

УДК 644.1+004,9:517.9

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ**В. В. Бушер**

Одесский национальный политехнический университет

просп. Шевченко, 1, г. Одесса, 65044, Украина. E-mail: victor.v.bousher@mail.ru

Выполнено сопоставление динамических и статических характеристик систем контроля микроклимата, построенных по принципу подчиненного регулирования координат со стандартными и дробными ПИ-регуляторами, а также с нечеткой логикой при вариациях параметров объектов управления. Выработаны рекомендации по областям применения систем управления климатическими установками.

Ключевые слова: дробное интегрирование, контроль микроклимата, нечеткая логика.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ КЛІМАТИЧНИМИ УСТАНОВКАМИ**В. В. Бушер**

Одеський національний політехнічний університет

просп. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044, Україна. E-mail: victor.v.bousher@mail.ru

Проведено порівняння статичних та динамічних показників систем контролю мікроклімату, побудованих за принципами підпорядкованого керування з типовими та дробними пропорційно-інтегральними регуляторами, а також з нечіткою логікою за умовами варіацій параметрів об'єктів керування. Надано рекомендації щодо галузей використання систем керування кліматичними установками.

Ключові слова: дробове інтегрування, контроль мікроклімату, нечітка логіка.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Современный уровень микропроцессорной техники позволяет реализовывать сложные алгоритмы управления разнообразными технологическими объектами без существенного удорожания систем управления. Это открывает пути для использования более сложных моделей и регуляторов без упрощений, которые ранее были обусловлены невозможностью реализации в массовом производстве.

В частности, к таким объектам относятся установки контроля микроклимата в помещениях – кондиционеры и системы вентиляции. Принято объекты управления и, соответственно, регуляторы в них описывать дифференциальными уравнениями с целочисленным порядком, хотя известно, что процесс передачи тепла, потоки воздуха, конвекционные и диффузионные процессы описываются более сложными системами дифференциальных уравнений.

Результатом такого упрощения является ошибка в идентификации динамических и даже статических параметров, независимо от используемого метода (анализ реакции на скачок либо получение частотных характеристик за счет подачи синусоидального сигнала задания). Ошибка увеличивается, если датчики находятся в «комфортной» зоне вне прямых потоков воздуха. Основанная на этих данных настройка ПИ- и ПИД-регуляторов в контроллерах, например, ОВЕН (Россия), или применение усредненных настроек для двух-трех типов помещений, как это реализовано в контроллерах SIEMENS, THEVEN (Германия), приводит в процессе эксплуатации к неоправданно затянутому переходному процессам либо существенному (в несколько градусов) перерегулированию. А так как процессы длительные, то возникает ощущение дискомфорта. Адаптация регуляторов по рекомендациям производителей требует значительных затрат времени наладчика. Кроме того, параметры объектов управления в кли-

матических установках могут изменяться по различным причинам. Тогда качество управления может стать неудовлетворительным вплоть до возникновения автоколебаний.

Решение проблем может быть обеспечено двумя путями. Первый, применяемый уже в некоторых современных кондиционерах (Mitsubishi Electric, LG) – построение систем управления на основе нечеткой логики – хорошо зарекомендовал себя как в простейших, так и в сложных мультizonных кондиционерах.

Второй – синтез систем управления на основе более точного математического описания объектов, в частности, с помощью дробно-дифференциальных уравнений.

Цель работы – сравнительный анализ систем управления климатическими установками и выработка рекомендаций по их применению.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. В качестве объекта управления выбрана приточно-вытяжная вентиляционная установка с системой активной утилизации тепла, работающая в различных режимах: охлаждение или подогрев, вентиляция или кондиционирование [1, 2]. Такая система, с точки зрения происходящих в ней процессов теплообмена и, соответственно, математического описания, является наиболее сложной. Поэтому полученные для нее выводы могут быть распространены и на более простые системы.

По результатам идентификации обслуживаемого помещения, каналов вентиляции с конденсатором (нагревателем) и испарителем (охладителем) получена система уравнений, часть из которых может рассматриваться как описание дробно-аперiodических звеньев. Дифференциальные уравнения определяют перегрев/охлаждение воздуха по отношению к температуре окружающего воздуха:

$$\left(\frac{\tau_{in}^\mu}{v^* + \lambda_{in}} p^\mu + 1 \right) \Delta T_{in} = \Delta T_{in-n} \frac{\sum_{i=1}^n P_{in_i}^*}{v^* + \lambda_{in}};$$

$$\left(\tau_h^\mu \frac{\tau_{ch}}{v^* + \lambda_{ch}} p^{1+\mu} + \tau_h^\mu p^\mu + 1 \right) \Delta T_{cond} = \Delta T_{cond-n} \frac{P_{cond}^*}{v^* + \lambda_{ch}};$$

$$\left(\tau_h^\mu \frac{T_{ch}}{v^* + \lambda_{ch}} p^{1+\mu} + \tau_h^\mu p^\mu + 1 \right) \Delta T_{evap} = \Delta T_{evap-n} \frac{P_{evap}^*}{v^* + \lambda_{ch}};$$

$$\Delta T_{cond} = T_{cond} - T_{ex} \text{heat} - T_{in} \text{cool};$$

$$\Delta T_{evap} = T_{evap} - T_{ex} \text{cool} - T_{in} \text{heat},$$

где $\Delta T_{in}, \Delta T_{cond}, \Delta T_{evap}$ – изменение температуры воздуха в помещении и каналах вентиляции; $P^*, P_{in_i}^*$ – относительная тепловая мощность, отдаваемая источниками тепла/холода; $\tau_h, \tau_{ch}, \tau_{in}$ – постоянные времени, обусловленные теплоемкостью теплообменного агрегата, воздуха в канале вентиляции,

воздуха и предметов интерьера в помещении; $\mu \in [0,5;1]$ – порядок дробно-дифференциального уравнения; v^* – относительная скорость воздуха; *heat, cool* – логические сигналы, определяющие режим работы установки (нагрев, охлаждение); $T_{ex}, T_{in}, T_{cond}, T_{evap}$ – температура наружного и внутреннего воздуха на выходе вентиляционных каналов; $\Delta T_{cond-n}, \Delta T_{evap-n}, \Delta T_{in-n}$ – номинальный перегрев/охлаждение воздуха при текущих условиях окружающей среды и некоторой номинальной мощности источника тепла и номинальной производительности вентиляционной установки; $\lambda_{ch}, \lambda_{in}$ – коэффициенты тепловых потерь через стенки вентиляционных каналов и помещения.

На основании (1) была разработана модель объекта управления и синтезированы три различные системы управления (рис. 1).

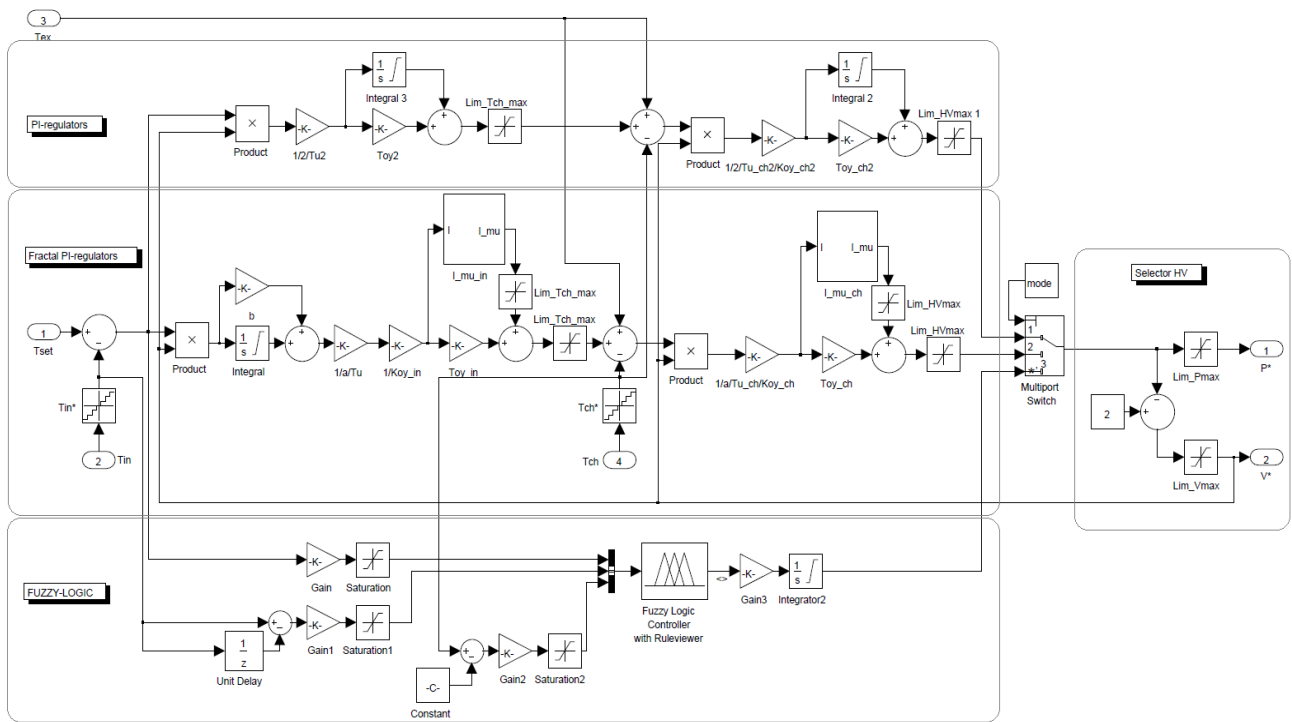


Рисунок 1 – Модель системы управления с переменной конфигурацией

Первая – с ПИ-регулятором температуры в помещении и подчиненным ПИ-регулятором температуры приточного воздуха. Выходной сигнал регулятора температуры приточного воздуха подается на селектор сигналов (Selector HV), который одновременно управляет мощностью нагревателя/охладителя и уменьшает скорость вентиляторов, если номинальной мощности нагревателя недостаточно для изменения температуры подаваемого потока воздуха. Выбор коэффициентов ПИ-регуляторов осуществлен по усредненным параметрам объектов управления, как аperiodических звеньев первого порядка, и обеспечивает настройки замкнутых контуров на модульный оптимум для получения удовлетворительных динамических показателей.

Вторая система синтезирована по критерию обеспечения минимального перерегулирования и отсутствия статической ошибки для дробно-аperiodического объекта управления [3]. Внешний контур настроен с астатизмом порядка $1 + \mu$. Для этого необходим составной регулятор из последовательно соединенных ПИ- и дробного ПИ-регуляторов:

$$H_{reg}(p) = \frac{1}{aT_v} \left(b + \frac{1}{p} \right) \frac{1}{k_{i0}} \left(T_{i0} + \frac{1}{p^\mu} \right);$$

$$a = \exp(-10,27 + 7,831\mu);$$

$$b = 7,336 + 0,792a + 3,83 \ln(a),$$

где T_v – некомпенсированная малая постоянная времени. А внутренний контур регулирования температуры приточного воздуха, как менее ответственный, настроен с астатизмом порядка μ с помощью дробного ПИ-регулятора:

$$H_{reg}(p) = \frac{T_{Ov}}{k_{Ov}aT_v} + \frac{1}{k_{Ov}aT_v p^\mu}; \quad (2)$$

$$a = \frac{\mu}{4,683 - 5,897\mu + 1,595\mu^2}.$$

При выборе коэффициентов регуляторов, в соответствии с (1) и (2), запасы устойчивости замкнутых контуров таковы, что закономерно ожидать несущественное ухудшение качества управления при достаточно широком диапазоне изменения параметров объекта.

Сигналы дробных интегрирующих звеньев в регуляторах вычисляются в соответствии с модифицированной формой Римана-Лиувилля как произведение вектора предварительно рассчитанных весовых коэффициентов и вектора значений входных сигналов [4].

В результате такие регуляторы формируют сигналы, изменяющиеся по степенным, а не экспоненциальным законам, что позволяет точнее управлять объектами с диффузионными и конвекционными процессами за счет компенсации их дробно-апериодических свойств.

Третья модель системы управления синтезирована по правилам нечеткой логики (FUZZY LOGIC) [2]. Используются три входных сигнала – дискретное значение отклонения температуры воздуха в помещении от заданного ΔT_{in}^* и дискретная разность первого порядка dT_{in}/dt^* , соответствующая производной температуры в помещении. Третьей входной координатой является дискретное значение температуры приточного воздуха T_{ch}^* , необходимое для защиты от перегрева и переохлаждения.

Фазификация входных переменных и выходного сигнала dHV/dt^* (приращения входного сигнала селектора) осуществляется S-, Z- и П-функциями принадлежности типа gaussmf1 с равномерным распределением на нормированных диапазонах изменения переменных $[-1; +1]$.

База правил составлена следующим образом:

- 1) if (T_{ch}^* is mf1) then (dHV/dt^* is mf5);
- 2) if (T_{ch}^* is mf5) then (dHV/dt^* is mf1);
- 3) if (ΔT_{in}^* is mf1) then (dHV/dt^* is mf1);
- 4) if (ΔT_{in}^* is mf5) then (dHV/dt^* is mf5);
- 5) if (ΔT_{in}^* is mf2) and (dT_{in}/dt^* is mf4) then (dHV/dt^* is mf1);
- 6) if (ΔT_{in}^* is mf4) and (dT_{in}/dt^* is mf2) then (dHV/dt^* is mf5);
- 7) if (ΔT_{in}^* is mf3) and (dT_{in}/dt^* is mf3) then (dHV/dt^* is mf3);
- 8) if (ΔT_{in}^* is mf3) and (dT_{in}/dt^* is mf2) then (dHV/dt^* is mf4);
- 9) if (ΔT_{in}^* is mf3) and (dT_{in}/dt^* is mf4) then (dHV/dt^* is mf2);
- 10) if (ΔT_{in}^* is mf2) then (dHV/dt^* is mf2);
- 11) if (ΔT_{in}^* is mf4) then (dHV/dt^* is mf4),

и графически изображена на рис. 2.

База правил может быть дополнена еще двумя, повышающими статическую точность системы:

- 10) if (ΔT_{in}^* is mf2) then (dHV/dt^* is mf2);
- 11) if (ΔT_{in}^* is mf4) then (dHV/dt^* is mf4),

однако для исследуемой системы эти правила даже с весовыми коэффициентами 0,1...0,25 в некоторых режимах приводили к возникновению автоколебаний.

Поверхность отклика по основным координатам $dHV/dt^* = f(\Delta T_{in}^*, dT_{in}/dt^*)$, формируемая блоком дефазификации с методом centroid по алгоритму Mamdani, показана на рис. 3.

Настройка системы нечеткого управления при выбранных входных сигналах и базе правил сводится к заданию коэффициентов, приводящих отклонение температуры в помещении от заданной, ее производную и температуру приточного воздуха к нормированным диапазонам [5]. Также можно задавать весовой коэффициент, определяющий максимальную скорость изменения выходного сигнала нечеткого регулятора.

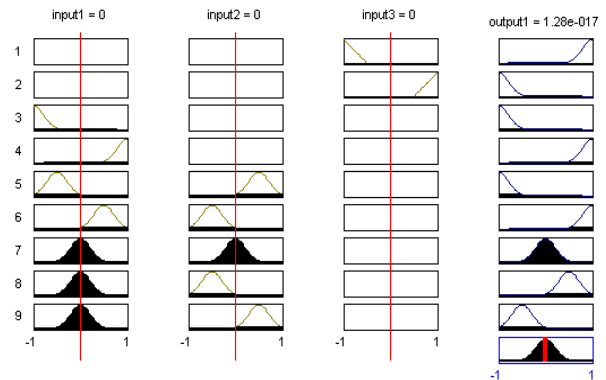


Рисунок 2 – База правил системы нечеткого управления

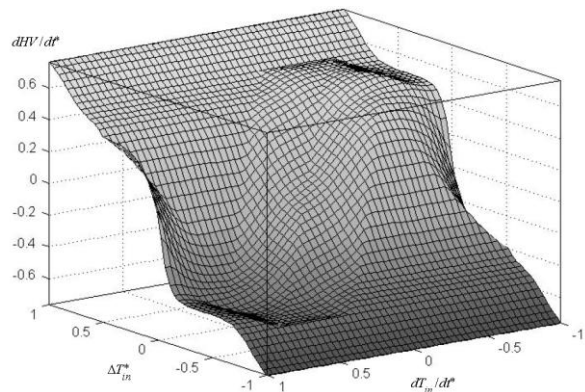


Рисунок 3 – Поверхность отклика $dHV/dt^* = f(\Delta T_{in}^*, dT_{in}/dt^*)$

С помощью разработанных моделей были выполнены расчеты переходных процессов для основных режимов работы исследуемой системы. Возмущающим воздействием в системе являлись скачки на 2°C температуры окружающего воздуха каждые 2000 s , начиная с $t = 1000\text{ s}$. Также смоделировано квантование по уровню датчиков температуры $\delta T = 0,0625^{\circ}\text{C}$ (соответствует применению широко распространенных цифровых датчиков DS18B20 или стандартных датчиков PT100, PT1000 с 12-разрядными АЦП в контроллерах) и квантование во времени $T_0 = 1\text{ s}$.

На рис. 4,а показаны графики изменения температуры в помещении до $+20^{\circ}\text{C}$ при выбранных номинальных параметрах объекта с тремя описанными системами управления (вверху – ПИ-регуляторы, в центре – дробные ПИ-регуляторы, внизу – FUZZY LOGIC). Видно, что системы с ПИ-регуляторами и с нечеткой логикой характеризуются медленно уменьшающейся или постоянной статической ошибкой до $0,75^{\circ}\text{C}$. Система с дробными ПИ-регуляторами обеспечивает отсутствие

статической ошибки, а при возмущающих воздействиях – кратковременное отклонение температуры от заданной не более $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$. Перерегулирование в начале переходного процесса составляет менее $\pm 0,15^{\circ}\text{C}$. Однако система управления с FUZZY LOGIC за счет поддержания минимальной скорости вентиляторов обеспечивает наиболее быстрое достижение заданной температуры при запуске системы.

На рис. 4,б показаны аналогичные переходные процессы при отклонении параметров объекта управления от расчетных. Выбран худший, с точки зрения изменения устойчивости, случай – эквивалентный коэффициент усиления объекта увеличен в 2 раза, а постоянные времени уменьшены в 4 раза. При этом в системе с дробными ПИ-регуляторами кратковременное отклонение температуры от заданной увеличилось до $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ при скачках температуры окружающей среды, и так же, как в системе с нечеткой логикой, появились «высокочастотные» колебания $\sim 1/200\text{ Hz}$ с амплитудой не более $\pm \delta T (\pm 0,0625^{\circ}\text{C})$.

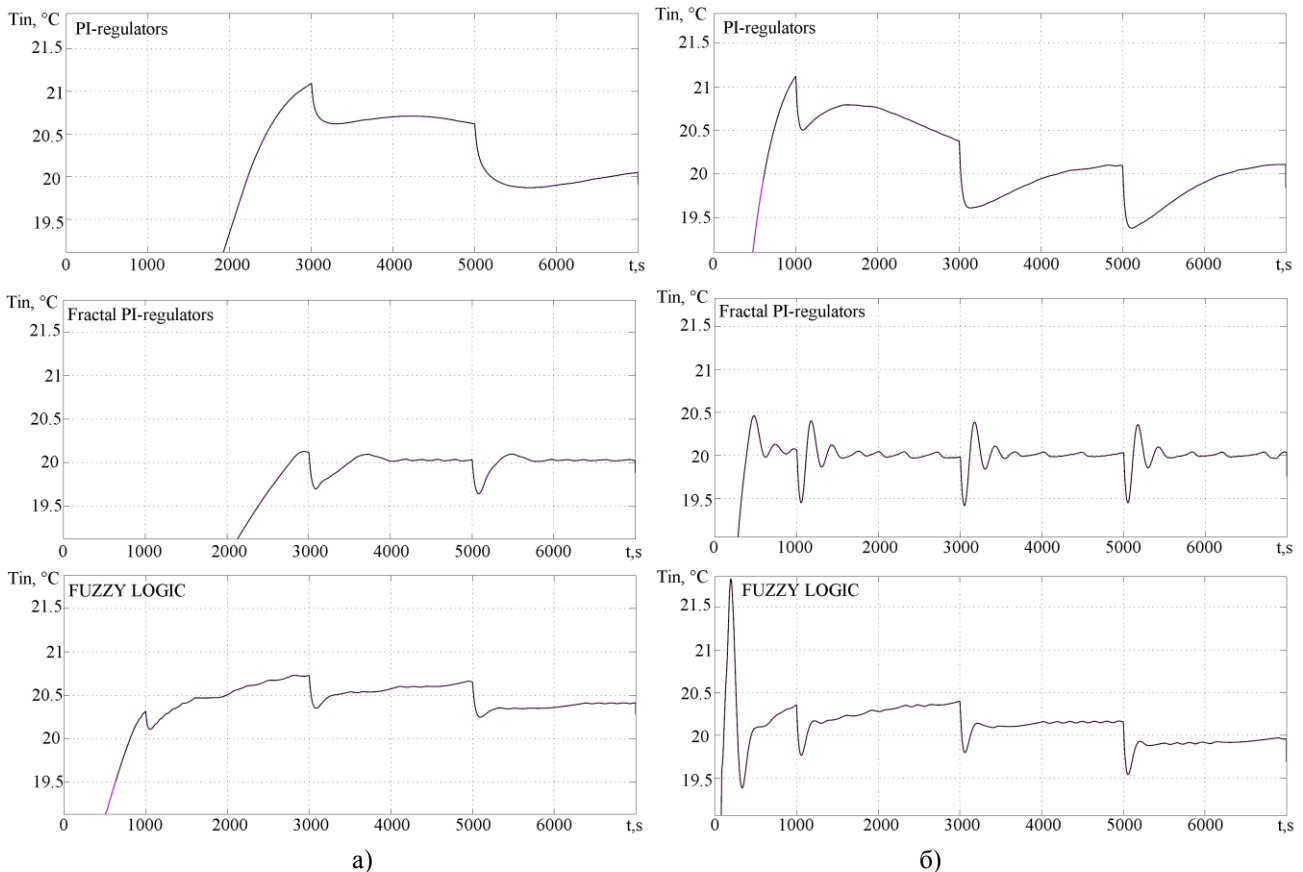


Рисунок 4 – Графики переходных процес сов при номинальных (а) и измененных (б) параметрах объекта

В системах с ПИ-регуляторами и с нечеткой логикой возникает медленно изменяющаяся ошибка до $\pm 0,7^{\circ}\text{C}$ и $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ соответственно.

ВЫВОДЫ. Полученные результаты позволяют выработать рекомендации по применению различных систем управления климатическими установками.

ПИ-регуляторы обеспечивают удовлетворительное качество простых систем (например, подготовки приточного воздуха) для помещений, где не требуется точное поддержание заданных показателей качества воздуха: бассейны, подсобные помещения, склады.

Системы с нечеткой логикой обладают большей точностью и при заранее записанной базе правил и

определенных функциях принадлежности требуют минимальных затрат времени при настройке.

Однако для создания прецизионных систем с повышенными требованиями к точности поддержания координат, например, в медицинских лабораториях, целесообразно использовать системы с дробно-интегрирующими регуляторами, наиболее близкими по физической сути к управляемым объектам.

Системы с нечеткой логикой и дробными ПИ-регуляторами сохраняют работоспособность при широком диапазоне изменений параметров объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аверьянова О.В. Климатические системы с тепловыми насосами и водяным контуром // Инженерно-строительный журнал. – СПб. – 2009. – № 2. – С. 19–22.

2. Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte / D. Rutkowska, M. Pilinski, L. Rutkowski // Naukowe PWN. – Warszawa, 1999. – 452 p.

3. Бушер В.В. Синтез регуляторов для систем управления климатическими установками // Электротехнічні та комп'ютерні системи. – К.: Техніка, 2012. – № 05 (81). – С. 21–24.

4. Бушер В.В. Моделирование систем с дробно-дифференцирующими и дробно-интегрирующими звеньями в SIMULINK // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 4/2011. – С. 140–143.

5. Стефанов Е.В. Вентиляция и кондиционирование воздуха. – СПб.: АВОК Северо-Запад, 2005. – 400 с.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE CLIMATIC CONTROL SYSTEMS

V. Bousher

Odessa National Polytechnic University

prosp. Shevchenko, 1, Odessa, 65044, Ukraine. E-mail: victor.v.bousher@mail.ru

The climatic control systems built according to the principle of the subordinate of the regulation of coordinates with the standard and fractional PI-regulators and also with FUZZY LOGIC are synthesized. The comparison of the static and dynamic characteristics of systems is executed when the parameters of the objects of control are variable. Recommendations on areas of climate control systems installations.

Key words: fractional integral, climatic control system, fuzzy logic.

REFERENCES

1. Averyanova O.V. Climatic systems with heat pumps and water-loop // *Civil Engineering magazine*. – SPb. – 2009. – № 2. – PP. 19–22. [in Russian]

2. Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte / D. Rutkowska, M. Pilinski, L. Rutkowski // Naukowe PWN. – Warszawa, 1999. – 452 p. [in Polish]

3. Buser V.V. Synthesis of controllers for systems of climate installations // *Elektrotehnikni i komp'yuterni systemy*. – K.: Tehnika, 2012. – № 05 (81). – PP. 21–24. [in Russian]

4. Buser V.V. Modeling of systems with fractional-differentiating and integrating fractional units in the SIMULINK // *Elektromehanicni i energozberigayuchi systemy*. – Kremenchuk: KrNU, 2011. – Iss. 4/2011. – PP. 140–143. [in Russian]

5. Stefanov E.V. *Ventilation and air conditioning*. – SPb.: AVOK North-West, 2005. – 400 p. [in Russian]

Стаття надійшла 19.02.2012.

Рекомендована до друку

к.т.н., доц. Гладирем А.І.