

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ УПРАВЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ТУРБОГЕНЕРАТОРАМИ

Джолдошев Б.О., д.т.н., проф., КГТУ им.И.Раззакова, Кыргызстан, 720044, Бишкек, пр. Ч.Айтматова 66. Тел.: 0312545173, email: bekbolot2009@yandex.ru, ORCID ID 0000-0001-5699-2262

Темиркулова Н.Т., преп., КГТУ им.И.Раззакова, Кыргызстан, 720044, Бишкек, пр. Ч.Айтматова 66. Тел.: 0312545173, email: temirkulova.n@gmail.com, ORCID ID 0000-0003-0501-8579

Кемелов Т., магистр КГТУ им.И.Раззакова, Кыргызстан, 720044, Бишкек, пр. Ч.Айтматова 66. Тел.: 0312545173, email: kemelov.tolkunbek@mail.ru

Аннотация. Вопросы управления генераторами в энергосистемах являются актуальными и чрезвычайно сложными для существующих методов системы автоматического управления (САУ). Для полноценного управления турбогенераторами, необходимо рассматривать их нелинейные модели с учётом влияния внешних возмущений и проводит синтез САУ совершенно новыми методами или алгоритмами, которые в наиболее полной мере позволяют учесть явления взаимосвязанности и нелинейности процессов [2]. В настоящее время возникла необходимость разработке новых методов и алгоритмов управления, которые обеспечивали надёжную генерацию электроэнергии нужного качества с одновременной минимизацией себестоимости электроэнергии. Для эффективного управления турбогенераторами, необходимо рассматривать их нелинейные модели с учётом неопределённых и неконтролируемых внешних возмущений и проводит синтез и проектирование систем автоматического управления (САУ) совершенно новыми методами и алгоритмами, которые в наиболее полной мере позволяют учесть явления взаимосвязанности и нелинейности процессов.

Предложен метод синтеза системы управления, позволяющие обеспечить основные требования к проектируемой системе при заданных инженерных требованиях к основным характеристикам системы (быстродействие, точность и т.д.), а также ограничений на величины управляющих воздействий и управляемых переменных. Использование введенных функций и полученных аналитических условий дало возможность разработать единый подход к решению задач управления. Оценка качества процессов управления объектов осуществляется с помощью функциональных соотношений, определяемых непосредственно по переходным процессам рассматриваемых систем.

Ключевые слова: метод синтеза, турбогенераторы, система автоматического управления (САУ), нелинейность, взаимосвязанность, устройство управления, регуляторы.

STRUCTURAL SYNTHESIS OF THE CONTROL DEVICE BY TURBOGENERATORS

Djoldoshov B.O. PhD (Engineering), Associate Professor, Kyrgyzstan, 720044, c.Bishkek, KSTU named after I.Razzakov. Phone: 0312-54-51-73, e-mail: bekbolot2009@yandex.com ORCID ID 0000-0001-5699-2262

Temirkulova N.T. aspirant, Kyrgyzstan, 720044, c.Bishkek, KSTU named after I.Razzakov. Phone: 0312-54-51-73, e-mail: temirkulova.n@gmail.com ORCID ID 0000-0003-0501-8579

Kemelov T. master of KSTU named after I.Razzakov, Kyrgyzstan, 720044, c.Bishkek, email: 00000000000000000000@mail.ru

Abstract. The issues of generator control in power systems are actual and extremely complex for existing methods of automatic control system (ACS). For a full-fledged control of turbo-generators, it is necessary to consider their non-linear models taking into account the influence of external perturbations and conducts the synthesis of automatic control systems by completely new methods or algorithms that allow the phenomena of interconnectedness and non-linearity of processes to be fully taken into account. At present, there was a need to develop new methods and control algorithms that provided reliable generation of electricity of the right quality while minimizing the cost of electricity. For effective control of turbogenerators, it is necessary to consider their nonlinear models taking into account undefined and uncontrollable external disturbances and conducts the synthesis and design of automatic control systems (ACS) by completely new methods and algorithms that allow the phenomena of interconnection and nonlinearity of processes to be fully taken into account.

The method of synthesis of the control system is proposed that allows to provide the basic requirements for the system being designed for the given engineering requirements to the main characteristics of the system (speed, accuracy, etc.), as well as constraints on the values of control actions and controlled variables. The use of the introduced functions and the obtained analytical conditions made it possible to develop a unified approach to solving management problems. Evaluation of the quality of object management processes is carried out using functional relationships, determined directly by the transient processes of the systems under consideration.

Keywords: synthesis method, turbo-generators, automatic control system (ACS), nonlinearity, interconnection, control device, regulators.

Алгоритм синтеза управлений. Рассмотрим нелинейный многомерный объект управления, состояния, которой, описывается следующим нелинейным векторным дифференциальным уравнением [3,4]:

$$\dot{x}_i(t) = f_i[x(t), u(t), \xi(t), t], \quad x_i(t_0) = x_i^0, \quad i = \overline{1, n}, \quad t \in [t_0, t_k], \quad (1)$$

где $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$ – вектор переменных состояния или вектор фазовых координат объекта управления; $u(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)]^T$ – вектор управления (управляющих или регулирующих воздействий), $f(x, u) = f(x, u, \xi, t) = [f_1(x, u, \xi, t), f_2(x, u, \xi, t), \dots, f_n(x, u, \xi, t)]^T$ – вектор-функция, удовлетворяющие условиям Коши; $\xi(t) = [\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_r(t)]^T$ – вектор возмущений.

Основными показателями качества регулирования будем считать динамическую и статическую точность, и быстродействие системы управления. Обозначим через граничные положительные функции $\sigma_i(t)$, с помощью которых задаются границы допустимых областей. Переходные процессы по ошибке управления (невязки) $e_i(t)$ определяют предъявляемые требования к качеству процессов управления синтезируемой системы. Степень достижение цели управления или регулирования $g_i(t)$ характеризуется на основе следующих модульных неравенств [3-5]:

$$|x_i(t)| = |e(t)| \leq \sigma_i(t), \quad t \in [t_0, t_k], \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где $\sigma_i(t)$ – положительные, непрерывно-дифференцируемые функции, определяющие качество проектируемой автоматической системы.

Задача управления формулируется таким образом: для управляемого объекта, состояния которой описывается дифференциальным уравнением (1), необходимо определить структуру и параметры автоматического регулятора, обеспечивающего выполнение к точности и быстродействию проектируемой системы, т.е. к качеству процесса управления (2).

Желаемую динамику САУ зададим в виде векторного дифференциального уравнения [4]

$$\dot{x}(t) = f^*(x, p), \tag{3}$$

где $f^* = [f_1^*(x, p_1), f_2^*(x, p_1), \dots, f_n^*(x, p_n)]^T$ – нелинейная вектор-функция; $p = [p_1, p_2, \dots, p_n]$ – r -мерный вектор-параметр, подлежащий выбору так, чтобы решение $x(t)$ системы (3) удовлетворяло условиям заданного качества управления (2).

Условия близости соответствующих компонентов вектор-функций $f(x, u)$ и $f^*(x, p)$ задаются в виде модульных неравенств:

$$f_i[x(t), u(t), \xi, t] - f_i^*[x(t), p] \leq \delta_i(t), \quad i = \overline{1, n}, \quad t \in [t_0, t_k], \tag{4}$$

где $\delta_i(t)$ – функции, которые задают точность приближения, они положительные и непрерывно дифференцируемые.

Введем функцию

$$F_i(x, u) = f_i(x, u, \xi, t) - f_i^*(x, p), \quad i = \overline{1, n}, \tag{5}$$

или

$$|F_i(x, u)| \leq \delta_i(t), \quad i = \overline{1, n}, \quad t \in [t_0, t_k].$$

где $F(x, u) = [F_1(x, u), F_2(x, u), \dots, F_n(x, u)]^T$.

Если потребовать, чтобы желаемая траектория имела следующий аналитический вид:

$$\dot{F}_i(x, u) = \sum_{j=1}^m \gamma_{ij} \left[F_j(x, u) + \int_{t_0}^t F_i(x, u) d\tau + \frac{dF(x, u)}{dt} \right], \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}, \tag{6}$$

то

$$\sum_{v=1}^m \frac{\partial F_i}{\partial u_v} \cdot u_v(t) + \sum_{j=1}^m \frac{\partial F_i}{\partial x_j} \cdot f_j(x, u) = \sum_{j=1}^m \gamma_{ij} \left[F_j(x, u) + \int_{t_0}^t F_i(x, u) d\tau + \frac{dF(x, u)}{dt} \right],$$

или

$$M \cdot \frac{du(x, t)}{dt} + \tilde{Z} \cdot f(x, u) = Y \left[F_j(x, u) + \int_{t_0}^t F_i(x, u) d\tau + \frac{dF(x, u)}{dt} \right],$$

Уравнение динамики управляющего устройства имеет вид:

$$\frac{du(x, t)}{dt} = L \cdot \left[F_j(x, u) + \int_{t_0}^t F_i(x, u) d\tau + \frac{dF(x, u)}{dt} \right] - \tilde{Z} \cdot f(x, u) \tag{7}$$

где функциональные матрицы

$$\tilde{Z} = \left\{ \frac{\partial F_i}{\partial x_j} \right\}_{n \times n}, \quad M = \left\{ \frac{\partial F_i}{\partial u_v} \right\}_{n \times m}, \quad H = \left\{ \frac{\partial F_i}{\partial \xi_v} \right\}_{n \times r},$$

а матрица $P = \{p_{ij}\}_{n \times n}$, $Y = \{\gamma_{iv}\}_{n \times n}$ – вещественные матрицы, составленные из настроечных параметров системы, а матрица $L = [M^T M]^{-1} \cdot M^T$.

Математическая модель турбогенераторов. Задача состоит в определении структуры и параметров автоматического регулятора, обеспечивающего стабилизацию выходных переменных в соответствии с вектором задания. Управляющими воздействиями на объект являются $U_{11}, U_{12}, U_{21}, U_{22}$, т.е. механические мощности турбин U_{11}, U_{12} и напряжения возбуждения генераторов U_{21}, U_{22} . Выходными (управляемыми) переменными являются частоты вращения и синхронные ЭДС первого и второго турбогенераторов.

Уравнения объекта состоящей из двух турбогенераторов с учётом внешних

низкочастотных возмущений в пространстве состояний в нормальной форме описывается следующим нелинейным дифференциальным уравнением [2,3]

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_3; \\ \dot{x}_2 = x_4; \\ \dot{x}_3 = (w_0 / T_{j1})(x_7 - a_1 x_5^2 - a_2 x_5 x_6 \sin(x_1 - x_2 - \alpha_{12}) - a_3 x_3 + x_9); \\ x_4 = (w_0 / T_{j2})(x_8 - a_4 x_6^2 - a_2 x_5 x_6 \sin(x_1 - x_2 - \alpha_{12}) - a_5 x_4 + x_{11}); \\ \dot{x}_5 = (1 / T_{d01})(-x_5 - a_6(x_3 - x_4) \sin(x_1 - x_2 - \alpha_{12}) + U_{11}); \\ \dot{x}_6 = (1 / T_{d02})(-x_6 - a_7(x_3 - x_4) \sin(x_1 - x_2 - \alpha_{12}) + U_{12}); \\ \dot{x}_7 = (1 / T_{c1})(-x_7 - a_8 x_3 + U_{21}); \\ \dot{x}_8 = (1 / T_{c2})(-x_8 - a_9 x_4 + U_{22}); \\ \dot{x}_9 = x_{10}; \\ x_{10} = -\xi_1^2 x_9; \\ \dot{x}_{11} = x_{12}; \\ \dot{x}_{12} = -\xi_2^2 x_{11}; \end{cases} \quad (8)$$

Алгоритм управления согласно формуле (7), имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dU_{11}}{dt} = & [T_{d01}(g_{55}(1/T_{d01} \times (-x_5 - a_6(x_3 - x_4) \sin(x_1 - x_2 - \alpha_{12}) + U_{11}) - p_{55}x_5 + \\ & + 1/T_{d01} \times (-x_5 x_1 + a_6(x_3 - x_4) \cos(x_1 - x_2 - \alpha_{12}) + U_{11}x_1) - p_{55}x_5 x_1 - \\ & - 1/T_{d01} \times a_6(x_3 - x_4) \cos(x_1 - x_2 - \alpha_{12})) + 1/T_{d01} \times a_6(x_3 - x_4) \cos(x_1 - x_2 - \alpha_{12})x_3 - \\ & - 1/T_{d01} \times a_6(x_3 - x_4) \cos(x_1 - x_2 - \alpha_{12})x_4 + 1/T_{d01} \times a_6 \sin(x_1 - x_2 - \alpha_{12})w_0 / T_{j1} \times (x_7 - \\ & - a_1 x_5^2 - a_2 x_5 x_6 \sin(x_1 - x_2 - \alpha_{12}) - a_3 x_3 + x_9) - 1/T_{d01} \times a_6 \sin(x_1 - x_2 - \alpha_{12})w_0 / T_{j2} \times \\ & \times (x_8 - a_4 x_6^2 - a_2 x_5 x_6 \sin(x_1 - x_2 - \alpha_{12}) - a_5 x_4 + x_{11}) - (-1/T_{d01} - p_{55}) / T_{d01} \times \\ & \times (-x_5 - a_6(x_3 - x_4) \sin(x_1 - x_2 - \alpha_{12}) + U_{11}))]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dU_{12}}{dt} = & [T_{d02}(g_{66}(1/T_{d02}(-x_6 - a_7(x_3 - x_4) \sin(x_1 - x_2 - \alpha_{12}) + U_{12}) - p_{66}x_6 + \\ & + 1/T_{d02} \times (-x_6 x_1 + a_7(x_3 - x_4) \cos(x_1 - x_2 - \alpha_{12}) + U_{12}x_1) - p_{66}x_6 x_1 - \\ & - 1/T_{d02} \times a_7(x_3 - x_4) \cos(x_1 - x_2 - \alpha_{12})) + 1/T_{d02} \times a_7(x_3 - x_4) \cos(x_1 - x_2 - \alpha_{12})x_3 - \\ & - 1/T_{d02} \times a_7(x_3 - x_4) \cos(x_1 - x_2 - \alpha_{12})x_4 + 1/T_{d02} \times a_7 \sin(x_1 - x_2 - \alpha_{12})w_0 / T_{j1} \times \\ & \times (x_7 - a_1 x_5^2 - a_2 x_5 x_6 \sin(x_1 - x_2 - \alpha_{12}) - a_3 x_3 + x_9) - 1/T_{d02} a_7 \sin(x_1 - x_2 - \alpha_{12}) \times \\ & \times w_0 / T_{j2} (x_8 - a_4 x_6^2 - a_2 x_5 x_6 \sin(x_1 - x_2 - \alpha_{12}) - a_5 x_4 + x_{11}) - (-1/T_{d02} - p_{66}) / T_{d02} \times \\ & \times (-x_6 - a_7(x_3 - x_4) \sin(x_1 - x_2 - \alpha_{12}) + U_{12}))]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dU_{21}}{dt} = & [T_{c1}(g_{77}(1/T_{c1} \times (-x_7 - a_8 x_3 + U_{21}) - p_{77}x_7 + (1/T_{c1} \times (-x_7 - a_8 x_3 + U_{21}) - \\ & - p_{77}x_7)x_1) + 1/T_{c1} \times a_8 w_0 / T_{j1} (x_7 - a_1 x_5^2 - a_2 x_5 x_6 \sin(x_1 - x_2 - \alpha_{12}) - a_3 x_3 + x_9) - \\ & - (-1/T_{c1} - p_{77}) / T_{c1} (-x_7 - a_8 x_3 + U_{21}))]; \end{aligned}$$

$$\frac{dU_{22}}{dt} = [T_{c2}(g_{88}(1/T_{c2}(-x_8 - a_9x_4 + U_{22}) - p_{88}x_8 + (1/T_{c2} \times (-x_8 - a_9x_4 + U_{22}) - p_{88}x_8)x_1) + 1/T_{c2}a_9w_0 / T_{j2}(x_8 - a_4x_6^2 - a_2x_5x_6 \sin(x_1 - x_2 - \alpha_{12}) - a_5x_4 + x_{11}) - (-1/T_{c2} - p_{88}) / T_{c2}(-x_8 - a_9x_4 + U_{22}))];$$

Результаты моделирования (переходные процессы переменных состояния первого и второго турбогенератора) при начальных условиях по состоянию: $\delta_{1_0} = 1.56$; $\delta_{2_0} = 1.1$; $s_{1_0} = -0.1$; $s_{2_0} = -0.1$; $E_{1_0} = 1$; $E_{2_0} = 2$; $P_{1_0} = 0.5$; $P_{2_0} = 0.5$; $\xi_{1_0} = 0.01$; $\xi_{2_0} = 0.01$; и коэффициентах надстройки регулятора $p_{11} = -0.1$; $p_{ij} = p_{11}$; $g_{11} = -5$; $g_{ij} = g_{11}$; представлены на рис. 1-6.

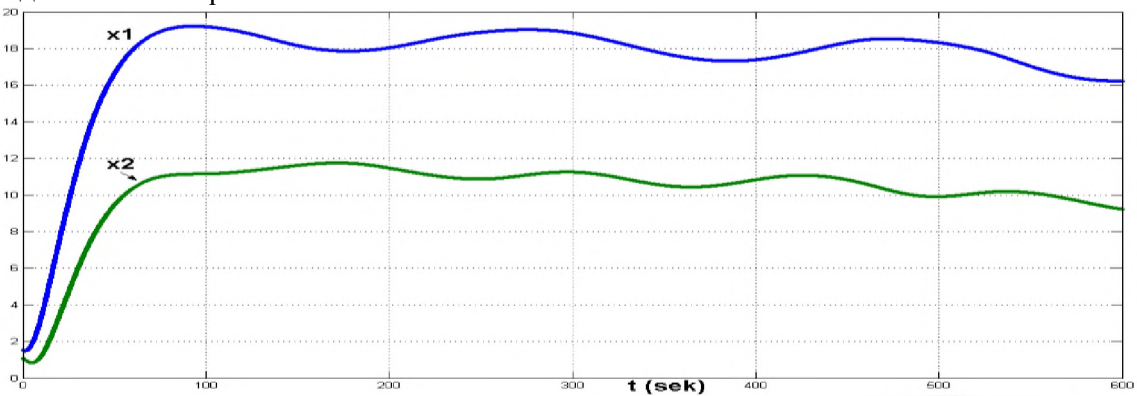


Рис. 1. Углы между ЭДС генераторов и напряжением сети δ_1, δ_2

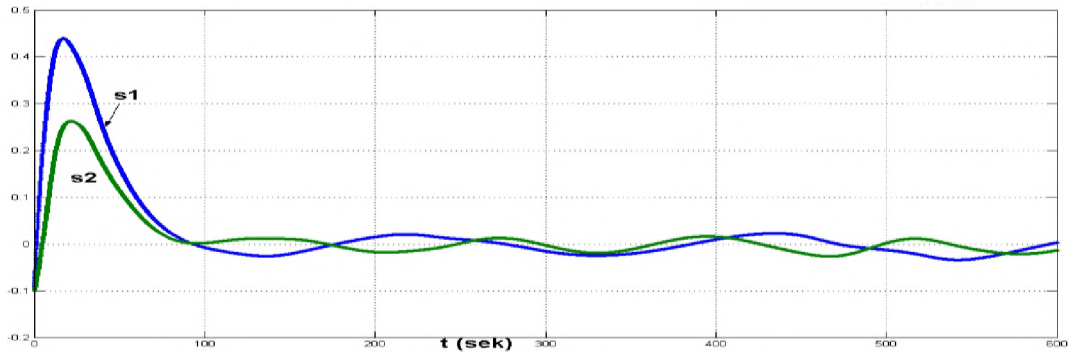


Рис. 2. Скольжения s_1, s_2

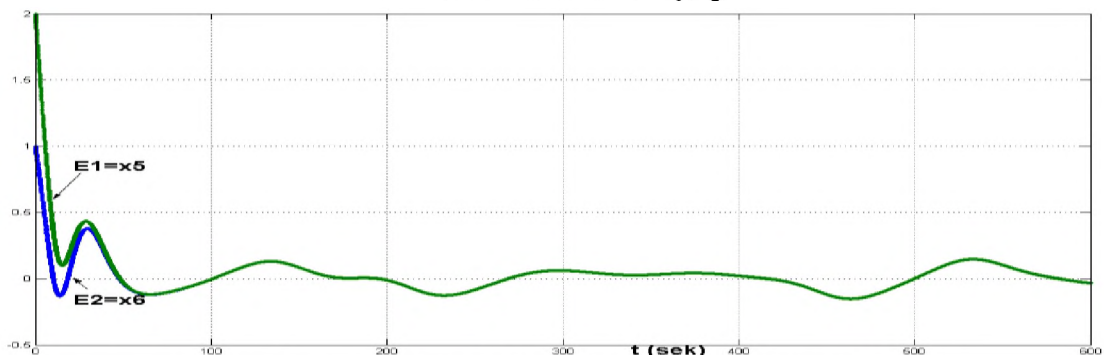
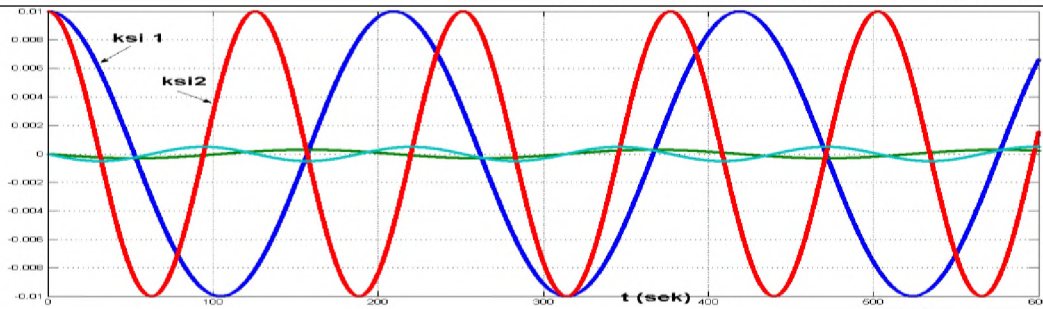
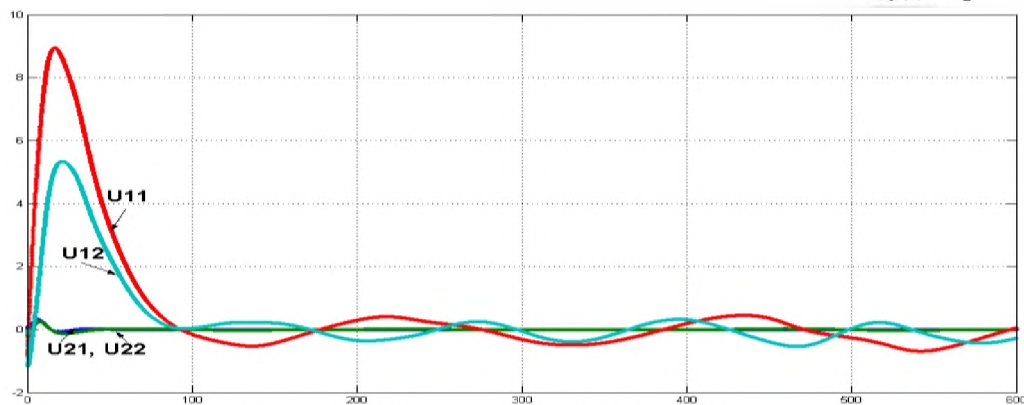


Рис. 3. Синхронные ЭДС СГ по поперечной оси E_1, E_2

Рис. 4. Внешние гармонические низкочастотные возмущения $\xi_1(t)$, $\xi_2(t)$ Рис. 5. Управляющие воздействия $U_{11}, U_{12}, U_{21}, U_{22}$

Моделирования САУ проводилось при значениях параметров турбогенераторов приведенных в [2-4].

Вывод. Анализы результатов моделирования показывают, что САУ является устойчивой, обеспечивается согласования частот (скольжений) турбин и стабилизацию ЭДС генераторов. Синтезированная САУ компенсирует низкочастотное гармоническое возмущение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андерсон Н.Л., Фуад А. Управление электрическими системами и устойчивостью. М., Энергия, 1978 г.
2. Колесников А.А. Синергетические методы управления системами: Энергетические системы/ - Едиториал, 2005.
3. Джолдошов Б.О., Темиркулова Н.Т. Синтез динамического регулятора для турбогенератора// Матер. межд. конф « Актуальные проблемы теории управления, топологии и операторных уравнений/ - Бишкек, КРСУ, 2013, - С. 40 -49.
4. Управления технологическими системами с учетом инженерных показателей качества // Джолдошов Б.О. / дисс. на соискание уч. степени д.т.н., -Бишкек, 2012.
5. Оморов Т.Т., Джолдошев Б.О. К оцениванию параметров в линейных многомерных системах с интервальной неопределенностью // Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики» АН РУз. – Ташкент, № 3, 2010. – С. 29-34.
6. Джолдошев Б.О., Оморов Т.Т., Джунушалиев У.Б. Динамическое проектирование управляющего устройства для нестационарной робастной системы // Межд. научно-практический семинар «Наука и технологии индустриально-инновац. развития Казахстана», 24 - 26 июня 2010 г., Астана. – С. 112 – 119.
7. Оморов Т.Т., Джолдошев Б.О. Синтез робастного регулятора для линейных систем управления // Матер. III межд. конф. «Асимптотические, топологические и