

## ДИНАМИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ПОДСИСТЕМЫ ДЛЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ С УЧЕТОМ ПРЯМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА

*Н.Т. Темиркулова, Б.К. Такырбашев, А.О. Айдралиев, Б.О. Джолдошов*  
*КГТУ им. И. Раззакова, ОАО «Северэлектро», Бишкек, Кыргызстан*  
*e-mail: [temirkulova.n@gmail.com](mailto:temirkulova.n@gmail.com), [bekbolot2009@yandex.ru](mailto:bekbolot2009@yandex.ru)*

*В статье рассмотрены проблемы определения структуры и параметров регулятора с учетом инженерных показателей качества для турбогенераторов, технологическая задача решаемая турбогенератором.*

*The article considers the problem of determining the structure and parameters of the controller with the engineering quality indicators for turbogenerators and technological problems are solved by turbogenerator.*

Рассмотрим задачу синтеза координирующих регуляторов для групп состоящей из двух турбогенераторов [4]. Необходимо синтезировать центральный координирующий регулятор с каналами управления  $U_{ii}$  возбуждением соответствующих синхронных генераторов (СГ) и каналами управления  $U_{2i}$  частотой вращения соответствующих турбин, который обеспечивает согласованную частоту вращения турбин  $\omega_i = \omega_0$ ; стабилизирует ЭДС синхронных генераторов; гарантирует асимптотическую устойчивость энергосистемы в целом; обеспечивает желаемые демпфирующие свойства энергосистемы; компенсирует внешнее низкочастотное гармоническое возмущение;

Поставленная задача синтеза отличается от традиционных следующими особенностями: согласованным управлением СГ и турбинами; согласованием частот вращения турбин; компенсацией внешнего низкочастотного гармонического возмущения, действующего со стороны энергосистемы; нелинейностью используемых моделей турбогенераторов.

Модель энергосистемы, состоящей из турбогенераторов, работающих на одну нагрузку – энергосистему большой мощности, можно представить следующим образом [4]:

$$\begin{cases} \frac{d\delta_i}{dt} = s; \\ T_{ji} \frac{ds_i}{dt} = P_{Ti} - E_i^2 y_{ii} \sin \alpha_{ii} - E_i U_c y_{iN} \sin(\delta_i - \alpha_{iN}) - \sum_{j=1, i \neq j}^n E_i E_j y_{ij} \sin(\delta_{ij} - \alpha_{ij}) + F(t); \\ T'_{di} \frac{dE_i}{dt} = -E_i + U_c T_{doi} (X_{di} - X'_{di}) \sum_{j=1, i \neq j}^n y_{ij} (s_i - s_j) \sin(\delta_{ij} - \alpha_{ij}) + U_{li}; \\ T_{ci} \frac{dP_{Ti}}{dt} = -P_{Ti} - \frac{s_i}{\sigma_i} + U_{2i}; \end{cases} \quad (1)$$

где  $i = \overline{1, n}$  – номер турбогенератора,  $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ ,  $y_{ii}$ ,  $y_{ij}$ ,  $y_{iN}$  – модуль собственной, взаимной проводимости СГ и  $i$ -го СГ с энергосистемой соответственно,  $\alpha_{ii}$ ,  $\alpha_{ij}$ ,  $\alpha_{iN}$  – дополнительные углы соответствующих проводимостей СГ,  $T'_{di} = T_{doi} (1 + y_{ii} (X_{di} - X'_{di}) \cos \alpha_{ii})$ ,  $x_1 = \delta_1$ ,  $x_2 = \delta_2$  – углы поворота ротора относительно синхронной оси;  $x_3 = s_1$ ,  $x_4 = s_2$  – скольжения СГ;  $x_5 = E_1$ ,  $x_6 = E_2$  – синхронные ЭДС СГ;

$x_7 = P_{T1}$ ,  $x_8 = P_{T2}$  – механические мощности турбин;  $X_9 = W_1$ ,  $X_{10} = W_2$  – переменные состояния модели возмущения;  $\Omega$  – частота возмущения.

При построении динамического регулятора, целесообразно сформировать модель возмущения с учётом цели управления в виде:

$$\frac{dw_1}{dt} = \xi \cdot s, \tag{2}$$

здесь  $w_1$  – оценка неизмеряемого возмущения  $M(t) = \text{const}$ ,  $\xi$  – постоянный коэффициент. Из (2) следует, что при выполнении цели управления  $s = 0$ , т.е. при стабилизации частоты вращения, неизмеряемое внешнее возмущение будет «подавлено». С учётом модели возмущения (2), система дифференциальных уравнений в пространстве состояний имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_3; \\ \dot{x}_2 = x_4; \\ \dot{x}_3 = b_1(x_7 - a_1 x_5^2 - a_3 x_5 \sin(x_1 - \alpha_{1n}) - a_2 x_5 x_6 \sin(x_1 - x_2 - \alpha_{12}) + c_1 x_9); \\ \dot{x}_4 = b_4(x_8 - a_4 x_6^2 - a_5 x_6 \sin(x_2 - \alpha_{2n}) - a_2 x_5 x_6 \sin(x_1 - x_2 - \alpha_{12}) + c_2 x_9); \\ \dot{x}_5 = b_2(-x_5 + a_6(x_2 - x_4) \sin(x_1 - x_2 - \alpha_{12}) + u_{11}); \\ \dot{x}_6 = b_5(-x_6 + a_7(x_3 - x_4) \sin(x_1 - x_2 - \alpha_{12}) + u_{12}); \\ \dot{x}_7 = b_3(-x_7 - a_8 x_3 + u_{21}); \\ \dot{x}_8 = b_6(-x_8 - a_9 x_4 + u_{22}); \\ \dot{x}_9 = x_{10}; \\ \dot{x}_{10} = -\Omega^2 x_9. \end{cases} \tag{3}$$

где  $X = [x_1, x_2, \dots, x_{10}]^T$  – вектор переменных состояния,  $u = [u_{11}, u_{12}, u_{21}, u_{22}]^T$  – вектор управляющих воздействий (управление). Система (3) является нелинейной взаимосвязанной моделью энергосистемы, содержащей два турбогенератора. В этом случае имеется четыре канала управления:  $m=4$ .

Требования к быстродействию и точности приведены в таблице.

Требования к времени регулирования		Требования к ошибке управления	
по $\Delta U_a(t)$	по $\Delta \omega(t)$	по $\Delta U_a(t)$	по $\Delta \omega(t)$
не более 60 сек	не более 60 сек	не более 5% $U_{уст}$	не более 5% $\omega_{уст}$

Компоненты  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  вектора состояний  $x(t)$  должны удовлетворять следующим неравенствам, задающим критерий качества по управляемым переменным:

$$x_i(t) = |\sigma_i(t)|, \quad i=1,2, \quad t \in [t_0, t_k], \tag{4}$$

где положительные непрерывно дифференцируемые функции

$$\sigma_1(t) = \sigma_1^0, \quad \sigma_2(t) = \sigma_2^0 \cdot e^{\alpha t}, \quad \sigma_1^0 = 0.1, \quad \sigma_2^0 = 2, \quad \alpha = -0.5. \tag{5}$$

Таким образом, задача управления заключается в следующем: необходимо построить законы взаимосвязанного управления частотой и мощностью энергоблока, состоящего из турбогенератора (3), которые обеспечивают стабилизацию частоты вращения и выходного напряжения. Также должна гарантироваться асимптотическая устойчивость замкнутой системы при появлении в системе больших возмущений (таких как короткое замыкание), обеспечиваться подавление внешних кусочно-постоянных возмущений. Замкнутая система должна обладать большим быстродействием и меньшей колебательностью, по сравнению с традиционными законами управления.

Полученные результаты по синтезу регулятора для модели турбогенератора. В работе [1] рассмотрена технологическая задача управления с учётом требований по качеству и точности применительно к одному турбогенератору. Там же приведены метод (алгоритмы) синтеза управляющей подсистемы для нелинейной возмущённой системы. Поэтому, далее не приводится метод синтеза, а ограничимся сразу полученным с помощью ППП алгоритмом управления (см. выражении (6)) для нелинейной системы.

Уравнение динамики искомого многомерного регулятора имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{du_1}{dt} &= - (2,9304x_2 - 2,9304x_4) \cos(x_1 - x_2 - 0,009)x_3 + 10,8107(-0,2711 \sin(x_1 - x_2 - 9/1000) + \\ &+ 0,0925(2,9304x_2 - 2,9304x_4) \cos(x_1 - x_2 - 0,009))x_4 + 2,9304 \sin(x_1 - x_2 - 0,009)(0,1091x_8 - \\ &- 0,014x_6^2 - 0,0403x_6 \sin(x_2 - 0,1) - 0,024x_5x_6 \sin(x_1 - x_2 - 0,009) + \\ &+ 0,1091x_9) + 10,8107(g_{55} + 0,0925 + p_{55}) \cdot (-0,0925x_5 + 0,0925(2,9304x_2 - \\ &- 2,9304x_4) \sin(x_1 - x_2 - 9/1000) + 0,0925u_{11}) - 10,8107g_{55}p_{55}x_5; \\ \frac{du_2}{dt} &= - (2,9304x_3 - 2,9304x_4) \cos(x_1 - x_2 - 0,009)x_3 + (2,9304x_3 - 2,9304x_4) \cos(x_1 - x_2 - 0,009)x_4 - \\ &- 2,9304 \sin(x_1 - x_2 - 0,009)(100/917x_7 - 0,0088x_5^2 - 0,0403x_5 \sin(x_1 - 1/10) - \\ &- 22/917x_5x_6 \sin(x_1 - x_2 - 0,009) + 100/917x_9) + 3663/1250 \sin(x_1 - x_2 - 9/1000) \times \\ &\times (100/917x_8 - 0,014x_6^2 - 37/917x_6 \sin(x_2 - 1/10) - 22/917x_5x_6 \sin(x_1 - x_2 - 9/1000) + \\ &+ 100/917x_9) + 0,014(g_{66} + 0,0894 + p_{66}) \cdot (-0,0894x_6 + 0,0894(3663/1250x_3 - 3663/1250x_4) \times \\ &\times \sin(x_1 - x_2 - 9/1000) + 0,0925u_{12}) - 11,1857g_{66}p_{66}x_6; \\ \frac{du_3}{dt} &= 2000/917x_7 - 0,1753x_5^2 - 740/917x_5 \sin(x_1 - 1/10) - 440/917x_5x_6 \sin(x_1 - x_2 - 9/1000) + \\ &+ 2000/917x_9 + 4(g_{77} + 1/4 + p_{77}) \times (-1/4x_7 - 5x_3 + 1/4u_{21}) - 4g_{77}p_{77}x_7; \\ \frac{du_4}{dt} &= 2181x_8 - 0,2804x_6^2 - 740/917x_6 \sin(x_2 - 1/10) - 440/917x_5x_6 \sin(x_1 - x_2 - 9/1000) + \\ &+ 2000/917x_9 + 4(g_{88} + 1/4 + p_{88}) \times (-1/4x_8 - 5x_4 + 1/4u_{22}) - 4g_{88}p_{88}x_8; \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Матрицы выбраны в диагональном виде:  $Y = \text{diag}\{g_{ii}\}$ ,  $P = \text{diag}\{p_{ii}\}$ ,  $i = \overline{1, 10}$ .

Начальные условия по переменным состояния системы:

$$x_1(0) = 1,569; \quad x_2(0) = 1,1; \quad x_3(0) = -0,1; \quad x_4(0) = -0,1; \quad x_5(0) = 1,1;$$

$$x_6(0) = 2; \quad x_7(0) = 0,5; \quad x_8(0) = 0,4; \quad x_9(0) = 0,01; \quad x_{10}(0) = 0;$$

$$u_{11}(0) = 0,75; \quad u_{11}(0) = 0,7; \quad u_{11}(0) = 0,75; \quad u_{11}(0) = 0,7.$$

Моделирование САУ проводилась при следующих параметрах турбогенераторов:

$$T_{j1} = 9,17; \quad T_{j2} = 9,17; \quad T_{e1} = 4; \quad T_{e2} = 4; \quad T_{d01} = 6; \quad T_{d02} = 6; \quad \sigma_1 = 0,05; \quad \sigma_2 = 0,05;$$

$$X_{d1} = 2,5; \quad X_{dd1} = 0,28; \quad X_{d2} = 2,5; \quad X_{dd2} = 0,28; \quad \alpha_{11} = 0,219; \quad \alpha_{12} = 0,009; \quad \alpha_{22} = 0,319;$$

$$\alpha_{1n} = 0,1; \quad \alpha_{2n} = 0,1; \quad y_{11} = 0,37; \quad y_{12} = 0,22; \quad y_{22} = 0,41; \quad y_{1n} = 0,37; \quad y_{2n} = 0,37; \quad U_c = 1; \quad w_0 = 1;$$

$$a_1 = y_{11} \cdot \sin(\alpha_{11}); \quad a_2 = y_{12}; \quad a_3 = U_c \cdot y_{1n}; \quad a_4 = y_{22} \cdot \sin(\alpha_{22}); \quad a_5 = U_c \cdot y_{2n};$$

$$a_6 = U_c \cdot y_{12} \cdot T_{d01} \cdot (X_{d1} - X_{dd1}); \quad a_7 = U_c \cdot y_{12} \cdot T_{d02} \cdot (X_{d2} - X_{dd2}); \quad a_8 = 1/\sigma_1; \quad a_9 = 1/\sigma_2;$$

$$T_{dd1} = T_{d01} \cdot (1 + y_{11} \cdot (X_{d1} - X_{dd1}) \cdot \cos(\alpha_{11})); \quad T_{dd2} = T_{d02} \cdot (1 + y_{22} \cdot (X_{d2} - X_{dd2}) \cdot \cos(\alpha_{22})); \quad b_1 = 1/T_{j1};$$

$$b_2 = 1/T_{dd1}; \quad b_3 = 1/T_{e1}; \quad b_4 = 1/T_{j2}; \quad b_5 = 1/T_{dd2}; \quad b_6 = 1/T_{e2}; \quad c_1 = 1; \quad c_2 = c_1; \quad \chi = 1,9972;$$

Динамический регулятор синтезирован при следующих значениях параметров его настройки:

$$p_{11} = -1, \quad p_{22} = p_{33} = p_{44} = p_{55} = p_{66} = p_{77} = p_{11}, \quad g_{11} = -10, \quad g_{22} = g_{33} = g_{44} = g_{55} = g_{66} = g_{11}.$$

Переходные процессы переменных состояния первого и второго турбогенераторов показаны на рис. 1 – 5, соответственно.

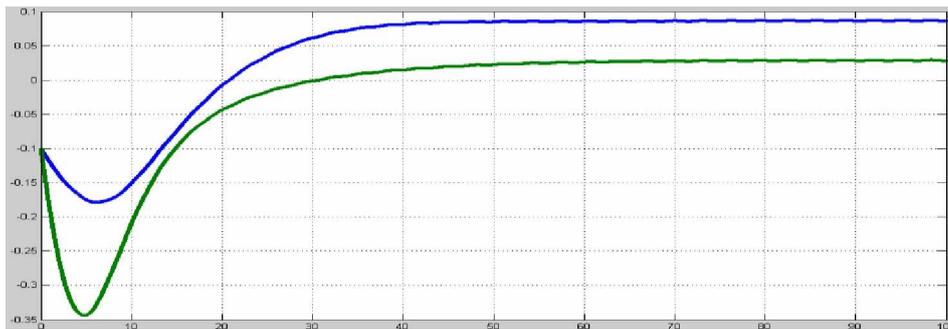


Рис. 1. Динамика изменения скольжений  $s_i$ ,  $i=1,2$

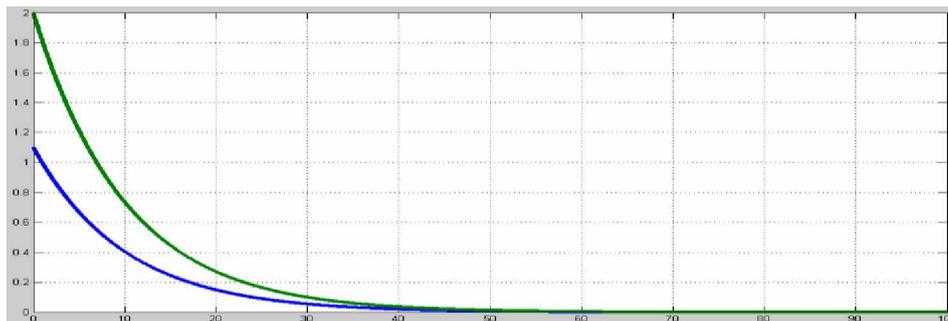


Рис. 2. Динамика изменения синхронных ЭДС СГ  $E_i$ ,  $i=1,2$

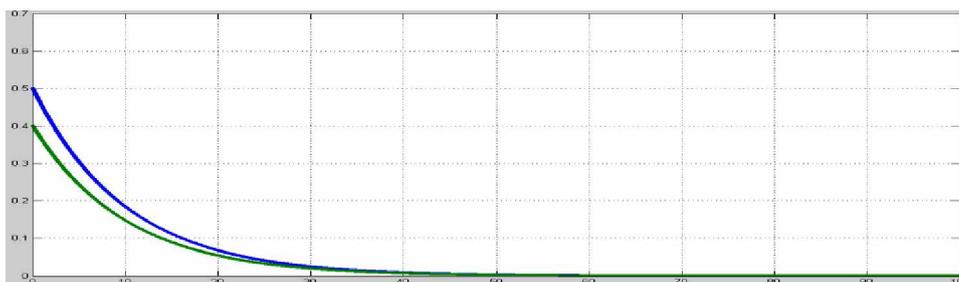


Рис. 3. Динамика изменения механических мощностей турбин  $P_{Ti}$ ,  $i=1,2$

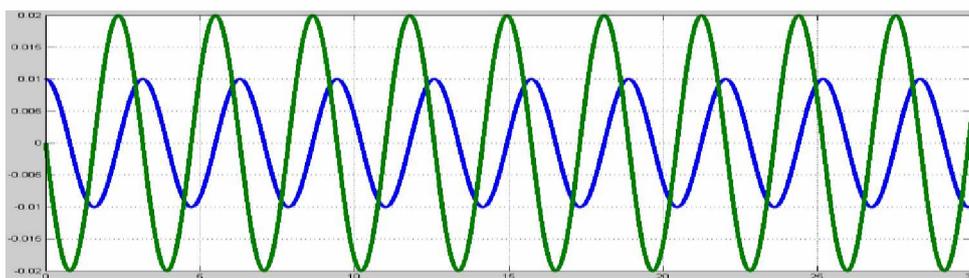


Рис. 4. Динамика изменения модели возмущений  $x_9=F(t)$ , и  $x_{10}$

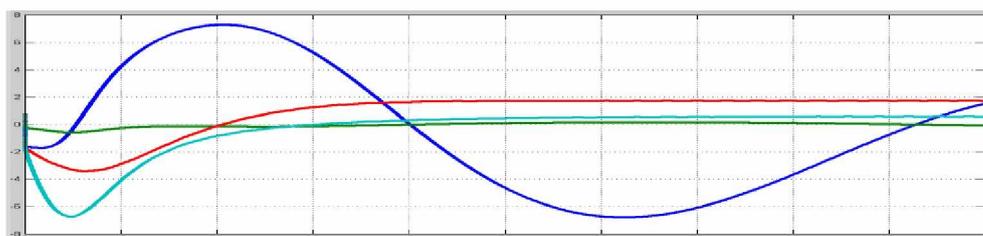


Рис. 5. Динамика изменения управляющих воздействий

Из результатов моделирования видно, что синтезированные законы управления обеспечивают выполнение целей управления: стабилизацию частоты вращения (рис.1) и синхронных ЭДС СГ (рис.2). При этом обеспечивается подавление возмущения. Благодаря динамическим законам управления (6) синхронные ЭДС СГ оказывается нечувствительным к возмущению. Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы: синтезированная система является асимптотически устойчивой в целом; обеспечивается согласование частот вращения турбин и стабилизация ЭДС синхронного генератора; переходные процессы, в общем, имеют апериодический характер; синтезированная система компенсирует внешнее низкочастотное гармоническое возмущение. Внедрение регуляторов в практику управления турбогенераторами позволит принципиально улучшить статические и динамические свойства энергосистем в аварийных и экстремальных режимах их работы.

#### Литература

1. Б.К.Такырбашев, А.О.Айдралиев, Н.Т. Темиркулова, Б.О.Джолдошов. Динамическое проектирование управляющего устройства для нелинейной системы с учетом инженерных показателей качества// Изв. КГТУ. № 30, – Бишкек, 2013.–С.10.
2. Глебов И.А. Научные основы проектирования турбогенераторов. –Л.: Энергия, 1986.
3. Джолдошев Б.О. Разработка методов и алгоритмов управления многомерными системами по заданным инженерным показателям качества. – Бишкек: «Илим», 2011. –166 с.
4. Синергетические методы управления сложными системами: энергетические системы под ред. А.А. Колесникова. – М.: Едиториал, УРСС, 2005. – 222 с.
5. Электрические системы: Управление переходными режимами электроэнергетических систем / Под ред. В.А. Веникова, Э.Н. Зуева и М.Г. Портного. – М.: Высшая школа, 1982.

УДК.: 62-23:621.3.082.22

### РАЗРАБОТКА ДВУХКОНТУРНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ И ЗАГОРОМ

*Жолудева Н. С.*

*Кыргызский государственный технический университет  
им. И.Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика*

*В работе рассматривается схема и математическая модель двухконтурной системы автоматического управления режимами работ.*

*In this paper the mathematical model of the scheme and two-contour system of automatic control mode of operation.*

Точение в машиностроительном производстве является одним из самых применяемых процессов обработки металлов резанием.

Для получения высокой точности размеров деталей и высокой чистоты обрабатываемой поверхности необходимо, чтобы подача и упругое перемещение резца ( $\delta$ ) была постоянно независима от нагрузки. В связи с тем, что нагрузка при механической обработке каждый момент времени меняется по причинам: 1) различия твердости материалов по длине обработки; 2) колебания припуска; 3) износа инструмента; 4) переменной силы сопротивления при перемещении суппорта.

Цель достигается путем создания двухконтурной автоматической системы управления выше названными параметрами. Данная автоматическая система применяется при проектировании высокоточных станков, предназначенных для чистовой обработки изделий в машиностроении.

Конструкция, приведённая на рис.1, состоит из станины (опоры) 1, на которой установлен суппорт станка с гидроцилиндром 2. На суппорте станка установлен режущий инструмент 3, также на нём установлен индуктивный датчик 4, который соединён с двумя электрическими усилителями У1 и У2. Выход каждого усилителя стыкуется со своим электромагнитным двигателем ЭМ1 и ЭМ2, якоря которых связаны с регуляторами расхода. Выход каждого регулятора подключен к своему потребителю, т.е. к гидроцилиндру и гидростатической опоре, благодаря редуционным клапанам РК перепад давления на регуляторах расхода является постоянным. Преобразователь частоты 10 предназначен для регулирования частоты колебания золотника дискретного регулятора расхода.

Из результатов моделирования видно, что синтезированные законы управления обеспечивают выполнение целей управления: стабилизацию частоты вращения (рис.1) и синхронных ЭДС СГ (рис.2). При этом обеспечивается подавление возмущения. Благодаря динамическим законам управления (6) синхронные ЭДС СГ оказывается нечувствительным к возмущению. Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы: синтезированная система является асимптотически устойчивой в целом; обеспечивается согласование частот вращения турбин и стабилизация ЭДС синхронного генератора; переходные процессы, в общем, имеют апериодический характер; синтезированная система компенсирует внешнее низкочастотное гармоническое возмущение. Внедрение регуляторов в практику управления турбогенераторами позволит принципиально улучшить статические и динамические свойства энергосистем в аварийных и экстремальных режимах их работы.

### Литература

1. Б.К.Такырбашев, А.О.Айдралиев, Н.Т. Темиркулова, Б.О.Джолдошов. Динамическое проектирование управляющего устройства для нелинейной системы с учетом инженерных показателей качества// Изв. КГТУ. № 30, – Бишкек, 2013.–С.10.
2. Глебов И.А. Научные основы проектирования турбогенераторов. –Л.: Энергия, 1986.
3. Джолдошев Б.О. Разработка методов и алгоритмов управления многомерными системами по заданным инженерным показателям качества. – Бишкек: «Илим», 2011. –166 с.
4. Синергетические методы управления сложными системами: энергетические системы под ред. А.А. Колесникова. – М.: Едиториал, УРСС, 2005. – 222 с.
5. Электрические системы: Управление переходными режимами электроэнергетических систем / Под ред. В.А. Веникова, Э.Н. Зуева и М.Г. Портного. – М.: Высшая школа, 1982.