\phi_{dyn}(x_t, u_t)$, поэтому на первом этапе обучается имитатор объекта управления [3, 4], основанный на нейронной сети, который описывается следующим образом:

$$x_{t+1} = f(x_t, u_t) = \phi_{dyn}(x_t, u_t) - \phi_{dyn}(x^*, u^*) + x^*, \quad (1)$$

где x_t – вектор состояния объекта управления в момент времени t , u_t – значение управляющего сигнала в момент t , x^* – точка равновесия системы, u^* – значение управления в данной точке.

Нейросетевой регулятор описывается следующим образом:

$$u_t = r(x_t) = \phi_r(x_t) - \phi_r(x^*) + u^*, \quad (2)$$

где ϕ_r – нейронная сеть в основе регулятора.

Условия устойчивости по Ляпунову:

$$V(x[t]) > 0 \quad \forall x[t] \in S, x[t] \neq x^*; \quad (3)$$

$$V(x[t+1]) - V(x[t]) < 0 \quad \forall x[t] \in S, x[t] \neq x^*; \quad (4)$$

$$V(x^*) = 0; \quad (5)$$

где $V(t)$ – функция Ляпунова, x_t – состояние объекта управления в момент времени t , S – область начальных условий, в которой система устойчива.

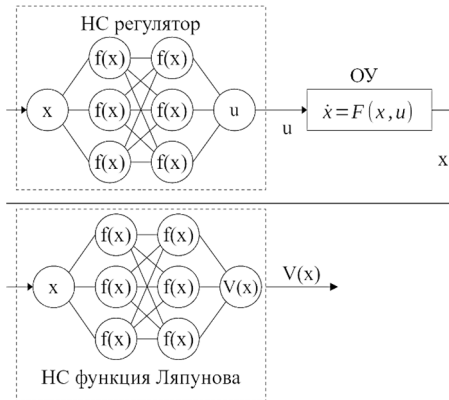


Рисунок 1 – Нейросетевая замкнутая система управления

Функция Ляпунова представляется с помощью нейронной сети ϕ_V как

$$V(x_t) = \phi_V(x_t) - \phi_V(x^*). \quad (6)$$

ЦЛП для нейронных сетей. В работе все нейронные сети являются сетями прямого распространения с функцией активации leakyReLU [5]:

$$\sigma(y) = \max(y, cy), \quad (7)$$

где c – значение коэффициента отрицательной части.

Также данную функцию можно описать в виде системы неравенств:

$$\begin{aligned} z &\geq y; \quad z \geq cy; \quad \omega \leq cy - (c-1)y_{up}\beta; \\ \omega &\leq cy - (c-1)y_{up}(\beta-1); \quad \beta \in \{0,1\}; \quad z \in R; \end{aligned} \quad (8)$$

где z – выход leakyReLU, β – бинарная переменная, y – значение входа leakyReLU, y_{up} и y_{lo} – ограничения на входную переменную.

Таким образом можно представить всю нейронную сеть в виде системы алгебраических равенств и неравенств, описывая каждый нейрон с учетом (8) для использования в решениях задачи ЦЛП.

В процессе обучения нейрорегулятора и нейросетевой функции Ляпунова минимизируются точки, нарушающие условия (3) и (4):

$$\eta_1 = \max(V(x[t])); \quad (9)$$

$$\eta_2 = \max(V(x[t+1]) - (\varepsilon - 1)V(x[t])). \quad (10)$$

Поиск таких точек сводится к задаче ЦЛП.

Также, для контроля времени регулирования t_r из каждой найденной точки выполняется процесс моделирования системы на время, превышающее t_r . Каждая точка фазового пространства, полученные после времени t_r , сравнивается с x^* для получения ошибки стабилизации, которые минимизируются:

$$\eta_3 = x[i] - x^*, \quad (11)$$

где $x[i]$ – состояние в дискретный шаг i от начала моделирования, i – номера дискретного шага моделирования.

Минимизируя η_1, η_2, η_3 обучаются нейрорегулятор и нейросетевая функции Ляпунова в результате чего полученная замкнутая система будет гарантированно устойчивой в локальной области с подтверждающей функцией Ляпунова и с требуемым временем регулирования.

Пример. Рассмотрим пример синтеза нейросетевого стабилизирующего регулятора для перевернутого маятника. Динамика системы представлена в следующем виде:

$$x_1' = x_2; \quad x_2' = (u - mgl \cdot \sin(x_1) - dx_2) / (m \cdot l^2), \quad (12)$$

где m – масса маятника; l – длина маятника, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; d – коэффициент демпфирования; x_1 – угловое положение маятника; x_2 – угловая скорость маятника; u – управляющее воздействие.

Задачей является синтез регулятора, который должен удерживать маятник в вертикальном положении, а время переходного процесса должно составлять 1 сек. На рис. 2 показана работа обученного нейрорегулятора.

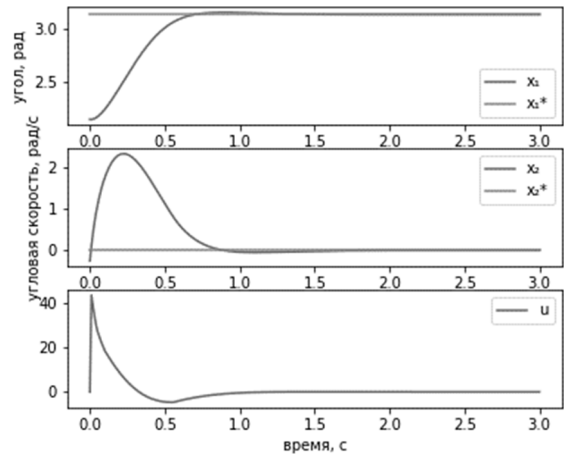


Рисунок 2 – График моделирования обученной системы

Заключение. В работе показано, что решение задач оптимизации в системах с нейронной сетью можно свести к задаче ЦЛП. Далее этот подход распространяется на синтез нейросетевой функции Ляпунова для замкнутой системы управления с нейрорегулятором, что позволяет гарантировать устойчивость системы. На примере стабилизации

неустойчивого динамического объекта типа перевернутый маятник синтезирована устойчивая нейросетевая система управления с оптимизацией переходного процесса.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по теме FEWG-2022-0003.

Литература

1. Strong mixed-integer programming formulations for trained neural networks / Ross Anderson [et al.] // *Mathematical Programming.* – 2020. – P. 1–37.

2. A unified view of piecewise linear neural network verification / Rudy Bunel [et al.] // *In Advances in Neural Information Processing Systems.* – 2018.

3. Feofilov, S. V. Synthesis of neural network controllers for objects with non-linearity of the constraint type / S. V. Feofilov, D. L. Khapkin // *Journal of Physics: Conference Series.* 11. Сер. "XI International Scientific and Technical Conference on Robotic and Intelligent Aircraft Systems Improving Challenges, RIASIC 2020. – 2021. – P. 12–14.

4. Чернодуб, А. Н. Обзор методов нейроуправления / А. Н. Чернодуб, Д. А. Дзюба // *Проблемы программирования.* – 2011. – Вып. 2. – P. 79–94.

5. Goodfellow, I. *Deep Learning* / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. – Cambridge: MA: MIT Press, 2016.

УДК 621.3.07

ТРЕХФАЗНЫЙ ТЕСТЕР ДЛЯ УЧЕБНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Ворсин Н.Н., Маркевич К.М.

*Брестский государственный технический университет
Брест, Республика Беларусь*

Аннотация. Представлен цифровой измерительный комплект, предназначенный для организации лабораторного практикума по электротехнике. По способам включения в цепь и проведению измерений прибор аналогичен стандартным электротехническим комплектам, однако имеет существенно меньшие массогабаритные параметры, стоимость и обеспечивает лучшую разрешающую способность, свойственную цифровым приборам и дополнительные возможности измерений.

Ключевые слова: измерительный комплект, токовый трансформатор, микроконтроллер.

THREE-PHASE TESTER FOR TRAINING LABORATORIES OF ELECTRICAL ENGINEERING

Vorsin N., Markevich K.

*Brest State Technical University
Brest, Republic of Belarus*

Abstract. A digital measuring set is presented, designed for organizing a laboratory workshop in electrical engineering. In terms of the methods of inclusion in the circuit and measurements, the device is similar to standard electrical kits, however, it has significantly lower weight and size parameters, cost and provides better resolution inherent in digital instruments and additional measurement capabilities.

Keywords: measuring set, current transformer, microcontroller.

*Адрес для переписки: Ворсин Н.Н., ул. Гоголя, 80, кв. 7, Брест 224016, Республика Беларусь
e-mail: vorsin@hotmail.com*

Организация лабораторного практикума по электротехнике требует большого количества измерительных приборов. В случае использования отдельных приборов (амперметров, вольтметров, ваттметров) [1] электрические цепи оказываются весьма громоздкими, а их сборка и отладка занимает очень много учебного времени, что далеко не всегда является положительным фактором. Для его преодоления довольно часто обращаются в противоположную крайность - все исключают из лабораторных работ сборку цепей и возможность видеть исследуемое устройство путем использования "лабораторных стендов". Изучаемое устройство или цепь является частью стенда или подключается к нему очень простым способом, а функция учащихся сводится к манипулированию ручками управле-

ния стенда и списыванию показаний его приборов. Очевидно, что дидактическая эффективность такого подхода не высока.

Еще одним способом обеспечения практикума измерительной аппаратурой является использование стандартных измерительных комплектов К50, К505, К540 и т.п. [2], которые почти полностью обеспечивают необходимые измерения, вырабатывают навыки обращения с реальной аппаратурой, оставляют достаточное место для сборки цепей и не «прячут» от учащихся изучаемые устройства. Измерения в трехфазных цепях обеспечивает штатное использование прибора, а для однофазных цепей измерительный комплект представляет собой три почти независимых однофазных измерителя, покрывающих потребности измерений для многих лабораторных работ.