

УДК 004.023, 681.518

**В.И. Финаев, Д.А. Белоглазов, Е.Н. Павленко, В.В. Шадрин**

**СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ В УСЛОВИЯХ  
НЕПОЛНОТЫ ДАННЫХ НА ПРИМЕРЕ БАРАБАННОГО КОТЛА**

*При решении задач управления существует сложность применения классической теории автоматического управления, так как практически все технические системы содержат нелинейности, неопределенности. Так как классическая теория управления не может быть применима для построения регулятора плохо изученного объекта, то применяются системы адаптивного управления с самоорганизацией, саморегуляцией. Рассмотрена технологическая схема барабанного парового котла и приведены его управляемые параметры. Рассматривается решение задачи исследования систем автоматической оптимизации с использованием метода статистического имитационного моделирования. Приведена структура имитационной модели, содержащая следующие компоненты: модель объекта управления, генератор случайных возмущений, модуль принятия решений, а также процедуру сбора статистики для оценки качества управления. Представлен алгоритм функционирования имитационной модели системы, алгоритм выбора параметров системы автоматической оптимизации. Для решения задач исследования разработано программное приложение на основе современных объектно-ориентированных технологий.*

*Управление; неопределённость; адаптация; самоорганизация; моделирование; паровой котёл.*

**V.I. Finaev, D.A. Beloglazov, E.N. Pavlenko, V.V. Shadrina**

**SYSTEM OF AUTOMATIC OPTIMIZATION IN THE CONDITIONS OF  
INCOMPLETENESS OF THE DATA ON THE EXAMPLE OF THE DRUM-  
TYPE COPPER**

*In solving problems of management, there is the complexity of the application the classical control theory, as virtually all of the technical systems contain nonlinearity of uncertainty. Since the classical control theory can not be applied for the construction of the controller poorly understood object, then the adaptive control systems are applied with self-organization, self-regulation. Flowsheet drum steam boiler is considered, and its adjustable parameters are given. We consider the problem of automatic optimization studies using the method of statistical simulation. The structure of the simulation model containing components: a model of control object, the random disturbances, decision-making module and procedure for the collection of statistics to assess the quality of governance is considered. Algorithm of the functioning system is given, the algorithm for selecting the parameters of the automatic optimization. To solve the problems of research a software application is developed based on modern object-oriented technologies.*

*Control; uncertainty; adaptation; self-organizing; modeling; steam boiler.*

Под объектом управления (ОУ) в соответствии с теорией автоматического управления (ТАУ) понимают устройство или динамический процесс, управление поведением которого является целью создания системы автоматического управления (САУ). Существует несколько классификаций ОУ, предложенных различными авторами. Будем различать линейные и нелинейные ОУ. Управлением линейными ОУ занимается классическая ТАУ, которая на сегодняшний день обладает хорошо проработанным математическим аппаратом, что позволяет активно использовать ее при создании различных регуляторов.

Практически все технические системы нелинейные, следовательно, применение классических методов построения регуляторов возможно с определенными условиями, ограничениями [1-4], связанными с практической сложностью или невозможностью получения адекватного математического описания некоторых нелинейных систем.

Помимо нелинейности синтез регуляторов на основе классической ТАУ осложняется наличием неопределенности в исходных данных об ОУ [4, 5]. Причины появления неопределенностей различны: многомерность, многосвязность ОУ; неконтролируемость, нестационарность временных и частотных характеристик ОУ; стохастическая природа возмущений, воздействий внешней среды; нелинейности математического описания ОУ [5].

Влияние неопределенности реальной системы на процесс принятия решений может быть устранено в определенных случаях следующими способами: игнорирование существования неопределенности и использование детерминированных моделей; ориентация на один определенный вид неопределенности с последующим поиском способов борьбы с ней; дополнительные исследования объекта управления; создание адаптирующихся, обучающихся систем управления [4, 5].

В случае существования некоторой неопределенности математической модели ОУ, возможности изменения с течением времени значений ее параметров, применение классической ТАУ для построения регуляторов невозможно. Указанная проблема может быть решена применением адаптивных систем управления [6–12].

В настоящее время выделяют две группы адаптивных систем: самонастраивающиеся; самоорганизующиеся. Задачи самонастройки решают не путем изменения параметров регулятора, имеющего определенную структуру, а путем изменения самой структуры регулятора [13]. При автоматической настройке структуры регулятора не задан закон регулирования, в общем случае неизвестно заранее, какие корректирующие устройства и как вводить, какие логические вычислительные операции производить [13, 14].

Такое свойство ОУ, как инерционность, непосредственно связанное с понятиями последствия, нестационарности и нелинейности, во многом определяет степень неопределенности параметров ОУ [13, 14]. Если степень инерционности велика, то и в большей степени проявляются свойства нестационарности, последствия и нелинейности. Примерами подобных ОУ без внутренней обратной связи по регулирующему воздействию – ветроэнергетические установки, энергоблоки тепловых электростанций, котлоагрегаты, системы водоподготовки тепловых электростанций, печи для нагрева металла в прокатном производстве.

При построении адаптивного регулятора для малоинерционных ОУ критерием эффективности является критерий минимизации времени регулирования, а для инерционных систем с большой степенью инерционности добавляются критерии обеспечения устойчивости процессов регулирования. Критерии регулирования могут иметь интегральное представление.

При синтезе САУ вначале следует определить технологические схемы ОУ, на которых должны присутствовать входные и выходные параметры. Например, на рис. 1 показана технологическая схема барабанного парового котла, для которого основными регулирующими воздействиями являются расход топлива на котел  $B_m$ , расход воздуха  $Q_a$  и расход перегретого пара  $D_{mn}$ . Управляемыми параметрами этого ОУ являются расход питательной воды  $D_{пв}$ , температура питательной воды  $t_{пв}$ , температура воздуха после подогревателя  $t_a$ , температура пара  $t_m$ , давление пара  $p_m$ , разрежение в верхней части топки  $S_T$ , уровень воды в барабане  $H_b$ . Связи входных и выходных величин барабанного парового котла показаны на рис. 2.

Задача исследования систем автоматической оптимизации (CAO) может быть решена с использованием метода статистического имитационного моделирования. Для сравнения характеристик различных вариантов алгоритмов CAO, основанных на последовательной процедуре, разрабатывается имитационная модель CAO.

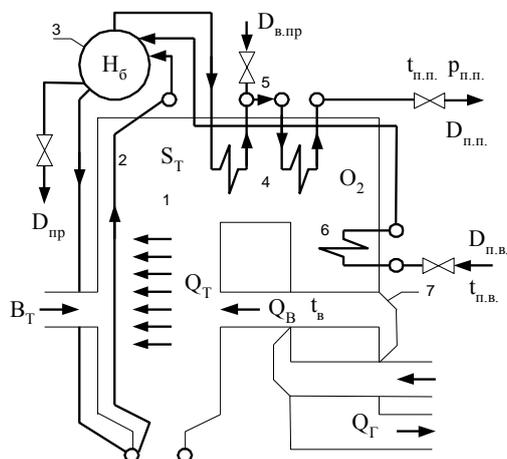


Рис. 1. Технологическая схема барабанного парового котла: 1 – камерная топка; 2 – циркуляционный контур; 3 – барабан; 4 – пароперегреватель; 5 – парохладитель; 6 – экономайзер; 7 – воздухонагреватель

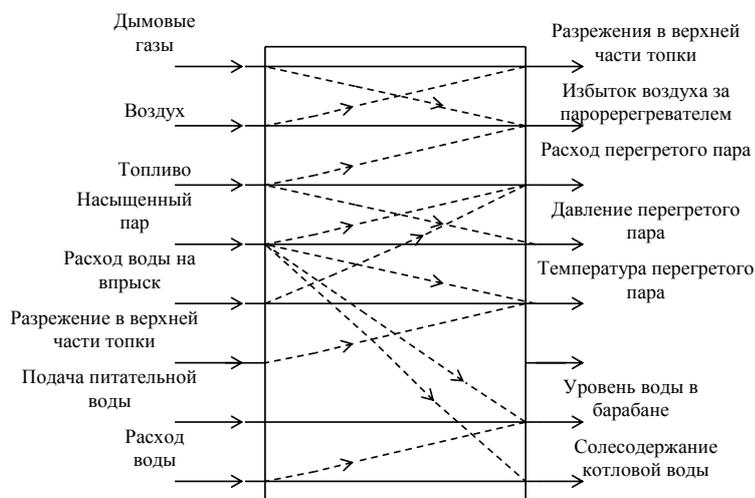


Рис. 2. Связи входных и выходных величин барабанного парового котла

Имитационная модель содержит следующие компоненты [14, 15]: модель объекта управления, генератор случайных возмущений, модуль принятия решений и процедуру сбора статистики для оценки качества CAO.

Модель объекта управления задана характеристикой  $y=f(x,t)$ , где  $x$  – оптимизируемый параметр. В общем случае вид характеристики будет зависеть от времени (дрейф характеристики) и от динамики системы. Динамическая модель объекта управления для целей имитационного моделирования CAO имеет следующую структуру, показанную на рис. 3.

В этой модели  $W_1$  и  $W_2$  – передаточные функции линейной части системы, НП – нелинейный преобразователь (статическая экстремальная характеристика объекта). Возмущения  $x^*(t)$  и  $y^*(t)$  задают горизонтальный и вертикальный дрейф характеристики объекта соответственно;  $x(t)$  – оптимизируемое значение параметра;  $y_d(t)$  – выход детерминированной части модели объекта управления.

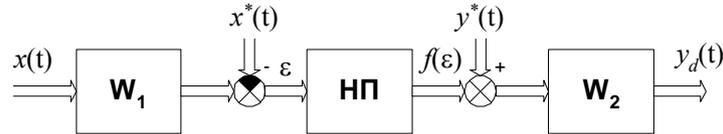


Рис. 3. Структура модели объекта управления

Генератор случайных возмущений порождает случайный процесс  $\varphi(t)$  с заданными свойствами.

Модуль принятия решений (CAO) содержит процедуру автоматической оптимизации, качество которой требуется оценить. Процедура сбора статистики собирает информацию о качестве оптимизации. Критерием качества может быть вероятность ошибочных решений, скорость достижения экстремума (для статической характеристики) либо комбинированная оценка скорость/качество оптимизации.

Обобщенный алгоритм функционирования имитационной модели CAO представлен на рис. 4,а, где  $m$  – число испытаний до принятия решения;  $N$  – число срабатываний CAO;  $N_{max}$  – заданное число циклов работы;  $y_{m1}, y_{m2}$  – значения характеристики объекта в двух точках измерения;  $r$  – результат работы алгоритма ( $r = 0$  – продолжение испытаний, иначе г-направление шага); GEN – процедура определения значения характеристики в точке измерения с учетом возмущений и динамики системы; ALG – основной алгоритм принятия решений CAO; ADSTP – коррекция параметров CAO; ADVX – коррекция рабочей точки; STAT – оценка эффективности шага (сбор статистики).

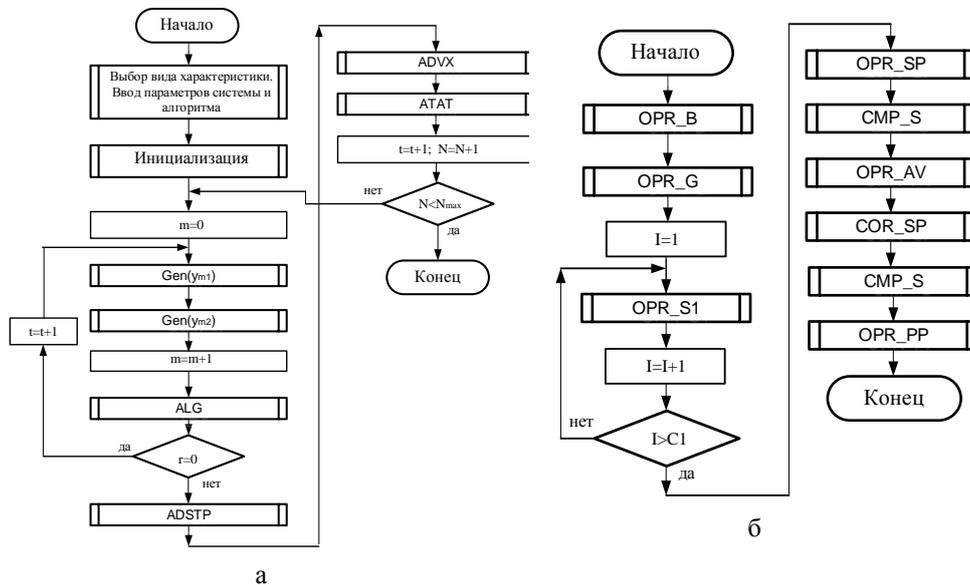


Рис. 4. Алгоритмы CAO: а – алгоритм имитационной модели CAO; б – алгоритм выбора параметров CAO

Для моделирования процесса выбора параметров САО используется следующий алгоритм, показанный на рис. 4,б.

В подпрограммах OPR\_V и OPR\_G определяются значения параметров модели экстремальной характеристики и вычисляются оценки процесса функционирования САО соответственно.

В подпрограмме OPR\_S1 производится вычисление  $i$ -й частичной оценки нечеткой ситуации. Объединение частичных оценок и формирование текущей нечеткой ситуации выполняется в подпрограмме OPR\_SP. В подпрограмме CMP\_S текущая ситуация  $\tilde{S}$  сравнивается с эталонными ситуациями  $\tilde{S}^{*v}$  и определяется индекс K1 ситуации, для которой степень нечеткого равенства  $\mu(\tilde{S}, \tilde{S}^{*v})$  наибольшая. В подпрограмме OPR\_AV вычисляются параметры стратегии, соответствующей эталонной ситуации K1. В подпрограмме COR\_SP определяется прогнозируемая нечеткая ситуация  $\tilde{S}_n$  на основании принятого решения о применении стратегии в ситуации K1. Далее аналогичным образом определяется индекс K2 эталонной ситуации и в подпрограмме OPR\_PP определяются параметры алгоритма поиска на следующем шаге.

Для моделирования дрейфа характеристики реализуется периодический процесс изменения параметров  $x^*$  и  $y^*$  (экстремальных значений) с сохранением остальных параметров, т.е. параллельный перенос характеристики с некоторой скоростью. Можно применить два вида дрейфа – смещение с постоянной скоростью (линейный дрейф) и с переменной скоростью. В первом случае реализуется кусочно-линейная функция, график которой приведен на рис. 5. Значение параметра  $x^*$  определяется как  $x^* = x_0^* + x^*(t)$ .

Интервал  $[0, t_0]$  моделирует задержку начала дрейфа, чтобы исключить влияние переходных процессов в системе, начинающей функционировать из произвольных начальных условий. Интервал  $(t_0, t_6]$  – период процесса,  $T = t_6 - t_0$ . Процесс повторяется циклически.

При надлежащем выборе задержек  $(t_1, t_2]$ ,  $(t_3, t_4]$ ,  $(t_5, t_6]$  можно исследовать различные случаи дрейфа характеристики, а также переходные процессы в системе. Например, исследование переходных процессов при разных алгоритмах выбора величины рабочего шага можно проводить при  $t_1 - t_0 = 0$ ,  $t_3 - t_2 = 0$ ,  $t_5 - t_4 = 0$ . Скорость дрейфа определяется на различных участках как  $v_1 = x_1 / (t_1 - t_0)$ ,  $v_2 = 0$ ,  $v_3 = (x_2 - x_1) / (t_3 - t_2)$ ,  $v_4 = 0$ ,  $v_5 = -x_2 / (t_5 - t_4)$ ,  $v_6 = 0$ .

Для цели исследования влияния инерционности объекта управления на процесс экстремального регулирования можно использовать модель линейного инерционного (апериодического) звена на входе и на выходе безынерционной модели объекта. Измерения значения выхода инерционной системы производятся в дискретные моменты времени. Для расчета переходных процессов можно применять различные методы.

Для решения задач исследования разработано программное приложение на основе современных объектно-ориентированных технологий.

В основу программного приложения положена имитационная модель САО, которая организована по модульному принципу. Программная система, в основном, отражает структуру имитационной модели и содержит следующие блоки: модель (алгоритм) САО, модель объекта управления, модель случайных возмущений и внешних воздействий. Дополнительные блоки, модуль сбора и обработки статистики моделирования, модуль аналитических расчетов и модуль планирования экспериментов, обеспечивают подготовку и проведение исследований САО.

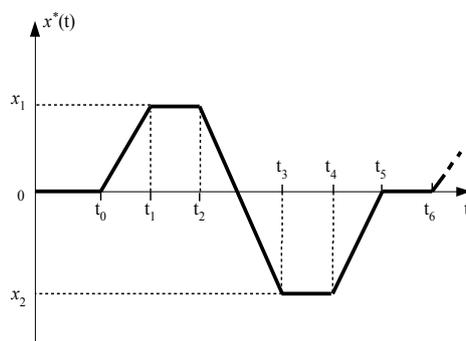


Рис. 5. Модель дрейфа параметра характеристики

Каждый модуль позволяет использовать различные математические схемы при моделировании соответствующих объектов. Взаимодействие моделирующих блоков осуществляется посредством универсальных межмодульных интерфейсов. Правила взаимодействия определяются требованиями используемого в системе имитационного  $\Delta t$ -моделирования.

Проведение исследований заключается в том, что из предоставляемых программным приложением модулей конструируется необходимая модель технического объекта, выбирается алгоритм статистической оптимизации и проводится имитационное моделирование. Результатом моделирования является набор реализаций случайного процесса функционирования системы статистической оптимизации. Эффективность функционирования САО оценивается по результатам моделирования с использованием набора специальных критериев [15].

Разрабатываемое проблемно-ориентированное программное приложение обеспечивает дополнительные возможности проведения исследований систем статистической оптимизации по сравнению с универсальными системами математического моделирования. Практическая полезность разработки состоит в возможности применения программного приложения для синтеза систем статистической оптимизации реальных технических объектов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чаки Ф. Современная теория управления. Нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: Пер. с англ. В.В. Капитоненко и др. – М.: Мир, 1975. – 422 с.
2. Красовский А.А. и др. Современная прикладная теория управления: Оптимизационный подход в теории управления / Под ред. А.А. Колесникова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. Ч. 1. – 400 с.
3. Александров А.Г. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
4. Белоглазов Д.А., Синявская Е.Д. Анализ современных методов автоматического управления // Неделя науки – 2010: Материалы научных работ. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – С. 49-51.
5. Алтунин А.Е., Семухин М.В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях: Монография. – Тюмень: Изд-во Тюменского государственного университета, 2000. – 352 с.
6. Саридис Д. Самоорганизующиеся стохастические системы управления: Пер. с англ. / Под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука, 1980. – 400 с.
7. Растринин Л.А. Адаптация сложных систем. – Рига: Зинатне, 1981. – 375 с.
8. Ming-Li Chiang, Li-Chen Fu. Adaptive stabilization of a class of uncertain switched nonlinear systems with backstepping control // Automatica. – 2014. – Vol. 50, Issue 8. – P. 2128-2135.

9. *Ruiyun Qia, Gang Taob, Bin Jianga*. Adaptive control of MIMO time-varying systems with indicator function based parametrization // *Automatica*. – 2014. – Vol. 50, Issue 5. – P. 1369-1380.
10. *Jiangping Hua, Wei Xing Zhengb*. Adaptive tracking control of leader - follower systems with unknown dynamics and partial measurements // *Automatica*. – 2014. – Vol. 50, Issue 5. – P. 1416-1423.
11. *Agrawal S.K., Das S*. Function projective synchronization between four dimensional chaotic systems with uncertain parameters using modified adaptive control method // *Journal of Process Control*. – 2014. – Vol. 24, Issue 5. – P. 517-530.
12. *Rawaa Dawoud Al-Dabbagh, Azeddien Kinsheel, Saad Mekhilef, Mohd Sapiyan Baba, Shahaboddin Shamshirband*. System identification and control of robot manipulator based on fuzzy adaptive differential evolution algorithm // *Advances in Engineering Software*. – 2014. – Vol. 78. – P. 60-66.
13. *Бесекевский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1979. – 768 с.
14. *Финаев В.И., Молчанов А.Ю.* Метод моделирования самонастраивающихся систем управления // *Известия ТРТУ*. – 2004. - № 8 (43). – С. 45-49.
15. *Финаев В.И., Молчанов А.Ю.* Модели систем автоматической оптимизации энергетических объектов // *Известия ТРТУ*. – 2004. - № 7 (42). - С. 82-87.

#### REFERENCES

1. *Chaki F*. *Sovremennaya teoriya upravleniya. Nelineynye, optimal'nye i adaptivnye sistemy* [modern control theory. Nonlinear, optimal and adaptive systems]: Per. s angl. V.V. Kapitonenko i dr. Moscow: Mir, 1975, 422 p.
2. *Krasovskiy A.A. i dr.* *Sovremennaya prikladnaya teoriya upravleniya: Optimizatsionnyy podkhod v teorii upravleniya* [Modern applied control theory: an Optimization approach to control theory]. – Taganrog: Izd-vo TRTU, 2000. Parte 1, 400 p.
3. *Aleksandrov A.G.* *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Handbook of automatic control theory]. Moscow: Nauka, 1987, 712 p.
4. *Beloglazov D.A., Sinyavskaya E.D.* *Analiz sovremennykh metodov avtomaticheskogo upravleniya* [The analysis of modern methods of automatic control], *Nedelya nauki – 2010: Materialy nauchnykh rabot* [Science week - 2010: proceedings of scientific works]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2010, pp. 49-51.
5. *Altunin A.E., Semukhin M.V.* *Modeli i algoritmy prinyatiya resheniy v nechetkikh usloviyakh* [Models and algorithms for decision making in fuzzy conditions]: Monografiya. Tyumen': Izd-vo Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta, 2000, 352 p.
6. *Saridis D.* *Samoorganizuyushchiesya stokhasticheskie sistemy upravleniya* [Self-organizing stochastic control systems]: Per. s angl. Pod red. Ya.Z. Tsyapkina. Moscow: Nauka, 1980, 400 p.
7. *Rastrigin L.A.* *Adaptatsiya slozhnykh system* [Adaptation of complex systems]. Riga: Zinatne, 1981, 375 p.
8. *Ming-Li Chiang, Li-Chen Fu*. Adaptive stabilization of a class of uncertain switched nonlinear systems with backstepping control, *Automatica*, 2014, Vol. 50, Issue 8, pp. 2128-2135.
9. *Ruiyun Qia, Gang Taob, Bin Jianga*. Adaptive control of MIMO time-varying systems with indicator function based parametrization, *Automatica*, 2014, Vol. 50, Issue 5, pp. 1369-1380.
10. *Jiangping Hua, Wei Xing Zhengb*. Adaptive tracking control of leader - follower systems with unknown dynamics and partial measurements, *Automatica*, 2014, Vol. 50, Issue 5, pp. 1416-1423.
11. *Agrawal S.K., Das S*. Function projective synchronization between four dimensional chaotic systems with uncertain parameters using modified adaptive control method, *Journal of Process Control*, 2014, Vol. 24, Issue 5, pp. 517-530.
12. *Rawaa Dawoud Al-Dabbagh, Azeddien Kinsheel, Saad Mekhilef, Mohd Sapiyan Baba, Shahaboddin Shamshirband*. System identification and control of robot manipulator based on fuzzy adaptive differential evolution algorithm, *Advances in Engineering Software*, 2014, Vol. 78, pp. 60-66.
13. *Besekerskiy V.A., Popov E.P.* *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Theory of automatic control systems]. Moscow: Nauka, 1979, 768 p.

14. *Finaev V.I., Molchanov A.Yu.* Metod modelirovaniya samonastravayushchikhsya sistem upravleniya [Method for simulation of self-tuning control systems], *Izvestiya TRTU [Izvestiya TSURE]*, 2004, No. 8 (43), pp. 45-49.
15. *Finaev V.I., Molchanov A.Yu.* Modeli sistem avtomaticheskoy optimizatsii energeticheskikh ob"ektov [Model systems of automatic optimization of energy facilities], *Izvestiya TRTU [Izvestiya TSURE]*, 2004, No. 7 (42), pp. 82-87.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

**Финаев Валерий Иванович** – Южный федеральный университет; e-mail: [finaev\\_val\\_iv@tsure.ru](mailto:finaev_val_iv@tsure.ru); 347928, г. Таганрог, ул. Энгельса, 1; тел.: 88634371689; кафедра систем автоматического управления; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

**Белоглазов Денис Александрович** – кафедра систем автоматического управления; ассистент.

**Павленко Елена Николаевна** – к.т.н.

**Шадрина Валентина Вячеславовна** – к.т.н.

**Finaev Valeri Ivanovich** – Southern Federal University; e-mail: [fin\\_val\\_iv@tsure.ru](mailto:fin_val_iv@tsure.ru); 1, Engelsa street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371689; the department of automatic control systems; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

**Beloglazov Denis Alexandrovich** – the department of automatic control systems; assistant.

**Pavlenko Elena Nikolaevna** – cand. of eng. sc.

**Shadrina Valentina Vyacheslavovna** – cand. of eng. sc.

УДК 621.316.726

**Ю.А. Геложе, П.П. Клименко, А.В. Максимов**

#### **ОРГАНИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ В ЦИФРОВОМ СИНТЕЗАТОРЕ ЧАСТОТЫ С ФАЗОВЫМ КОНТУРОМ СТАБИЛИЗАЦИИ**

*Работа посвящена исследованию организации управления процессами в цифровом синтезаторе частоты с фазовым контуром стабилизации. В статье представлены результаты исследования импульсных систем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), используемых для построения цифровых синтезаторов частоты (ЦСЧ). Приведены обобщенная структурная схема системы ФАПЧ и схема системы ФАПЧ с взаимодействующим функционированием элементов фазового контура и цепи формирования опорного сигнала. Рассмотрены схемы обеспечивают быстрое восстановление режимов слежения и стабилизации в условиях воздействия медленно изменяющихся факторов среды и неполадок в цепях питания, программирования, и других больших воздействиях импульсного типа. Представлены фазовые портреты в системе фазовой автоподстройки частоты и синтезаторе частоты. На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что для обеспечения надежной работы ФАПЧ в условиях непредвиденно больших дестабилизирующих факторов и внезапных кратковременных больших возмущений, целесообразно в критических режимах управлять не только процессами в фазовом контуре, но и процессом формирования опорного сигнала. Показано, что возникающий процесс самоорганизации обеспечивает новое взаимодействие элементов, приобретающее характер взаимодействия на получение нового результата, состоящего в уменьшении времени пребывания в критическом режиме и восстановления требуемого состояния системы.*

*Фазовая автоподстройка частоты; цифровые синтезаторы частоты; импульсный фазовый дискриминатор.*