

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ВЫБОРА И НАСТРОЙКИ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА УРОВНЯ ЖИДКОСТИ

С.В. Панферов, А.И. Телегин

ANALYSIS OF CHOICE QUALITY AND ADJUSTMENT OF THE AUTOMATIC FLUID LEVEL CONTROLLER

S.V. Panferov, A.I. Telegin

Рассматривается задача структурно-параметрического синтеза системы автоматического регулирования уровня жидкости. Приводится структура и параметры настройки квазиоптимального регулятора. Анализируются устойчивость системы и качество переходных процессов в ней.

Ключевые слова: автоматический регулятор, уровень жидкости, структура, параметры настройки, устойчивость, качество переходных процессов.

The problem of structurally-parametrical synthesis of system of automatic control of level of a liquid is considered. The structure and adjustment parameters a regulator is resulted. Stability of system and quality of transients in it are analyzed.

Keywords: automatic regulator, liquid level, structure, adjustment parameters, stability, quality of transients.

В настоящее время в системах теплоснабжения для автоматического регулирования различных переменных технологических процессов широко используются ПИД-регуляторы и их частные варианты. Накоплен огромнейший опыт применения таких регуляторов, в частности, разработаны и апробированы различные способы их настройки. Вместе с тем, как неоднократно отмечает В.Я. Ротач в своем сравнительно недавно изданном учебнике [1], П-, ПИ- и ПИД- «...алгоритмы были получены чисто эвристическим путем» [1, с. 82 и др.] и что «...достаточно убедительное формальное доказательство целесообразности их применения... до сих пор получить не удалось» [1, с. 24].

В работах [2, 3], как нам представляется, удалось получить некоторое формальное обоснование целесообразности применения ПИД-регуляторов, здесь задача решалась методом «подгонки» передаточной функции замкнутой системы к некоторому достаточно разумному и практически достижимому виду. Найдены эталонные структуры и настройки регуляторов для типовых динамических характеристик промышленных объектов управления, при этом установлено, что все эти регуляторы принадлежат ПИД-семейству. Казалось бы, что поставленная цель достигнута, однако для полноты исследования проблемы необходимо рассмотреть вопрос о качестве переходных процессов в таких системах и о грубости этих структур и настроек, данная задача и решается в настоящей работе.

Рассмотрим объект управления с передаточной функцией вида

$$W_{об}(p) = \frac{1}{T_{об}p} \exp(-\tau_{об}p), \quad (1)$$

где $T_{об}$, $\tau_{об}$ - соответственно постоянная времени и время запаздывания объекта, p - комплексная переменная. Такими передаточными функциями описываются различные объекты регулирования уровня жидкостей в системах теплоснабжения: конденсаторы, деаэраторы, расширительные баки, выполняющие роль гидростатических стабилизаторов давления в заданных точках тепловой сети, и др.

Как известно [2, 3], близким к идеальному для такого объекта является П-регулятор с коэффициентом передачи $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об} + \theta}$, где θ - достаточно малая постоянная времени. Для анализа переходных процессов в системе с объектом управления данного типа разработаны две компьютерные программы: одна для анализа переходных процессов при возмущении по заданию, а другая - при возмущении со стороны регулирующего органа. В каждой из разработанных программ предусмотрен ввод $T_{об}$, $\tau_{об}$ и коэффициента передачи П-регулятора, каждая из программ осуществляет не только построение графика переходного процесса, но и определяет перерегулирование σ и время регулирования t_p , а также вычисляет значения следующих критериев:

$$I_1 = \int_0^{t_k} |\varepsilon(t)| dt, \quad (2)$$

$$I_2 = \int_0^{t_k} \varepsilon^2(t) dt, \quad (3)$$

где $\varepsilon(t) = x^3(t) - x(t)$ - ошибка регулирования (рас- согласование), $x^3(t)$ и $x(t)$ - соответственно заданное и действительное значение регулируемой величины, t - время, t_k - конечное время оценки переходного процесса. Здесь время регулирования t_p определялось как время, по истечении которого отклонение регулируемой величины от задания не будет превышать 5 %.

В процессе численных вычислений установлено, что во всех случаях, когда $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}}$ (параметр θ полагается равным нулю), дифференциальное уравнение замкнутой системы автоматического регулирования (САР) будет иметь вид:

$$\tau_{об} \frac{dx(t)}{dt} + x(t - \tau_{об}) = x^3(t - \tau_{об}). \quad (4)$$

Решая уравнение (4) для единичного ступенчатого воздействия, нашли, что во всех этих случаях $\sigma \cong 49\%$. Если численное значение k_p отличается от величины $\frac{T_{об}}{\tau_{об}}$ ($\theta \neq 0$), то изменяется и

величина перерегулирования. Полученные значения показателей качества переходного процесса, например, для случая, когда $T_{об} = 15$ с, $\tau_{об} = 5$ с, а

k_p принимает различные значения в окрестности точки $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}} = 3 \frac{\% \text{ хода ИМ}}{\text{ед. рег. вел.}}$ приведены в табл. 1.

Провели исследование качества переходных процессов и для других значений параметров объекта регулирования, в частности, для $T_{об} = 30$ с, $\tau_{об} = 10$ с и для $T_{об} = 15$ с, $\tau_{об} = 3$ с.

Анализируя полученные данные, можно отметить следующее: при эталонном (базовом) значении коэффициента передачи П-регулятора $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}}$ перерегулирование σ в рассматриваемых САР

при различных значениях $T_{об}, \tau_{об}$ получается практически одинаковым и равным $\approx 47 \div 49\%$. Время регулирования при прочих равных условиях растёт прямо пропорционально росту $(T_{об} + \tau_{об})$ и

обратно пропорционально величине $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}}$. Ба-

зовая настройка П-регулятора $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}}$ является достаточно грубой (робастной), поскольку существует заметная окрестность точки $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}}$, в

которой сохраняются приемлемое качество и запас устойчивости системы (заметим, что о запасе устойчивости можно судить непосредственно по семейству кривых переходного процесса, полученных при различных настройках регулятора). Настройки П-регулятора, оптимальные по критериям (2) и (3) не совпадают как между собой, так и каждая с базовой настройкой. Так, например, в случае табл. 1 базовое значение коэффициента

передачи $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}} = 3 \frac{\% \text{ хода ИМ}}{\text{ед. рег. вел.}}$, вместе с тем

оптимальное по минимуму критерия I_1 значение равно $k_p = 1,75 \frac{\% \text{ хода ИМ}}{\text{ед. рег. вел.}}$, а оптимальное по минимуму

критерия I_2 значение равно $k_p = 2,5 \frac{\% \text{ хода ИМ}}{\text{ед. рег. вел.}}$.

Причем настройки, найденные из условия минимума критерия I_2 , заметно ближе к базовой настройке, в некоторых случаях их различие можно считать достаточно малым. Очевидно, что все это объясняется как существом рассматриваемого метода синтеза САР, так и определенной погрешностью выкладок при его реализации.

Показатели качества переходных процессов в САР при возмущении по нагрузке (со стороны регулирующего органа), например, для случая табл. 1 приведены в табл. 2.

В целом, анализ полученных результатов показал, что величина перерегулирования σ при

Таблица 1

Показатели качества переходных процессов для $T_{об} = 15$ с, $\tau_{об} = 5$ с при возмущении по заданию

| $k_p, \frac{\% \text{ хода ИМ}}{\text{ед. рег. вел.}}$ | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 1,75 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\sigma, \%$ | 0 | 0 | 3,43 | 9,30 | 16,3 | 31,79 | 49 | 64,4 | 80,7 |
| $t_p, \text{с}$ | 79 | 32,4 | 17 | 25,4 | 24,8 | 33,2 | 42,2 | 69,8 | 99,8 |
| $I_1, (\text{ед. рег. вел.}) \cdot \text{с}$ | 29,47 | 14,99 | 10,71 | 10,32 | 10,40 | 11,47 | 13,79 | 18,16 | 26,99 |
| $I_2, (\text{ед. рег. вел.})^2 \cdot \text{с}$ | 88,34 | 52,30 | 41,67 | 39,27 | 37,97 | 37,88 | 41,09 | 49,38 | 70,36 |

Таблица 2

Показатели качества переходных процессов для $T_{об} = 15$ с, $\tau_{об} = 5$ с при возмущении по нагрузке

| $k_p, \frac{\% \text{ хода ИМ}}{\text{ед. рег. вел.}}$ | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 1,75 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\sigma, \%$ | 0 | 0 | 3,43 | 9,30 | 16,3 | 31,79 | 47,9 | 64,4 | 80,7 |
| $t_p, \text{с}$ | 17,6 | 13,6 | 12,4 | 12,0 | 11,8 | 11,4 | 11,2 | 11,0 | 19,8 |
| $I_1, (\text{ед. рег. вел.}) \cdot \text{с}$ | 0,391 | 0,199 | 0,143 | 0,137 | 0,138 | 0,153 | 0,184 | 0,241 | 0,354 |
| $I_2 \cdot 10^2, (\text{ед. рег. вел.})^2 \cdot \text{с}$ | 1,570 | 0,929 | 0,741 | 0,698 | 0,675 | 0,673 | 0,731 | 0,877 | 1,248 |

одинаковых настройках регулятора остается практически одной и той же как при возмущении по заданию, так и при возмущении со стороны регулирующего органа, несмотря на то, что σ в этих случаях вычисляется вообще-то по-разному [4, 5]. Кроме того, координаты точек минимума функций $I_1 = f_1(k_p)$ и $I_2 = f_2(k_p)$, вычисленных для случая возмущения по нагрузке, также удивительным образом совпадают с аналогичными координатами в случае возмущения по заданию. По-видимому, данные обстоятельства подтверждают известное высказывание о том, что если САР оптимизирована для отработки возмущений по заданию, то одновременно достигается оптимум и при отработке возмущений по нагрузке [6].

Время регулирования t_p при прочих равных условиях при возмущении со стороны регулирующего органа меньше, чем в случае возмущения по заданию, что, в общем-то, достаточно объяснимо.

Если робастность рассматривать как грубость системы по отношению к изменениям параметров объекта управления, то можно привести следующие результаты. В принципе все вышеизложенное можно интерпретировать и как анализ для данного случая, здесь нужно только считать, что, якобы, регулятор настроен по параметрам объекта управления, имевшим место в недалеком прошлом, а в данный момент времени объект управления имеет те значения параметров, которые указаны в заголовках таблиц.

Если постоянная времени и время запаздывания объекта изменятся соответственно на $\Delta T_{об}$ и на $\Delta \tau_{об}$, а регулятор будет иметь настройку, найденную по предыдущим значениям его параметров

$k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об} + \theta}$, то передаточная функция разомкнутой системы будет иметь вид

$$W_{рс}(p) = \frac{\exp(-\tau_{об} p)}{(\theta + \tau_{об})p} \cdot \frac{\exp(-\Delta \tau_{об} p)}{(1 + \Delta T_{об} / T_{об})}$$

Используя критерий устойчивости Найквиста для систем с запаздыванием [7], нашли, что в этом случае критическая частота $\omega_{кр}$ будет равна

$$\omega_{кр} = \frac{1}{(\theta + \tau_{об})(1 + \Delta T_{об} / T_{об})}$$

поэтому условие устойчивости замкнутой системы автоматического регулирования (САР) в общем случае запишется так:

$$(\tau_{об} + \Delta \tau_{об}) / [(\theta + \tau_{об}) \cdot (1 + \Delta T_{об} / T_{об})] < \pi / 2. \quad (5)$$

На координатной плоскости « $\Delta T_{об} / T_{об}$ - $\Delta \tau_{об} / \tau_{об}$ » граница области устойчивости будет представляться следующей прямой (см. рисунок):

$$\frac{\Delta \tau_{об}}{\tau_{об}} = \frac{\pi(\tau_{об} + \theta)}{2\tau_{об}} \cdot (1 + \frac{\Delta T_{об}}{T_{об}}) - 1. \quad (6)$$

На рисунке область устойчивости - это область, расположенная правее своей границы (штриховка направлена внутрь области). Причем, нетрудно заметить, что с увеличением параметра θ область устойчивости замкнутой САР расширяется, т. к. $(\frac{\pi \cdot (\tau_{об} + \theta)}{2\tau_{об}} - 1)$ - точка пересечения

прямой (3) с осью ординат « $\Delta \tau_{об} / \tau_{об}$ » с увеличением θ «ползет» вверх, а $(\frac{2\tau_{об} - \pi\tau_{об} - \pi\theta}{\pi \cdot (\tau_{об} + \theta)})$ - точка

пересечения прямой (6) с осью абсцисс « $\Delta T_{об} / T_{об}$ » перемещается влево. При $\theta = 0$ область устойчивости будет иметь наименьший размер, однако при этом начало координат будет располагаться все-таки правее ее границы. Следовательно, при $\theta = 0$ САР имеет некоторый запас устойчивости относительно вариаций параметров $\Delta \tau_{об}$ и $\Delta T_{об}$, с увеличением θ робастность устойчивости [8] повышается.

Передаточная функция замкнутой системы по задающему воздействию будет равна

$$W_{зс}(p) = \frac{\exp[-(\tau_{об} + \Delta \tau_{об})p]}{(\theta + \tau_{об})(1 + \Delta T_{об} / T_{об})p + \exp[-(\tau_{об} + \Delta \tau_{об})p]}$$

Отсюда следует, что дифференциальное уравнение САР будет иметь вид:

$$(\theta + \tau_{об})(1 + \Delta T_{об} / T_{об}) \frac{dx(t)}{dt} + x(t - \tau_{об} - \Delta \tau_{об}) = U(t - \tau_{об} - \Delta \tau_{об}), \quad (7)$$

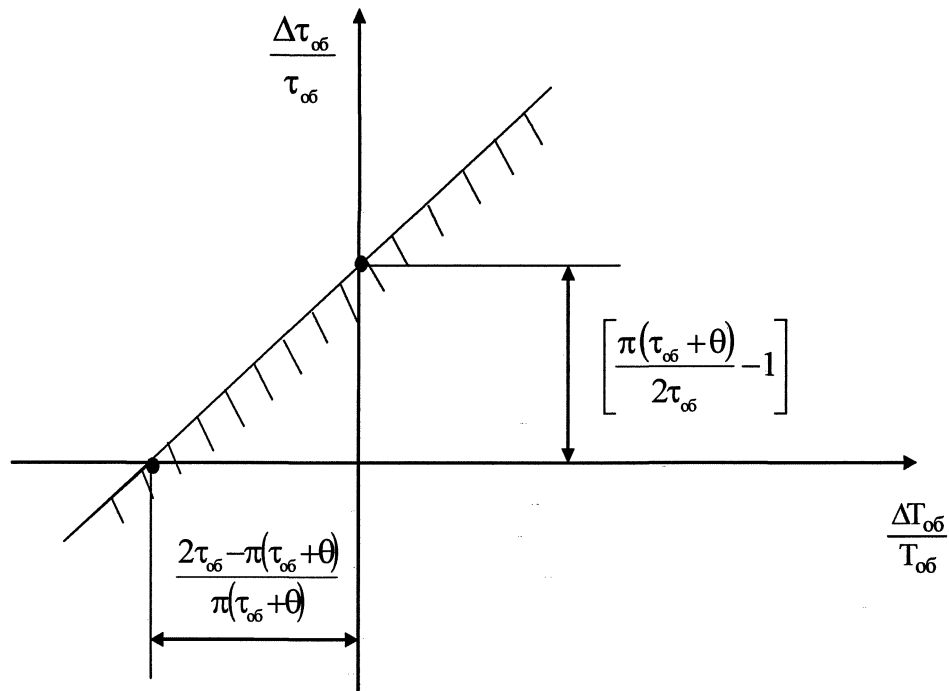


Рис. 1. Область устойчивости САР

где χ - выходная (регулируемая) величина объекта, U - заданное значение регулируемой величины. Из (5) и из решения дифференциального уравнения (7) следует, что при $\Delta T_{об} > 0$ влияние этого параметра на устойчивость (робастность устойчивости) и качество (робастность качества) САР аналогично влиянию параметра θ [2, 3], т. е. колебательность переходной функции уменьшается с ростом $\Delta T_{об}$, переходный процесс все в большей степени приобретает аperiodический характер.

Для примера в табл. 3 приведены показатели качества переходных процессов в САР для случая, когда $T_{об} = 15$ с, $\tau_{об} = 5$ с, $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}} = 3 \frac{\% \text{ хода ИМ}}{\text{ед. рег. вел.}}$, $\Delta \tau_{об} = 0$, а $\Delta T_{об}$ принимает различные как положительные, так и отрицательные значения.

Аналогичные результаты получаются и при $\Delta \tau_{об} < 0$, т. е. с увеличением $|\Delta \tau_{об}|$ демпфированность системы растет. Если же $\Delta \tau_{об} > 0$, то с увеличением $\Delta \tau_{об}$ перерегулирование возрастает, ухудшаются как качество переходного процесса, так и запас устойчивости системы. В табл. 4 приведены показатели качества переходных процессов в САР для случая, когда $T_{об} = 15$ с, $\tau_{об} = 5$ с, $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}} = 3 \frac{\% \text{ хода ИМ}}{\text{ед. рег. вел.}}$, $\Delta T_{об} = 0$, а $\Delta \tau_{об}$ принимает различные как положительные, так и отрицательные значения.

Выполненные расчеты показали, что если параметры объекта управления определены точно, то при $\theta = 0$ с перерегулирование в данной САР будет равно $\sigma \cong 49\%$. Если же время запаздывания

Таблица 3
Показатели качества переходных процессов для $T_{об} = 15$ с, $\tau_{об} = 5$ с при возмущении по заданию при различных значениях $\Delta T_{об}$

| $\Delta T_{об}, \text{с}$ | +1 | +3 | +5 | -1 | -3 | -5 |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\sigma, \%$ | 41,89 | 31,79 | 23,89 | 55,02 | 72,49 | 97,04 |
| $t_p, \text{с}$ | 42 | 33,2 | 32,2 | 51,6 | 88,6 | 157 |

Таблица 4
Показатели качества переходных процессов для $T_{об} = 15$ с, $\tau_{об} = 5$ с при возмущении по заданию при различных значениях $\Delta \tau_{об}$

| $\Delta \tau_{об}, \text{с}$ | +1 | +2 | +3 | -1 | -2 | -3 |
|------------------------------|-------|-------|---------------------------------|-------|------|--------|
| $\sigma, \%$ | 67,99 | 87,99 | расходящийся переходный процесс | 28,22 | 9,98 | 0,0005 |
| $t_p, \text{с}$ | 85 | 195,6 | расходящийся переходный процесс | 26,4 | 15 | 9,8 |

модели объекта управления $\tau_{об}$ (эта величина используется при вычислении настройки регулятора

$k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об} + \theta}$) меньше времени запаздывания, имеющего место на реальном объекте ($\tau_{об} + \Delta\tau_{об}$), то перерегулирование возрастает. Так, например, если $\tau_{об} = 4$ с, а $\Delta\tau_{об} = 1$ с, то $\sigma = 72\%$. САР в такой ситуации, когда из-за погрешности параметрической

идентификации получилось, что $\tau_{об} < (\tau_{об} + \Delta\tau_{об})$, может и потерять устойчивость. В самом деле, если структура математической модели объекта и все ее параметры, кроме времени запаздывания, определены достаточно точно, то передаточная функция разомкнутой системы получается равной

$$W_{pc}(p) = \frac{\exp[-(\tau_{об} + \Delta\tau_{об})p]}{(\theta + \tau_{об})p},$$

устойчива лишь при удовлетворении следующего неравенства: $(\tau_{об} + \Delta\tau_{об})/(\theta + \tau_{об}) < \pi/2$. В случае табл. 4, при $\Delta\tau_{об} = 3$ с получили расходящийся переходный процесс, т. е. система потеряла устойчивость, что и следовало ожидать, т. к.

$$(\tau_{об} + \Delta\tau_{об})/(\theta + \tau_{об}) = (5 + 3)/5 > \pi/2.$$

При обработке единичного ступенчатого задания $U(t) = 1(t)$ при $t \rightarrow \infty$ $x \rightarrow 1$, т. е. САР астатическая по задающему воздействию. Передаточная функция системы по каналу «возмущение со стороны регулирующего органа - ошибка регулирования»

$$W_{зс}^{po}(p) = \frac{(\tau_{об} + \theta) \cdot \exp[-(\tau_{об} + \Delta\tau_{об})p]}{(\theta + \tau_{об})(T_{об} + \Delta T_{об})p + T_{об} \exp[-(\tau_{об} + \Delta\tau_{об})p]},$$

поэтому $\lim_{p \rightarrow 0} W_{зс}^{po}(p) = \frac{\tau_{об} + \theta}{T_{об}}$ при $p \rightarrow 0$, следовательно, по данному каналу САР статическая, причем ошибка регулирования тем меньше, чем больше

коэффициент передачи П-регулятора $k_p = \frac{T_{об}}{\tau + \theta}$.

Выводы. Проведенный анализ показал, что рассматриваемый метод синтеза, позволяющий од-

нозначно выбрать как структуру, так и параметры настройки регулятора уровня жидкостей, обеспечивает приемлемое качество переходных процессов и достаточный запас устойчивости системы при довольно заметных по размерам вариациях параметров объекта управления и погрешностях задания настроек регулятора. Поэтому данный метод синтеза можно достаточно уверенно рекомендовать для практического использования.

Литература

1. Ротач, В.Я. Теория автоматического управления: учеб. для вузов / В.Я. Ротач. - М.: Изд-во МЭИ, 2004. - 400 с.
2. Панферов, В. И. Об одном подходе к решению задачи выбора и настройки автоматических регуляторов / В. И. Панферов // Известия Челябинского научного центра. - 2004. - Вып. 4 (26). - С. 139-144.
3. Панферов, В.И. Выбор и настройки автоматических регуляторов в системах теплоснабжения / В.И. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». - 2005. - Вып. 3-№ 13 (53). - С. 81-84.
4. Копелович, А.П. Инженерные методы расчета при выборе автоматических регуляторов / А.И. Копелович. - М.: Металлургиздат, 1960. - 190 с.
5. Проектирование систем контроля и автоматического регулирования металлургических процессов / Г. М. Глинков, В.А. Маковский, С.Л. Лотман, М.Р. Шапировский; под ред. ГМ. Глинкова. - М.: Металлургия, 1986. - 352 с.
6. Фрер, Ф. Введение в электронную технику регулирования: пер. с нем. / Ф. Фрер, Ф. Орттенбургер. - М.: Энергия, 1973. - 190 с.
7. Воронов, А.А. Основы теории автоматического управления: Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем / А.А. Воронов. - М.: Энергия, 1980. - 312 с.
8. Дорф, Р. Современные системы управления: пер. с англ. / Р. Дорф, Р. Бишоп. - М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. - 832 с.

Поступила в редакцию 17 марта 2009 г.

Панферов Сергей Владимирович, аспирант кафедры «Системы управления и математическое моделирование» Миасского филиала ЮУрГУ.

Область научных интересов: моделирование процессов в сложных системах управления.

Контактный телефон: 267-91-44.

Panferov Sergey Vladimirovich. Post-graduate student of the Control Systems and Mathematical Simulation department of the Miass branch of SUSU.

Scientific interests: simulation of processes in difficult control systems.

Contact phone: 267-91-44.

Телегин Александр Иванович, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы управления и математическое моделирование» Миасского филиала ЮУрГУ.

Область научных интересов: моделирование процессов в системах управления механическими и энергетическими объектами.

Контактный телефон: 8 (3513) 53-22-61.

Telegin Alexander Ivanovich. Doctor of physical and mathematical science, professor, the head of the Control Systems and Mathematical Simulation department of the Miass branch of SUSU.

Scientific interests: simulation of processes in control systems of mechanical and power objects.

Contact phone: 8 (3513) 53-22-61.