

# ПРИЛОЖЕНИЕ МЕТОДОВ СИНТЕЗА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННЫМ ОБЪЕКТОМ

СОКОЛОВА С. П., СЫЗДЫКОВ Д. Ж., ШИРЯЕВА О. И.

---

УДК 004.8

*Соколова С.П., Сыздыков Д.Ж., Ширяева О.И.* **Приложение методов синтеза систем управления неопределенным объектом.**

**Аннотация.** Представлена вычислительная процедура синтеза системы управления неопределенным объектом. Алгоритм формирования управляющих сигналов был реализован на языке Assembler в среде MPLAB для микроконтроллера PIC16F877. Приведены результаты моделирования системы автоматического управления газотурбинной установкой электростанции на основе адаптивного управления с эталонной моделью.

**Ключевые слова:** неопределенный объект, адаптивное управление с эталонной моделью, газотурбинная установка электростанции.

UDC 004.8

*Sokolova S.P., Syzdykov D.Zh., Shiryayeva O.I.* **Application of synthesis methods of the uncertain object control system.**

**Abstract.** Computing procedure of an uncertain object control system synthesis is considered. The algorithm of control signals generation is realized with using Assembler in MPLAB environment for microcontroller PIC16F877. Modeling results of gas-turbine control system of power station on the basis of adaptive control with reference model is offered and investigated in this article.

**Keywords:** uncertain object, adaptive control with reference model, gas turbine (power) plant.

---

**1. Введение.** В реальных условиях системой можно управлять либо на основе априорных сведений в виде программы на весь период функционирования системы, либо с помощью процедур адаптивного и рекуррентного оценивания для устранения априорной параметрической неопределенности с использованием принципов управления с обратной связью. В этом случае принятие решения не сводится к единичному акту, а продолжается в ходе наблюдения за управляемым объектом.

В теории управления с неполной информацией важное место принадлежит задачам, в которых неизвестные параметры объекта управления заданы с точностью до априорных оценок, а процессы управления и идентификации должны происходить одновременно [1]. Широко распространенный дедуктивный подход к решению задач управления требует большого объема априорной информации об исследуемой мо-

дели. Значительно меньше априорной информации необходимо для индуктивного подхода, при котором оптимальная модель определяется как результат сравнения большого числа моделей-кандидатов по внешнему критерию.

В конце 1980-х и в 1990-х гг. был выполнен большой цикл работ по разработке теории адаптивных и робастных систем управления, функционирующих в условиях нестохастической неопределенности [2]. При этом задачи синтеза оптимальных, квазиоптимальных и робастно-оптимальных систем были решены для объектов управления, описываемых в терминах дифференциальных и разностных уравнений [3].

Показатели оптимальной системы могут быть весьма чувствительны к малым динамическим параметрам, характеризующим неточность модели объекта регулирования и каналов возмущений, измерительных датчиков и т. д. Это в полной мере относится и к теории адаптивных систем с настраиваемой моделью, так как оптимальные алгоритмы оценивания (например, метод максимального правдоподобия и его рекуррентные аналоги) теряют работоспособность при учете таких неидеальностей в модели канала возмущения. Неработоспособность оптимальных алгоритмов идентификации породила многочисленные попытки популяризации методов робастного оценивания П. Хубера и его обобщений на различные классы динамических объектов.

Между тем применение робастного оценивания в теории адаптивных систем несколько не приблизило решение проблемы оптимальности. Действительный алгоритм идентификации естественно считать оптимальным, если он не ухудшаем по скорости сходимости или, по крайней мере, по порядку скорости сходимости с ростом выборки. В условиях полной априорной информации о помехе (при достаточно широких предположениях), оценки метода максимального правдоподобия не могут быть улучшены по порядку скорости сходимости.

Применение робастных оценок в теории адаптивных систем может быть оправданным лишь в том случае, когда потери в быстродействии робастных и оптимальных алгоритмов для достаточно узких классов распределений помех будут малыми. Использование робастных адаптивных алгоритмов требует и других ограничений на помеху, которые не имеют какой-либо физической интерпретации и недоступны для экспериментальной проверки, например, предположение об унимодальности плотности распределения помехи. Необходимо подчеркнуть, что нагромождение различных искусственных ограничений в угоду доктрине «оптимальности на классе» противоречит самой сути

адаптивной идентификации как оценивания в условиях начальной неопределенности [3].

Робастные алгоритмы обычно строятся в рамках схемы стохастической аппроксимации и, следовательно, обладают всеми недостатками этого метода, в частности, низкой скоростью сходимости. По этой причине алгоритмы стохастической аппроксимации не используются для приложения к системам регулирования с настраиваемой моделью. Распространение метода стохастической аппроксимации в инженерных расчетах объясняется обычно удобством обработки данных на ЦВМ и простотой программирования. Однако при этом игнорируются некоторые особенности машинной арифметики.

По этой причине любые асимптотические характеристики сходимости (оптимальность, робастность и т. д.) для практических целей совершенно бессмысленны. Причина расходимости очевидна и состоит в уменьшении коэффициента передачи алгоритма. В этой связи необходимо отметить следующее. Хорошо известно, что есть глубокая аналогия между теорией регулирования и идентификацией, состоящая в применении принципа обратной связи для компенсации возмущений. Было бы естественно ожидать, что дальнейшее развитие этой аналогии пойдет по пути использования в идентификации эффекта глубокой обратной связи и больших коэффициентов усиления.

Однако исследование сходимости робастных алгоритмов адаптивной идентификации сильно усложняется, а количественные оценки для переходных процессов, вызванных такой заменой, неизвестны. С точки зрения приложений, отсутствие точных результатов не позволяет получить оценки качества переходных процессов, вызванных заменой неконструктивного сходящегося алгоритма конструктивным эвристическим алгоритмом.

Чтобы продемонстрировать особенности приложения методов для синтеза систем, нечувствительных к параметрам адаптивных систем управления линейными объектами с неопределенностями во временной области, в данной работе представлена система управления процессами газотурбинной установки.

**2. Вычислительная процедура синтеза системы управления неопределенным объектом.** Рассмотрим систему автоматического управления газотурбинной установкой, представленную в работе [2] линейной одномерной по входу и выходу авторегрессионной моделью в виде

$$x_k = -\sum_{i=1}^n a_i x_{k-i} + \sum_{i=1}^n b_i u_{k-i}, \quad (1)$$

где  $x_k$  — представляет выход из системы,  $u_k$  — вход системы,  $k$  — дискретное время.

Порядок системы  $n$ , выбираемый для модели (1) является известным.

Определяемые параметры модели  $a_i$  и  $b_i$  объединяются в вектор параметров модели  $\theta$  в форме

$$\theta^T = [a_1 \dots a_n, b_1 \dots b_n]. \quad (2)$$

Введение оператора обратного сдвига  $q^{-m} x_{k+m} = x_k$  позволяет записать уравнение (1) в виде [2]

$$a(q^{-1})x_k = b(q^{-1})u_k,$$

или

$$x_k = \frac{b(q^{-1})}{a(q^{-1})}u_k,$$

где

$$a(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_n q^{-n},$$

$$b(q^{-1}) = b_1 q^{-1} + \dots + b_n q^{-n}.$$

Формой представления, эквивалентной модели (1), является способ векторного описания

$$x_k = \theta^T \phi_k,$$

где  $\phi_k^T = [x_{k-1}, \dots, -x_{k-n}, u_{k-1}, \dots, u_{k-n}]$ .

Преобразуем математическую модель (1) к непрерывному виду в пространстве состояний:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad x(0) = x_0, \quad t \in (0, +\infty) \quad (3)$$

где  $t$  — непрерывное время.

В дальнейшем положим, что  $\theta$  в выражении (2) обозначает вектор параметров непрерывной системы  $A$  и  $B$ .

В общем случае задачу синтеза системы управления с регулятором неизменяемой структуры при отклонениях параметров можно сформулировать следующим образом. Пусть заданы математическая модель объекта регулирования и набор интересующих

параметров с их отклонениями  $\Delta\theta \in \Omega_\theta$ . Требуется найти не зависящий или зависящий от параметров регулятор (с обратной связью по состоянию или по выходу), такой, что среди других условий выполнено одно из следующих требований:

а) для случая синтеза по критерию чувствительности минимизирована выбранная мера чувствительности относительно параметров;

б) для случая адаптивного синтеза определены модель и алгоритм перестройки параметров регулятора.

*Определение 1 [1].* Не зависящий от параметров (неизменяемый) регулятор (система регулирования), для которого минимизируется мера чувствительности функции системы, называется нечувствительным или минимально чувствительным.

*Определение 2 [1].* Зависящий от перестраиваемых параметров (изменяемый) регулятор (система регулирования), для которого осуществляется управление с самонастройкой и слежением за моделью, называется адаптивным.

Рассмотрим задачу оптимального линейного управления для математической модели объекта управления (3) при ограничении на чувствительность.

Методы снижения чувствительности траектории к изменениям параметров в задаче построения оптимального линейного регулятора включают термины состояния и чувствительности траектории в характеристику линейного управления с обратной связью или используют введение квадратичных членов чувствительности в подынтегральное выражение функционала потерь:

$$J_c = \frac{1}{2} \int (x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)) dt, \quad (4)$$

где  $Q$  и  $R$  — неотрицательно и положительно определенные симметричные матрицы размеров  $n \times n$  и  $m \times m$  соответственно.

В соответствии с математической моделью объекта управления и критерием качества (4), управление формируется обратной связью по состоянию

$$\begin{aligned} u(t) &= -F_c x(t), \\ F_c &= R^{-1} B^T \lambda, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\lambda$  — симметричная матрица, которая является решением алгебраического матричного уравнения Рикатти

$$A^T \lambda + \lambda A + Q - \lambda B R^{-1} B^T \lambda = 0.$$

Если полученная система управления не удовлетворяет требованиям нечувствительности, то имеет место критерий чувствительности  $J_s$  для объекта управления

$$J_s = \text{tr} \left( \frac{\partial J'}{\partial \theta} \delta \theta^T \right) = \text{tr}(\sigma \delta \theta^T),$$

где  $\sigma$  — чувствительность различных состояний к вариациям параметров

$$\sigma = \frac{\partial J'}{\partial \theta};$$

$\theta$  — вектор параметров, элементами которого являются матрицы  $A$  и  $B$ ;  $J'$  — параметр, определяющий критерий чувствительности:

$$J' = \int_0^{\infty} x(t)^T H x(t) dt;$$

$H$  — симметричная неотрицательно-определенная матрица, которая может отличаться от  $Q$ .

Для достижения требуемого компромисса между показателем качества, с одной стороны, и требованием нечувствительности, с другой стороны, необходимо определить параметры критериев  $J'$ ,  $J_s$  при малых вариациях параметров математической модели

$$\dot{x}(t) = (A + \delta A(t))x(t) + (B + \delta B(t))u(t). \quad (6)$$

Для случая адаптивного управления с эталонной моделью цель синтеза минимального регулятора состоит в том, чтобы состояние объекта  $x(t)$  точно отслеживало состояние эталонной модели  $x_m(t)$  в присутствии неизвестных возмущений  $\delta A(t)$  и  $\delta B(t)$ . При этом математическая модель эталонной модели известна:

$$\dot{x}_m(t) = A_m x_m(t) + B_m r(t).$$

С учетом уравнений (3), (5) можно получить математическую модель замкнутой системы

$$\dot{x}(t) = (A - BF_s)x(t) = Wx(t). \quad (7)$$

Критерии  $J'$ ,  $J_s$  при вариации параметров математической модели (6) и математической модели (7) имеют вид [3]:

$$J' = x_0^T(t) \int_0^{\infty} e^{W^T t} H e^{Wt} dx_0 = x_0^T(t) S x(t) = \text{tr} SP, \quad (8)$$

$$S = \int_0^{\infty} e^{w^T t} H e^{w t} dt, \quad P = x_0 x_0^T,$$

где матрица  $S$  — решение уравнения Ляпунова

$$W^T S + S W + H = 0. \quad (9)$$

Величина  $\frac{\partial J'}{\partial \theta}$  оценивается через выражения  $\frac{\partial J'}{\partial A}$ ,  $\frac{\partial J'}{\partial B}$ :

$$\frac{\partial J'}{\partial A} = \frac{\partial \Delta J'}{\partial \Delta A} = 2S \int_0^{\infty} e^{w t} P e^{w^T t} dt = \tilde{S} \tilde{A}; \quad \frac{\partial J'}{\partial B} = -\tilde{S} \tilde{A} F_s^T. \quad (10)$$

Следовательно, критерий чувствительности имеет вид:

$$J_s = tr(\tilde{S} \tilde{A} \delta A^T - \tilde{S} \tilde{A} F_s^T \delta B^T).$$

Определение величины  $F_s$ , минимизирующей критерий  $J_s$ , с учетом выражений (8–10) проводится по формуле:

$$\frac{\partial J_s}{\partial F_s} = \partial tr \frac{[\tilde{S} \tilde{A} (\delta A^T - F_s^T \delta B^T)]}{\partial F_s} = R^{-1} (S \Omega B^T + B^T \rho \Gamma + \delta B^T S \Gamma),$$

где величины

$$\Omega = \int_0^{\infty} e^{w^T t} [\tilde{A} (A^T - F_c^T B^T) + (A - B F_c) \tilde{A}] e^{w t} dt,$$

$$\rho = \int_0^{\infty} e^{w^T t} [\tilde{S} \tilde{A} (\delta A - B \delta F_c) + (\delta A^T - F_c^T \delta B^T) S] e^{w t} dt.$$

Общий критерий имеет вид:

$$J_0 = \beta_1 J_c + \beta_2 J_s; \quad \beta_1 + \beta_2 = 1; \quad 0 \leq \beta_i \leq 1, \quad i = 1, 2, \quad (11)$$

где  $\beta_1, \beta_2$  — постоянные коэффициенты, определяемые для обеспечения компромисса между критерием качества  $J_c$  и скалярным критерием чувствительности  $J_s$ .

В соответствии с математической моделью системы управления (6) и критерием качества (11) синтез управления по закону адаптивного управления с эталонной моделью осуществляется по закону

$$u(t) = (-F_c + \delta F_c(t))x(t) + (-F_{cr} + \delta F_{cr}(t))r(t) = -F_0 x(t) + -F_{0r} x(t), \quad (12)$$

где  $F_0$  обеспечивает минимизацию критерия качества и минимизацию критерия чувствительности

$$F_0 = R^{-1} \left[ B^T \lambda + \frac{\beta_2}{\beta_1} (S \Omega B^T + B^T \rho \tilde{A} + \delta B^T S \tilde{A}) \right].$$

Алгоритм решения поставленной задачи основан на следующих шагах. Сначала минимизируется критерий вида  $J_c$ . Если полученная система управления не удовлетворяет требованиям нечувствительности или робастности, ввиду наличия в критериях членов  $J_s$ , увеличивается матрица  $Q$  и повторяется процесс оптимизации. Увеличение  $Q$  производят согласно соотношению

$$Q_{neu} = Q_{alt} + \beta S,$$

где  $Q_{neu}$  и  $Q_{alt}$  — новое и старое значения матрицы  $Q$  соответственно,  $\beta > 0$ .

С одной стороны, добавление положительно определенной матрицы  $S$  к матрице  $Q$  в равенстве (4) приводит к увеличению  $J_c$ . С другой стороны, увеличение  $Q$  также связано с уменьшением  $J_s$ . С помощью описанного выше выбора  $S$  достигается наиболее приемлемый компромисс между увеличением  $J_c$  и уменьшением  $J_s$ .

**3. Синтез системы управления газотурбинной установкой.** Построенная система управления неопределенным объектом приведена на рис. 1, где использованы следующие обозначения:  $u$  — сигналы управления;  $y$  — выходные сигналы; RA0 — порты вывода для аналоговых сигналов; RC0 — двунаправленные порты ввода—вывода для цифровых сигналов. Управляющие сигналы были сформированы по закону (12). Алгоритм формирования управляющих сигналов был реализован на языке Assembler в среде MPLAB для микроконтроллера PIC16F877.

Выходной сигнал  $y$  поступает на блок согласования, где преобразуется в нормированные сигналы для подачи на входы контроллера УМК-7. Аналоговые сигналы поступают на входы АЦП УМК-7, цифровые — на вход таймера счетчика УМК-7. После обработки сигналов по заданной программе контроллер УМК-7 передает данные для визуализации на мониторе ПК (программа «PLC») в модем блока согласования по протоколу RS-232.

Контроллер также управляет объектом управления на основании выбранного закона управления (12) посредством широтно-импульсного модулятора (ШИМ). Сигнал от ШИМ контроллера поступает в блок согласования, где сглаживается и усиливается.



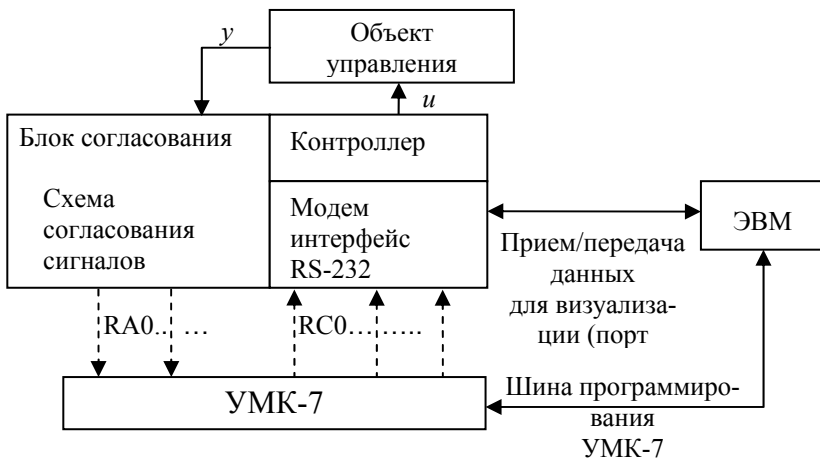
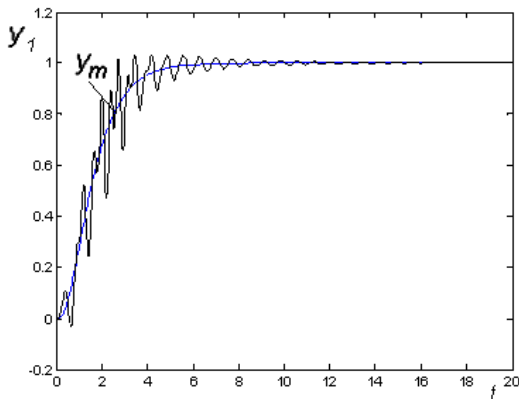


Рис. 1. Структурная схема системы управления неопределенным объектом.

Для синтезированной системы автоматического управления газотурбинной установкой электростанции получены результаты моделирования управления (рис. 2) на основе адаптивного управления с эталонной моделью  $y_m(t)$ .



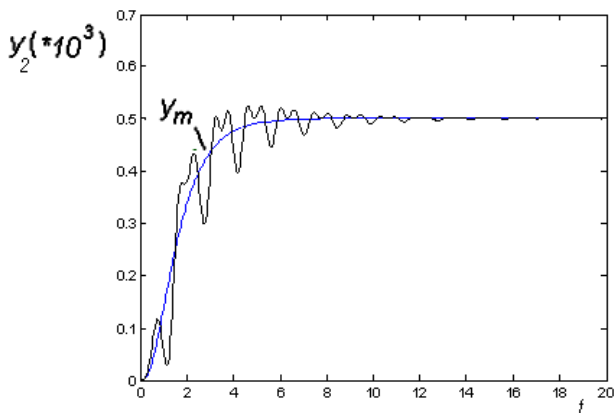


Рис. 2. Управляемые параметры газотурбинной установки.

В качестве управляемых параметров  $y(t)$  газотурбинной установки выбраны следующие параметры:

- частота вращения ротора генератора  $y_1(t)$ ;
- температура газа, поступающая на лопатки турбины, где тепловая энергия потока превращается в механическую энергию вращения роторов турбин  $y_2(t)$ .

Закон управления (12) реализуется с нахождением значений векторов настраиваемых параметров. Вышеприведенные результаты позволяют свести процедуры синтеза регуляторов к алгоритмам с использованием классических методов в соответствии с заданными качественными требованиями.

### Литература

1. Сыздыков Д. Ж. Чувствительность, робастность и адаптивность в системах управления. Временной подход // Вестник КазНТУ. 2004. № 4 (42). С. 76–86.
2. Сыздыков Д. Ж. Синтез адаптивных регуляторов // КИПиА в Казахстане. № 4 (10). 2005. С. 58–60.
3. Middleton R. H., Goodwin G. C., Hill D. J., Mayne D. Q. Design issues in adaptive control // IEEF Trans. Autom. Contr. 1988. Vol. 33, N 1. P. 50–58.

**Соколова Светлана Павловна** — д-р. техн. наук, проф.; ведущий научный сотрудник лаборатории прикладной информатики Учреждения Российской академии наук Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН). Область научных интересов: адаптивные системы управления; интеллектуальные информационные технологии. Число научных публикаций — 142. sokolova\_sv@mail.ru; СПИИРАН,

14-я линия В.О., д.39, Санкт-Петербург, 199178, РФ; р.т. +7(812)328-1919, факс +7(812)328-4450.

**Sokolova Svetlana Pavlovna** — Dr.Sc. (Tech.), PhD, professor; leading researcher, Applied Informatics Department, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: adaptive control systems, intelligent information technologies. The number of publications — 142. sokolova\_sv@mail.ru; SPIIRAS, 39, 14th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)328-1919; fax +7(812)328-4450.

**Сыздыков Дастан Жаканович** — д-р. техн. наук, проф. кафедры «Автоматика и телемеханика» Казахского национального технического университета (КазНТУ). Область научных интересов: адаптивные и робастные системы управления. Число научных публикаций — 137. КазНТУ, д.13, ул. Сатпаева, Алма-Ата, 050022, Республика Казахстан; р.т. +7(727)292-7745.

**Syzdykov Dastan Jakanovich** — Dr.Sc. (Tech.), PhD, professor; professor of Automatics and Telemechanics department of Kazakh national technical university. Research interests: adaptive and robust control systems. The number of publications — 137. KazNTU, Satpaeva 13, Almaty, Republic of Kazakhstan; office phone +7(727)292-7745.

**Ширяева Ольга Ивановна** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Казахского национального технического университета (КазНТУ). Область научных интересов: адаптивные и робастные системы управления. Число научных публикаций — 57. КазНТУ, д.13, ул. Сатпаева, Алма-Ата, 050022, Республика Казахстан; р.т. +7(727)292-7745.

**Shiryayeva Olga Ivanovna** — Ph.D., associated professor of Automatics and Telemechanics department of Kazakh national technical university. Research interests: adaptive and robust control systems. The number of publications — 57. KazNTU, Satpaeva, 13, Almaty, Republic of Kazakhstan; office phone +7(727)292-7745.

Рекомендовано группой проблем информатизации общества и моделирования глобальных процессов СПИИРАН, зав. лаб. В.П. Заболотский, д-р. техн. наук, проф.  
Статья поступила в редакцию 14.12.2009.

## РЕФЕРАТ

### *СОКОЛОВА С.П., СЫЗДЫКОВ Д.Ж., ШИРЯЕВА О.И.* **Приложение методов синтеза систем управления неопределенным объектом.**

В теории управления с неполной информацией важное место принадлежит задачам, в которых неизвестные параметры объекта управления заданы с точностью до априорных оценок, а процессы управления и идентификации происходят одновременно.

В статье представлено одновременное решение задач идентификации и синтеза линейного оптимального адаптивного регулятора (с обратной связью по состоянию или по выходу) для следующих случаев:

— синтез по критерию чувствительности осуществляется путем минимизации выбранной меры чувствительности относительно параметров объекта;

— при адаптивном синтезе определяются соответственно модель и алгоритм перестройки параметров регулятора.

При этом снижение чувствительности траектории к изменениям параметров объекта осуществлено за счет введения квадратичных членов чувствительности в подынтегральное выражение функционала потерь.

Алгоритм формирования управляющих сигналов реализован на языке Assembler в среде MPLAB для микроконтроллера PIC16F877. Приведены результаты моделирования переходного процесса в разработанной системе адаптивного управления.

## SUMMARY

### *Sokolova S.P., Syzdykov D.Zh., Shiryayeva O.I.* **Application of synthesis methods of the uncertain object control system.**

In this article the simultaneous solution of identification task and linear adaptive controller synthesis (with the state or output feedback) is offered for the following cases:

— synthesis on the sensibility criterion is realized by the way of selected sensibility measure minimization with respect to object parameters;

— mathematical model and rearrangement algorithm of the parameters controller is defined on the adaptive synthesis.

By the way desensitization to object parameters variation is realize by insertion the quadratic sensibility members to the subintegral expression of loss functional.

Computing procedure of an uncertain object control system synthesis is considered.

The effectiveness of received investigation results is given a demonstration of adaptive control system of gas-turbine system of power station. The algorithm of control signals generation is realized with using Assembler in MPLAB environment for microcontroller PIC16F877. Modeling results of gas-turbine control system of power station on the basis of adaptive control with reference model is offered and investigated in this article.