

# ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ ЦИФРОВОГО ПИД – РЕГУЛЯТОРА С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ

**Вычужанин В., Козлов А.**

*В работе приведены результаты синтеза цифрового регулятора для систем автоматического управления теплообменными аппаратами центральных систем кондиционирования воздуха. Разработанный регулятор призван обеспечить заданное качество регулирования, изменения параметров настройки регуляторов с учетом условий эксплуатации объекта регулирования. Реализация требований к регулятору осуществлена в цифровом типом ПИД – регуляторе с оптимизацией его параметров настройки с помощью алгоритма дифференциальной эволюции. ПИД – регулятор реализован в ПЛИС. Исследования цифрового ПИД - регулятора с оптимизацией его параметров позволили установить, что регулятор удовлетворяет требуемому качеству регулирования. Обладает возможностью изменения параметров настройки с учетом условий эксплуатации объекта регулирования.*

*Ключевые слова. Цифровой ПИД - регулятор, дифференциальная эволюция, программируемая логическая интегральная схема, теплообменный аппарат.*

## **ВВЕДЕНИЕ**

Проблема качественного управления объектами, функционирующих при переменных существенных возмущающих воздействиях, является одной из важных, которую необходимо учитывать при разработке соответствующих систем автоматического управления (САУ) [1-4].

Основные требования, предъявляемые к разрабатываемым регуляторам подобных САУ, заключаются в обеспечении заданного качества регулирования (малые время регулирования, допустимая величина перегулирования), в возможности изменения параметров настройки регулятора с учетом условий эксплуатации объекта регулирования, а также в относительной простоте схемного решения регуляторов. Неправильная настройка параметров регуляторов может привести к циклическому и медленному их восстановлению, плохой устойчивости и потери управляемости объектом регулирования.

К известным методам настройки параметров регуляторов относятся методы Циглера-Николса, Чина-Хронеса-Ресвика, Коэна-Куна и другие методы [5,6]. Большинство из этих методов применимы как к непрерывным, так и дискретным системам регулирования. Предложенные Циглером-Николсом, Коэном-Куном экспериментальные

способы настройки регуляторов основаны на методах проб и ошибок. Однако при использовании этих методов могут возникнуть проблемы при настройке регуляторов, например для нелинейных объектов высокого порядка, при наличии временных задержек, нелинейных процессах в системе регулирования.

Для преодоления названных проблем применяются различные методы для получения рациональных параметров настройки регуляторов, в том числе методы, основанные на применении эволюционных вычислений - генетического алгоритма (GA) и дифференциальной эволюции (DE) [7-9]. Недостатки в работе GA: ложная сходимость, потеря наилучшего найденного решения, отсутствует поддержка оптимального значения [10]. Поэтому в настоящее время для получения рациональных параметров настройки регуляторов находит все большее применение дифференциальная эволюция. Главная особенность DE заключается в использовании схемы генерации векторов пробных параметров. Обычно DE [11] реализация нуждается в трех параметрах: CR (определяющий взаимоисключающие операции кроссовера и мутации); F (коэффициент масштабирования разности двух особей); NP (размер популяции) для генерации эволюционного процесса для n-мерной задачи. Алгоритм DE прост, а его производительность сопоставима или даже превосходит GA [12,13]. Исходя из перечисленных преимуществ DE, такой алгоритм может быть выбран для оптимизации параметров настройки регуляторов управления объектами, функционирующими при переменных существенных возмущающих воздействиях.

Обеспечить реализацию настройки параметров цифровых регуляторов с учетом условий эксплуатации объекта регулирования возможно в программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС). Развитие ПЛИС позволяет реализовать цифровые регуляторы с изменяемыми параметрами настройки с минимальными материальными затратами и сокращенным временем на проектирование. Производители предлагают программируемые простые, матричные и сложные логические устройства (SPLD, PAL, CPLD); программируемые пользователем базовые матричные микросхемы (FPGA) [14]. В настоящее время FPGA широко применяются в приложениях развивающегося аппаратного обеспечения с использованием интеллектуальных вычислительных методов при проектировании цифровых систем управления [15,16]. Цифровая САУ на FPGA обладает особенностями, отличающими ее от аналоговых систем: законы управления реализуются в форме алгоритмов, запрограммированных с помощью аппаратных или программных средств; обрабатываются квантованные (дискретные во времени) сигналы [17-19].

Семейства FPGA позволяют реализовать эволюционные алгоритмы, начиная от выделенной системы только на одном чипе и заканчивая кластером FPGA [20] для выполнения параллельных вычислений, которые могут быть полезны для различных приложений. Метод DE позволяет в реальном времени осуществить числовую оптимизацию параметров настройки регуляторов. DE подходит для точной минимизации числовых параметров регуляторов. При этом FPGA являются желательными устройствами для использования из-за их массивного параллелизма [21, 22].

В [23] исследован ПИД - регулятор при использовании его представления с фиксированной запятой в программе для FPGA. Производительность сравнивается с представлением с плавающей запятой с представлением с фиксированной запятой. Представление с фиксированной запятой оценивалось с использованием методов анализа длины слова. Было установлено, что представление с фиксированной точкой позволяет сэкономить значительные ресурсы в схеме на FPGA (потеря мощности и энергопотребление, сократить время разработки). Алгоритм DE по своей природе всегда использует кодирование с плавающей запятой и несколько поколений случайных чисел. Поэтому при реализации DE на FPGA необходимо внедрение в FPGA нескольких генераторов случайных чисел. Из [9] следует, что вопросы оптимизации параметров настройки ПИД - регуляторов, реализованных в FPGA, с использованием алгоритма DE недостаточно отражены с точки зрения оценки обеспечения стабильности работы регуляторов в режиме реального времени при минимальной среднеквадратичной и интегральной абсолютной ошибках.

Таким образом, поиск новых схемных решений и принципов функционирования САУ для обеспечения заданного качества управления объектами, функционирующих при переменных существенных возмущающих воздействиях предполагает дальнейшую разработку и исследования ПИД – регуляторов с оптимизацией параметров настройки с DE.

## **ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Целью работы является обеспечение стабильности работы регулятора в режиме реального времени при минимальном времени регулирования и величине перегулирования при автоматизации объектов подверженных воздействию существенных возмущений.

## РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ПИД - РЕГУЛЯТОРА В FPGA С ОПТИМИЗАЦИЕЙ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ НА ОСНОВЕ DE

В качестве объекта автоматизации выбран теплообменный аппарат (воздухонагреватель) центральной системы кондиционирования воздуха (СКВ), функционирующей при переменных существенных возмущающих воздействиях [23-25]. Для данного объекта управления из-за нелинейности характеристик агрегатов процесс настройки параметров управления регуляторов является трудоемкой задачей. Характеристики воздухонагревателя определяют процессы тепловой обработки воздуха в кондиционере, влияют на выбор управляющих воздействий и на качество переходных процессов в используемой системе регулирования. Тепловые процессы, протекающие в теплообменном аппарате, характеризуются распределенностью параметров и поэтому динамика их описывается в общем случае нелинейной системой уравнений [26]. В воздухонагревателях возмущающими воздействиями является температура и относительная влажность воздуха на его входе. Управляющими воздействиями могут быть расход пара или температура пара на входе, расход воздуха (если аппарат работает при переменном расходе). Регуляторы, используемые для поддержания заданных параметров на выходе теплообменных аппаратов центральной СКВ, реализуют П, ПИ и ПИД законы регулирования. Однако в условиях переменных существенных возмущающих воздействий регуляторы не обеспечивают требуемое качество регулирования. Параметры регуляторов нуждаются в настройке, что не всегда возможно выполнить в условиях эксплуатации СКВ.

При разработке регуляторов с перестраиваемыми параметрами настройки учитывалась математическая модель воздухонагревателя [27], выбранного в качестве объекта автоматизации. Оптимизация параметров настройки ПИД - регулятора осуществлена в соответствии с алгоритмом его функционирования и алгоритмом DE (рис.1). В соответствии с алгоритмом DE [28] используется набор решений (популяцию) и на каждом шаге преобразовывают их последовательным применением операций селекции, мутации скрещивания.

Целевая функция при оптимизации параметров настройки ПИД - регулятора в соответствии с алгоритмом DE

$$\min f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

где  $x$  -  $n$ -мерный вектор, а  $f$  - действительная функция вещественных аргументов.

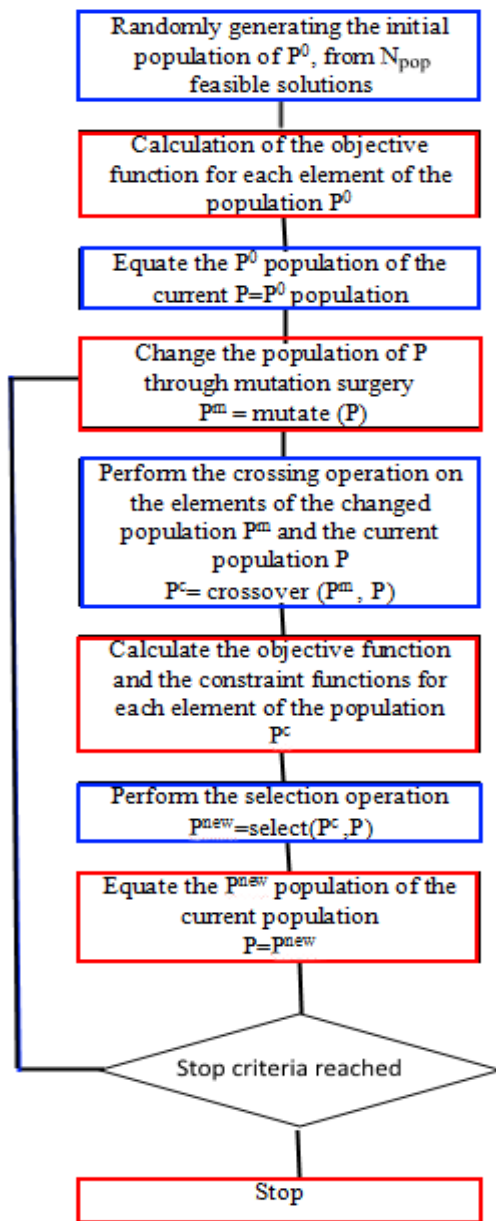


Рис.1 – Алгоритм дифференциальной эволюции

Для DE используется [29] требуемый размер популяции (NP) -  $NP=10 \times D$ , где D – это номер популяции, константа кроссовера (CR) -  $CR \in [0,1]$ , вес, примененный к случайному дифференциалу (коэффициент мутации) (F) -  $F \in [0.5,1]$  и количество хромосом для соответствия контрольным параметрам регулятора.

Популяция инициализируется генерацией случайных особей от 1 до NP хромосом равномерно между 1 и D. Разностный вектор генерируется случайным образом из индивидуального выбора. Взвешенный разностный вектор формируется из разностного вектора, умноженного на весовой коэффициент мутации F. Цифровая структура ПИД - регулятора реализуется на уровне модулей. На константу коэффициента мутации влияет длина шага мутации. При уменьшении разностного вектора также уменьшается длина шага мутации в популяции. Вектор рождается из суммы параметра разностного вектора и индивидуального параметра. Целевой вектор пересекается с разностным вектором. Скрещивание выполняется по поколениям между параметром кроссовера CR и случайным числом для каждой хромосомы. В дальнейшем целевой и пробный вектора выбирались на основе значения целевой функции для размещения целевых векторных хромосом по поколениям. Выбор осуществляется в соответствии с целевой функцией. Из вектора мутации выбирается минимум одна хромосома. Если целевой вектор равен пробному вектору, то пробный вектор выбирается для продолжения в роде.

Беззнаковые оптимизированные параметры импортируются из DE - оптимизации в ПИД - регулятор. Пропорциональные, интегральные и производные составляющие рассчитываются отдельно в соответствующих программных модулях. Выходное значение ПИД - регулятора получается суммирование всех слагаемых. Оптимизация ПИД - регулятора реализуется уменьшением эталонной и измеряемой величины или количеством поколений. Параметры ПИД - регулятора подбираются сравнением значений пригодности разных поколений. В соответствии со значением пригодности для ПИД - регулятора выбираются наилучшие параметры управления.

Функциональная схема цифрового ПИД- регулятора с DE представлена на рис.2.

Цифровой ПИД - регулятор традиционно описывается

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{b_0 + b_1 \cdot z^{-1} + b_2 \cdot z^{-2}}{a_0 + a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2}} \quad (2)$$

Рекуррентная процедура вычисления управления, соответствующего работе цифрового ПИД - регулятора с учетом [9] имеет вид

$$u[n] = k_1 \cdot u[n-1] + k_2 \cdot u[n-2] - k_3 \cdot e[n] - k_4 \cdot e[n-1] - k_5 \cdot e[n-2] \quad (3)$$

Схема ПИД - регулятора, интегрированного в FPGA, обычно состоит из блоков регистров (REG\_1- REG\_4), используемых для хранения текущих и предыдущих значений ошибок (E(n), e(n - 1), e(n - 2), u(n - 1) и u(n - 2)), сумматора (ADD) и умножителей. Блок-схема ПИД - регулятора в FPGA, полученная в соответствии с (3) и учетом [30] приведена на рис.3.

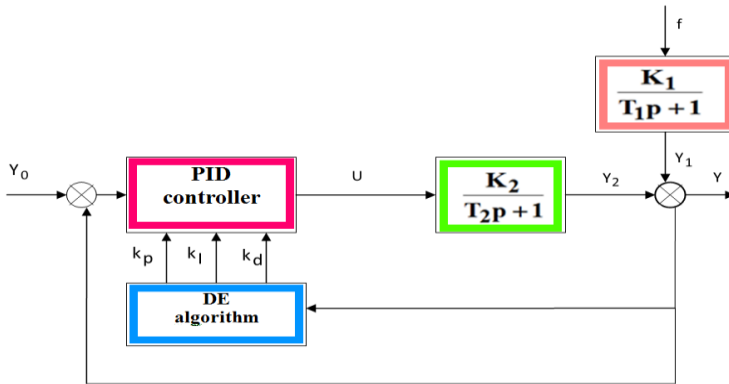


Рис.2 - Функциональная схема цифрового ПИД- регулятора воздушнонагревателя с DE

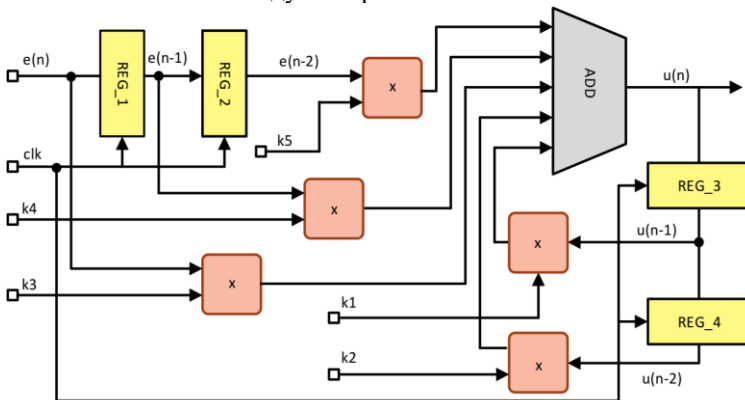


Рис.3 - Блок-схема ПИД - регулятора в FPGA

Для настройки параметров ПИД - регулятора использовалась отладочная плата DE2 (Altera) [30]. DE аппаратно реализован в модуле памяти PMem и модуле FXMem для хранения значений функций пригодности, генераторах случайных чисел и конечном автомате для управления последовательностью выполнения DE (рис. 4). Объем памяти определяется параметром размера популяции NP и размерностью D. Модуль FXMem реализован аналогично PMem, с той разницей, что размер FXMem определяется только параметром NP, так как индивидуум хранит только одно значение. Параметры DE при настройке ПИД – регулятора на FPGA: NP = 100; CR = 0,9; константа мутации F = 0,6; число поколений G = 50. D устанавливается на основе числа параметров, используемых в целевой функции.

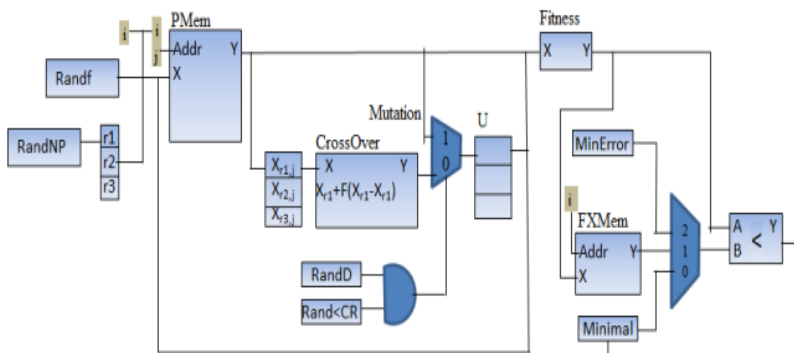


Рис.4 – Аппаратная реализация DE для конфигурации в FPGA

Ресурсы используемой программы FPGA для EP4CE115F29C7 (Cyclone IV E) определены в зависимости от количества логических элементов (4985), задействованных входов (71), регистров (1512), умножителей. В качестве языка для описания аппаратного обеспечения ПИД - регулятора используется язык описания аппаратных средств VHDL.

## ИССЛЕДОВАНИЯ ЦИФРОВОГО ПИД - РЕГУЛЯТОРА В FPGA С ОПТИМИЗАЦИЕЙ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ НА ОСНОВЕ DE

Исследование качества регулирования ПИД – регулятора осуществлено моделированием в MATLAB. Результаты исследований для DE при использовании среднеквадратичной ошибки и интегральной абсолютной ошибки в качестве целевой функции при оптимизации параметров настройки ПИД – регулятора показаны на рис. 5, полученные при изменении ступенчатого возмущающего воздействия по теплосодержанию воздуха перед ОР.



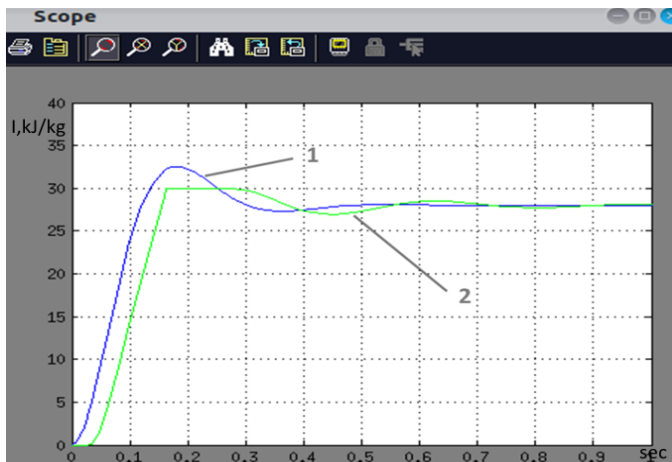


Рис.5 – Исследования ПИД – регулятора (1 – ПИД – регулятор; 2 – ПИД – регулятор с оптимизацией параметров настройки)

При моделировании использовались ранее полученные данные для воздухонагревателя центральной СКВ [31]: коэффициенты передачи  $K_1 = 0,421 \pm 0,06$ ;  $K_2 = 0,813 \pm 0,17$  кДж/(кг%); постоянные времени  $T_1 = 1,4 \pm 0,3$ ;  $T_2 = 6,1 \pm 1,2$  сек; период дискретизации  $T_k = 1$ , сек. Значения коэффициентов ПИД - регулятора  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$ , оптимизированного по целевой функции среднеквадратичной ошибки соответственно составили 0,62 кДж/кг; 0,12 кДж сек/кг; 2,14 кДж/кг, по целевой функции интегральной абсолютной ошибки соответственно - 0,66 кДж/кг; 0,069 кДж сек/кг; 1,40 кДж/кг.

Из проведенных исследований: ПИД - регулятора время регулирования составило 0,48 сек, максимальное значение перерегулирования - 17,6%; ПИД - регулятора с оптимизацией параметров по целевой функции - среднеквадратичной ошибке равной 0,018 и по целевой функции - интегральной абсолютной ошибке равной 18,65 время регулирования составило 0,7 сек, максимальное значение перерегулирования - 11,2%.

Из результатов исследований, проведенных в условиях кратковременных ступенчатых возмущающих воздействий, установлено, что ПИД - регулятор с оптимизированными параметрами обладает на 6,4% меньшей величиной перерегулирования, в 1,45 раза меньшим временем установления управляемого параметра в сравнении с ПИД - регулятором с неоптимизированными параметрами, время установления управляемого параметра ПИД - регулятора с оптимизацией параметров

настройки на основе DE равно 0.48 сек. Оценка качества регулирования ПИД - регулятора с оптимизацией параметров по целевой функции позволила установить, что максимальное значение перерегулирования составило 11,2%.

## **ВЫВОДЫ**

Таким образом, проведенные исследования цифрового ПИД – регулятора с оптимизированными параметрами настройки показали, что такой регулятор в сравнении с ПИД – регулятором с неоптимизированными параметрами настройки обладает лучшими динамическими характеристиками (меньшее перерегуливание). Позволили установить, что регулятор функционирует стабильно в режиме реального времени при минимальной величине перерегулирования и допустимом времени регулирования.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- [1] Richard, C. Dorf, & Robert, H. Bishop (2011). “Modern Control Systems”, Pearson, 1111 p. DOI: 10.1002/rnc.1054.
- [2] Katsuhiko, Ogata (2011). ”Modern Control Engineering, Fifth Edition”, Pearson, 905 p. DOI: 10.1093/benz /9780199773797.article.b00128780
- [3] Г. Олссон, Дж. Пьяни (2001). Цифровые системы автоматизации и управления. СПб, 2001. – 577 с.
- [4] Astrom, K. J., & Hagglund, T. (2006). “Advanced PID control”, *ISA The Instrumentation, System, and Automation Society*. – 460 p. DOI: 10.1016/s0967-0661(01)00062-4 .
- [5] Ziegler, J. G. & Nichols, N. B. (1942). “Optimum Settings for Automatic Controllers”. *Trans. ASME*. –64(8). – P. 759 –768.
- [6] Cohen, G. H. & Coon, G. A. (1953). «Theoretical Consideration of Retarded Control». *Trans. ASME*. 75. – P. 827 – 834.
- [7] Mahboobib, S. H., & Alasty, A. (2011). "Optimum Synthesis of Fuzzy Logic Controller for Trajectory Tracking by Differential Evolution", *Scientia Iranica*, Iran. – P. 261 – 267. DOI: 10.1016/j.scient.2011.03.021
- [8] Shing-Tai, Pan (2011). "Evolutionary Computation on Programmable Robust IIRFilter Pole-Placement Design", *Instrumentation and Measurement*. – Vol. 60. – P. 1469 – 1479. DOI: 10.1109/tim.2010.2086850
- [9] Mika, Hanhila, Timo, Mantere, & Jarmo, T. Alander (2018). «FPGA–implementation of PID-controller by differential evolution optimization», *Open Engineering*. –Volume 8, Issue 1. – P. 395 – 402, DOI: 10.1515/eng-2018-0038.
- [10] Rastegar, R., Hariri, A. (2006). "A Step Forward in Studying the Compact Genetic Algorithm", *Evolutionary Computation*. – Vol. 14. – No. 3. – P. 277 – 289. DOI: 10.1162/evco.2006.14.3.277

- [11] Storn, R. & Price, K. (1995)., "Differential Evolution - A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces", *Journal of Global Optimization*. – Vol. 11. – P. 341 – 359.
- [12]. Chandra, A, & Chattopadhyay, S. (2012). "Role of Mutation Strategies of Differential Evolution Algorithm in Designing Hardware Efficient Multiplier-less Low pass FIR Filter", *Journal of Multimedia*. – Vol. 7. – No. 5. – P. 353 – 363. DOI: 10.4304/jmm.7.5.353-363
- [13]. Hiendro, A. (2011). "Multiple Switching Patterns for SHEPWM Inverters Using Differential Evolution Algorithms", *International Journal of Power Electronics and Drive System*. – Vol. 1. – P. 94 – 03. DOI: 10.11591/ijped.v1i2.101
- [14] Singh, R., Muzzio, F., Ierapetritou, M., & Ramachandran, R. (2015). «A Combined Feed-Forward/Feed-Back Control System for a QbD-Based Continuous Tablet Manufacturing Process», *Processes*, 3 (2), 339–356. DOI: 10.3390/pr3020339
- [15] Singh, R. (2015). «A Combined Feed-Forward/Feed-Back Control System for a QbD-Based Continuous Tablet Manufacturing Process», *Processes*. – Vol. 3. –, Issue 2. – P. 339 – 356. DOI: 10.3390/pr3020339
- [16] Besekerskiy, V. A., Popov, Ye. P. (2003). «Теория систем автоматического управления» [Theory of automatic control systems], SPb.: *Profession*. – 752 p.
- [17] Вычужанин В.В. (2005)/ Состояние рынка и динамика применений ПЛИС фирмы Alter CHIP NEWS. – №4. – С.22 – 26.
- [18] Вычужанин В.В. (2006). Рынок ПЛИС и их применение Электронные компоненты и системы. – №11. – С. 29 – 34.
- [19] Grout, Ian (2008). «Digital systems design with FPGAs and CPLD», Newnes. – 763 p. DOI: 10.1016/b978-0-7506-8397-5.x0001-3
- [20] Shyamala, G., M., Gurunadha, Babu, Muni, & Praveena Rela. (2014). «Digital PID Controller Implementation for Speed Control Applications Using FPGA», *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*. – Vol.03. –, Issue.48. – P.9745 – 9749.
- [21] Вычужанин В.В. (2011). Методика комплексного проектирования оптимальных систем управления с ПЛИС электродвигателями Современная электроника. – №7. – С.54 – 59.
- [22] Вычужанин В.В. (2011). Реализация цифровой обработки сигналов переменной точности на ПЛИС Цифровая обработка сигналов. – No.3. – С. 62 – 66.
- [23] Swarnalatha, A., & Shanathi, A. P. (2012). "Optimization of Single Variable Functions Using Complete Hardware Evolution", *Applied Soft Computing*. – Vol. 12. – P. 1322 – 1329. DOI: 10.1016/j.asoc.2011.12.001
- [24] Abdoalnasir, Almabrok, Mihalis, Psarakis & Anastasios, Dounis (2018). «Fast Tuning of the PID Controller in An HVAC System Using the Big Bang–

- Big Crunch Algorithm and FPGA Technology», *Algorithms Algorithms*. – Vol. 11. – P.1–19146, DOI:10.3390/a11100146
- [25] Hwang, K., & Cho, S. (2009). "Improving Evolvable Hardware by Applying the Speciation Technique", *Applied Soft Computing*. – Vol. 9. – P. 254 – 263. DOI: 10.1016/j.asoc.2008.01.011
- [26] Thoma, Y. & Sanchez, E. (2004)., "A Reconfigurable Chip for Evolvable Hardware", *GECCO, Springer-Verlag Berlin Heidelberg*. – Vol. – 3102. – P. 816 – 827. DOI: 10.1007/978-3-540-24854-5\_84
- [27] Lima, João, Ricardo, Menotti, João, M. P. Cardoso & Eduardo, Marques (2006). «A methodology to design FPGA-based PID controllers». *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions*. – P. 2577-2583. DOI: 10.1109/icsmc.2006.385252
- [28] Вычужанин В.В. (2009). Повышение эффективности эксплуатации судовой системы комфортного кондиционирования воздуха при переменных нагрузках: Монография Одесса: ОНМУ.– 206 с.
- [29] Вычужанин В.В. (2007). Математические модели нестационарных режимов воздухообработки в центральной СКВ 2007, Вісник Одеського нац. морського ун-ту: Зб. наук. праць.– Одеса: ОНМУ. – №23. – С. 172–185.
- [30] Вычужанин В.В. (2007). Динамические свойства агрегатов центральной системы кондиционирования воздуха / Вісник Одеського національного морського університету, збірник наукових праць, випуск. –22. – С. 200 – 218.

## **OPTIMIZATION OF THE DIGITAL PID - CONTROLLER SETTING PARAMETERS USING THE DIFFERENTIAL EVOLUTION ALGORITHM**

**Vychujanin V.**

*The paper presents the results of the synthesis of a digital controller for automatic control systems of heat exchangers of central air conditioning systems. The developed regulator is designed to provide the specified quality of regulation, changing the settings of the regulators taking into account the operating conditions of the regulatory object. Implementation of the requirements for the controller is carried out in a typical digital PID - controller with optimization of its settings using the differential evolution algorithm. PID - controller is implemented in FPGA. Studies of a digital PID - controller with optimization of its parameters made it possible to establish that the controller satisfies the required quality of regulation. It has the ability to change settings, taking into account the operating conditions of the regulatory object.*

*Keywords. Digital PID - controller, differential evolution, programmable logic integrated circuit, heat exchanger.*