

УДК 519.87

Применение компенсирующего регулирования для многосвязного управления многопараметрической системой

С.А. Дяконитса^а, И.Р. Сугачевский^б

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

^аdiaconitsa@mail.ru, ^бkatanig@mail.ru

Статья поступила 24.12.2013, принята 18.02.2014

На сегодняшний день системы управления технологическими процессами основываются на объединении нескольких простых одноконтурных систем. Внутренняя структура таких систем является весьма сложной, ведь каждый из каналов регулирования связан с другими каналами посредством перекрестных связей, в результате чего происходит значительное снижение качества регулирования технологических параметров объекта. Для устранения взаимных связей между каналами регулирования рассматривается метод построения систем управления с использованием специальных дополнительных устройств-компенсаторов, которые настраиваются таким образом, чтобы свести к минимуму перекрестные связи в управляемом многопараметрическом объекте. В связи со сложностью математических вычислений в настоящий момент крайне мало исследований, связанных с изучением многосвязного управления многопараметрическими системами с применением компенсирующего регулирования, и разработок соответствующих физических решений. Исходя из этого, возникает необходимость создания новых методов и алгоритмов определения оптимальных настроек параметров регулирования, основанных на принципе динамической компенсации в многопараметрических системах. Метод многосвязного управления многопараметрической системой с применением компенсирующего регулирования является весьма актуальным и практически значимым. Изучая поведение системы, построенной по данному методу, можно сделать выводы об эффективной работе корректирующих устройств.

Ключевые слова: многопараметрические динамические системы, перекрестные связи, корректирующие устройства.

Using compensatory regulation for multivariate control of multi-parameter system

S.A. Dyakonitsa^а, I.R. Sugachevskiy^б

Bratsk State University, 40 Makarenko St., Bratsk, Russia.

^аdiaconitsa@mail.ru, ^бkatanig@mail.ru

Received 24.12.2013, accepted 18.02.2014

Today's technological process control systems are based on combining several simple one-loop systems. The inner pattern of such systems is rather complex, because each regulation channel is connected to other channels by cross couplings and, therefore, regulation quality of object technological parameters is deteriorate heavily. To overcome the mutual relations between regulation channels there has been studied the method of creation of control systems by using special additional compensatory devices which are set up to minimize cross couplings in controlled multi-parameter object. Due to the complexity of mathematical computations, there are little researches connected with studying the multivariate control of multi-parameter systems with compensatory regulation, and development of relevant physical decisions. Hence, there is a need of creation of new methods and algorithms to determine optimal settings of regulation parameters based on the dynamic compensatory principle in multi-parameter systems. The method of multivariate control of multi-parameter system with compensatory regulation is topical and practice-significant. By studying the behavior of the system constructed with this method, it is possible to conclude that compensatory devices work effectively.

Keywords: multi-parameter systems, multivariate control, compensatory regulation.

Введение. Существующие системы управления технологическими процессами представляют собой сложные многопараметрические динамические системы с несколькими входными и выходными величинами. Существенное влияние на управление и оптимизацию таких систем оказывает их внутренняя структура, которая, помимо основных каналов регулирования, содержит перекрестные связи, приводящие к тому, что возмущения посредством регуляторов начинают оказывать влияние не только на собственные, но и на другие регулируемые величины системы.

Применяемый в настоящее время математический аппарат для оптимизации работы многопараметрических систем основан на адаптации только настроечных параметров отдельных участков каналов регулирующих воздействий, что не позволяет осуществлять более качественную стабилизацию контролируемых величин с помощью независимых одноконтурных систем, связанных лишь через объект управления.

Очевидно, что самой оптимальной системой управления для такого типа объектов является система, использующая корректирующие устройства, выбранными таким образом,

чтобы они по возможности полностью компенсировали перекрестные связи в регулируемом объекте.

В настоящее время исследований, посвященных многосвязному управлению многопараметрическими системами с применением компенсирующего регулирования и разработке соответствующих практических решений, недостаточно. Поэтому проблема создания новых методов и алгоритмов определения оптимальных настроек параметров регулирования, основанных на принципе динамической компенсации в многопараметрических системах, требует системного подхода и является актуальной.

Особенности математического описания многопараметрических систем управления. Если сделать допущение о том, что все многомерные звенья имеют одинаковое число входов и выходов, равное n , т. е. рассматриваются n -мерные системы, то одномерная система является частным случаем многомерной, когда $n = 1$. Все входные и выходные сигналы многомерных звеньев образуют n -мерные векторы, которые отождествляются с матрицей-столбцом размера $n \times 1$. Динамические свойства непрерывного многомерного звена определяются матрицей передаточных функций, которую называют передаточной матрицей. Передаточная матрица позволяет связать вход и выход звена с помощью соотношения, по форме совпадающего с одномерным случаем [1].

Теперь рассмотрим структурные схемы и матричное описание в многосвязной системе (МС) без учета и с учетом регулирования.

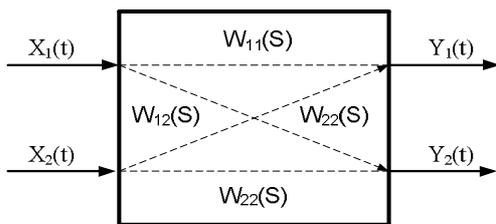


Рис. 1. Структурная схема МС без учета регулирования

Представим многосвязный объект как матричное произведение:

$$Y(S) = W(S)X(S) \tag{1}$$

где $X(S)$ – вектор размером $1 \times n$ входных параметров; $Y(S)$ – вектор размером $1 \times n$ выходных параметров; $W(S)$ – матрица $n \times n$ прямых и взаимных передаточных функций.

$$W(S) = \begin{pmatrix} W_{11}(S) & W_{12}(S) & \dots & W_{1n}(S) \\ W_{21}(S) & W_{22}(S) & \dots & W_{2n}(S) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{n1}(S) & W_{n2}(S) & \dots & W_{nn}(S) \end{pmatrix} \tag{2}$$

Тогда взаимосвязь между входными и выходными значениями можно представить в виде системы скалярных уравнений:

$$\begin{aligned} Y_1(S) &= W_{11}(S)X_1(S) + W_{12}(S)X_2(S) + \dots + W_{1n}(S)X_n(S) \\ Y_2(S) &= W_{21}(S)X_1(S) + W_{22}(S)X_2(S) + \dots + W_{2n}(S)X_n(S) \\ Y_n(S) &= W_{n1}(S)X_1(S) + W_{n2}(S)X_2(S) + \dots + W_{nn}(S)X_n(S) \end{aligned} \tag{3}$$

На рис. 2 представлена схема многосвязной системы с учетом регулирования.

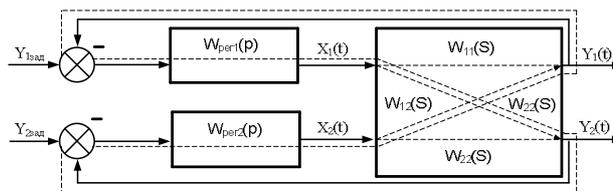


Рис. 2. Структурная схема многосвязной системы с учетом регулирования

В матричной форме:

$$Y(S)[Wоб(S)Wп(S) + I] = [Wоб(S)]X(S) \tag{4}$$

При введении регулирования:

$$X(S) = -K(S)Y(S) \tag{5}$$

где $K(S)$ – искомая операторная матрица регулятора; I – единичная матрица.

Знак «минус» учитывает отрицательную обратную связь в законе регулирования. Исключая из уравнений переменную $X(S)$, получим уравнение свободных колебаний замкнутой системы в виде:

$$[I + Wоб(S)Wп(S)]Y(S) = 0 \tag{6}$$

Для оценки степени взаимного влияния контуров регулирования вводится понятие комплексного коэффициента связности:

$$W_{св}(j\omega) = -\frac{W_{12}(j\omega)W_{21}(j\omega)}{W_{11}(j\omega)W_{22}(j\omega)} \tag{7}$$

Если модуль коэффициента связности на рабочей частоте системы ω_p достаточно мал, т. е. $|W_{св}(j\omega_p)| \ll 1$, перекрестными связями можно пренебречь. При этом объект может быть разбит на несколько независимых регулируемых участков, а система регулирования распадается на n независимых контуров. Если же $|W_{св}(j\omega_p)| > 1$, целесообразно поменять местами прямые и перекрестные каналы («перекрестное регулирование»).

Наконец, при $0 < |W_{св}(j\omega_p)| < 1$ перекрестные связи необходимо учитывать при расчете. Динамические свойства данной системы будет описывать следующий характеристический полином:

$$D(S) = \det[I + Wоб(S)Wп(S)] \tag{8}$$

Таким образом, были поставлены задачи, которые необходимо решить для математического описания многопараметрических систем управления.

Решение задачи стабилизации в области малых возмущений на примере парогенератора. Для решения задачи стабилизации основных параметров парогенератора, а также выявления их взаимного влияния друг на друга, требуется математическая модель, адекватно описывающая динамические свойства котлоагрегата. Данная модель представляется в виде системы линейных дифференциальных и алгебраических уравнений с постоянными коэффициентами, связывающей входные и выходные координаты расчетных участков [4].

Ввиду сложности прямого рассмотрения нелинейной динамики котла в нестационарных режимах его работы математическая модель создается в предположении, что котельный агрегат является линейной детерминированной системой в условиях малых возмущений. При составлении уравнений динамики барабанный котел делится на ряд взаимосвязанных расчетных участков, которые можно представить в виде двух групп (поверхности нагрева и не обогреваемые участки) [2].

К первой группе относятся экономайзер и циркуляционный контур котла как участок с двухфазной средой. Этот контур является многомерной динамической системой, входными координатами которой являются изменения давления, температуры и расхода рабочей среды, а выходными координатами – изменения давления пара, уровня в барабане, расхода пара из барабана, температура газов на выходе из топки. Ко второй группе относятся все остальные участки котла с однофазной средой. Котлоагрегат разбивается на десять расчетных участков (рис. 3):

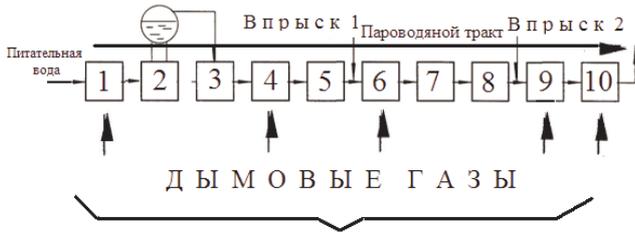


Рис. 3. Схема пароводяного и газовоздушного трактов котлоагрегата: 1-й участок – экономайзер; 2-й – циркуляционный контур; 3-й – радиационный пароперегреватель в топке; 4-й – конвективный пароперегреватель, потолок, фестон; 5-й – ширмовый пароперегреватель в топке; 6-й – ширмовый пароперегреватель в топке; 7-й – конвективный пароперегреватель, шахматные пучки; 8-й – конвективный пароперегреватель, коридорные пучки; 9-й – конвективный пароперегреватель, шахматные пучки; 10-й – конвективный пароперегреватель, коридорные пучки

На основании дифференциальных уравнений материального (9) и теплового (10) балансов пароводяного тракта, а также уравнений расхода рабочей среды (11), теплопередачи (12) и газовоздушного тракта (13), была разработана динамическая математическая модель парогенератора.

$$T_1 \frac{d\varphi_{pi}}{dt} + T_2 \frac{d\varphi_{\theta i}}{dt} + T_3 \frac{d\varphi_h}{dt} + B_1 \lambda_{i-1} + B_2 \lambda_i + B_3 \lambda_{впр} = 0 \quad (9)$$

$$T_3 \frac{d\varphi_{pi}}{dt} + T_4 \frac{d\varphi_{\theta i}}{dt} + A_1 \lambda_{i-1} + A_2 \lambda_i + A_3 \psi_i + A_4 \varphi_{pi-1} + A_5 \varphi_{\theta i-1} + A_6 \varphi_{pi} + A_7 \varphi_{\theta i} + A_8 \lambda_{впр} + A_9 \varphi_{\theta впр} = 0 \quad (10)$$

$$B_1 \lambda_i + B_2 \varphi_{pi} + B_3 \varphi_{\theta i} + B_4 \varphi_{pi+1} + B_5 \varphi_{\theta i+1} + B_6 \mu_T = 0 \quad (11)$$

$$A_1 \lambda_{i-1} + A_2 \lambda_i + A_3 \psi_i + A_4 \varphi_{\vartheta j-1} + A_5 \varphi_{\vartheta j} + A_6 \varphi_{pi-1} + A_7 \varphi_{\theta i-1} + A_8 \varphi_{pi} + A_9 \varphi_{\theta i} + A_{10} \mu_B + A_{11} \Delta r + A_{12} \mu_L = 0 \quad (12)$$

$$B_1 \psi_i + B_2 \varphi_{\vartheta j-1} + B_3 \varphi_{\vartheta j} + B_4 \mu_B + B_5 \Delta r + B_6 \mu_L = 0 \quad (13)$$

где $T_1 \div T_5$; $B_1 \div B_6$; $A_1 \div A_{12}$ – расчетные коэффициенты, исходя из теплового, гидравлического и др. расчетов котла; φ_{pi} , $\varphi_{\theta i}$, φ_h – давление, температура рабочей среды; уровень воды в барабане; $\varphi_{\vartheta j}$, λ_i , ψ_i – температура продуктов сгорания, расход рабочей среды, тепловой поток; μ_B , μ_L , Δr , $\lambda_{впр}$ – внешние возмущения расходом топлива, воздуха, топлива и воздуха; расход воды на впрыск; i , $i-1$ – индексы для параметров на выходах из расчетных участков; на входах в расчетные участки;

В качестве инструмента для исследования многосвязных систем использовался разработанный программно-

исследовательский комплекс по моделированию и идентификации динамики барабанного котла [5], с помощью которого составлена структурная схема многомерной модели динамики барабанного котла. На рис. 4-6, приведены основные зависимости динамики парогенератора для 100 % тепловой нагрузки (возмущение расходом топлива принято 10 % от номинального расхода).

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет описывать динамические свойства и учитывать существующие взаимосвязи между параметрами барабанного парогенератора с учетом его конструктивных особенностей. Также данная модель является основой для оптимизации процессов стабилизации параметров при различных возмущениях.



Рис. 4. Изменение давление на участке № 1



Рис. 5. Изменение температуры на участке № 1



Рис. 6. Изменение расхода на участке № 3

Многосвязное управление многопараметрической системой с применением компенсирующего регулирования

ния. Большинство систем автоматического регулирования многоконтурные, и связи через объект приводят к образованию значительного числа дополнительных замкнутых контуров. В этой связи число замкнутых контуров в сложных системах может достигать нескольких сотен. Кроме того, включение в работу каждого нового контура регулирования меняет динамические свойства уже работающих контуров. В результате оптимальность настроек нарушается, и чем больше мы вводим (или выводим из работы) регуляторов, тем значительнее нарушения. Таким образом, оптимизация такой многоконтурной системы представляет сложную задачу.

Общепризнанным, наиболее разработанным и эффективным методом изучения и оптимизации сложных систем является метод их декомпозиции на более простые системы с последующей оптимизацией этих более простых систем уже известными методами. Для многосвязных систем автоматического регулирования (САР) (рис. 7) наиболее простой и естественный способ их декомпозиции – придание свойств автономности отдельным подсистемам. В этом случае сложная многопараметрическая система распадается на ряд подсистем, переходные процессы в которых описываются дифференциальными уравнениями более низких порядков, и устраняются связи между этими подсистемами.

Оптимальной системой управления для такого подхода является система, основанная на регуляторах с внутренними перекрестными связями, причем выбранными таким образом, чтобы они по возможности полностью компенсировали перекрестные связи в регулируемом объекте. Системы регулирования, удовлетворяющие данному условию, являются автономными системами [2].

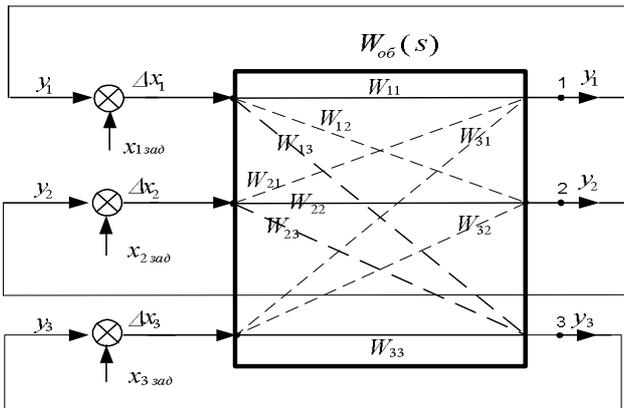


Рис. 7. Структурная схема трехсвязного объекта управления

Решив систему скалярных уравнений трехсвязной системы, получаем окончательный вид формул компенсаторов для автономной развязки каналов трехсвязной системы:

$$\begin{aligned}
 W_{\kappa 12}(S) &= \frac{W_{33}W_{12} - W_{32}W_{13}}{W_{13}W_{31} - W_{11}W_{33}} \\
 W_{\kappa 21}(S) &= \frac{W_{31}W_{23} - W_{33}W_{21}}{W_{22}W_{33} - W_{32}W_{23}} \\
 W_{\kappa 13}(S) &= \frac{W_{12}W_{23} - W_{13}W_{22}}{W_{11}W_{22} - W_{21}W_{12}} \\
 W_{\kappa 31}(S) &= \frac{W_{32}W_{21} - W_{31}W_{22}}{W_{22}W_{33} - W_{32}W_{23}} \\
 W_{\kappa 23}(S) &= \frac{W_{21}W_{13} - W_{11}W_{23}}{W_{11}W_{22} - W_{21}W_{12}}
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

$$W_{\kappa 32}(S) = \frac{W_{11}W_{32} - W_{12}W_{31}}{W_{13}W_{31} - W_{11}W_{33}}$$

Структурная схема «объект – компенсатор» приведена на рис. 8.

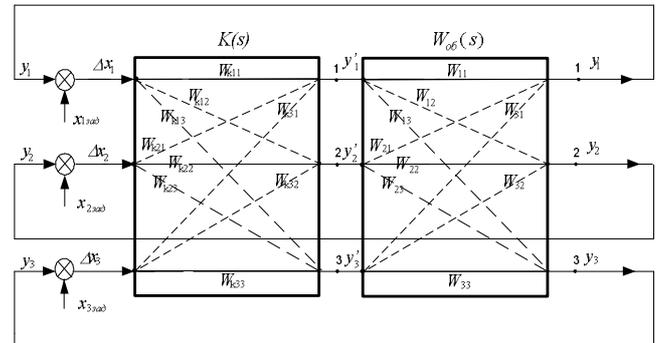
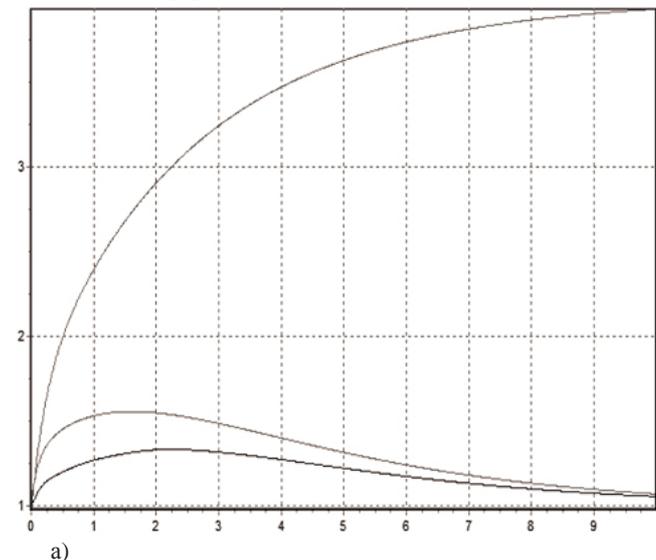


Рис. 8. Структурная схема «объект – компенсатор»

Для решения задачи развязки каналов была смоделирована схема трехсвязной САР и произведена компенсация взаимных связей. На рис. 9 представлены кривые переходных процессов модели без использования компенсаторов и с их использованием.

Исходя из анализа переходных процессов, видно, что в системе без использования компенсаторов заметно влияние процессов друг на друга, оно обусловлено «паразитным» сигналом, который раскачивает систему. После введения компенсаторов влияние перекрестных связей в объекте заметно ослабляется.

Использование принципа автономности в регулировании многосвязных объектов позволяет свести сложные задачи настройки и диагностики многопараметрической системы к последовательности простых задач и обеспечить приемлемое демпфирование всех динамических составляющих движения в объекте. В результате этого многопараметрическая система распадается на ряд независимых друг от друга (автономных) контуров, что облегчает ее дальнейшее исследование. Кроме того, по всем показателям качества регулирования автономные системы имеют преимущества перед неавтономными, например, в них настройки каждого регулятора определяются только динамическими свойствами своего контура регулирования и не взаимосвязаны друг с другом, что позволяет осуществить более качественную настройку параметров динамических САР [3].



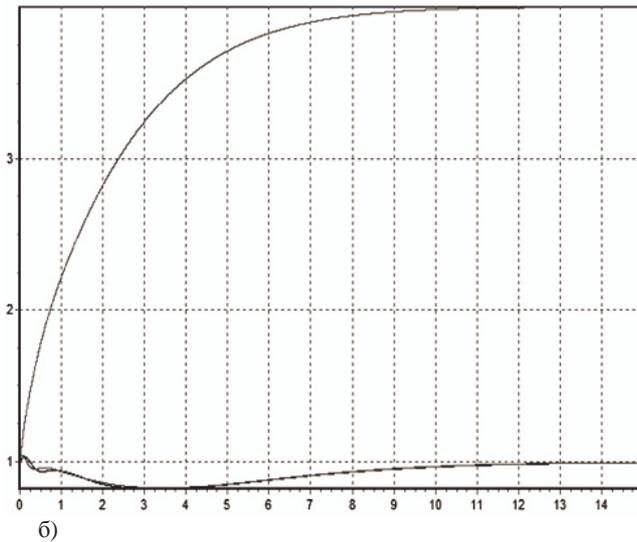


Рис. 9. Переходные процессы в трехсвязной САР: а) без компенсаторов; б) с компенсаторами

Выводы

Математическое описание многопараметрических систем управления позволяет отразить основные принципы функционирования сложных динамических систем управления, кроме того, имеется возможность представления многомерных динамических систем в операторной форме.

На примере сложной многопараметрической системы выработки пара была получена математическая модель и произведены расчеты динамических характеристик.

При решении задачи многосвязного управления многопараметрической системой с применением компенсирующего регулирования была предложена многопараметрическая модель системы выработки пара на основе уравнений динамики. В результате исследований удалось установить, что влияние перекрестных связей в системе достаточно велико, и для работоспособности системы, а также улучшения качества регулирования и управления системой в целом, нужно строить

математическую модель системы, основанную на регуляторах с внутренними перекрестными связями.

Литература

1. Игнатьев И.В., Ковров А.Е. Алгоритм выбора настроек автоматических регуляторов возбуждения в многомашинных энергосистемах // Вестн. Сиб. гос. аэрокосм. ун-та им. ак. М.Ф. Решетнева. 2010. № 1. С. 24-29.
2. Дьяконца С.А. Адаптивный алгоритм многосвязного управления многопараметрической системой выработки пара // Труды Братского государственного университета: Сер. Естественные и инженерные науки. 2012. Т. 1. С. 26-31.
3. Игнатьев И.В., Ковров А.Е. Методика координации настроечных параметров автоматических регуляторов возбуждения в сложных энергосистемах // Там же. 2007. № 2. С. 8-12.
4. Дьяконца С.А., Федоров А.А. Формирование модели многопараметрической динамической системы по экспериментальным данным // Там же. 2011. Т. 1. С. 32-36.
5. Дьяконца С.А., Протасов Д.А. Разработка программно-исследовательского комплекса «Моделирование динамики барабанного котла» // Там же. 2010. Т. 1. С. 62-66.

References

1. Ignatyev I.V., Kovrov A.E. Algorithm of setting choice of automatic excitation regulators for multimachine electric power systems // Vestn. Sib. gos. azerokosm. un-ta im. ak. M.F. Reshetneva. 2010. №1. P. 24-29.
2. Dyakonitsa S.A. Adaptive algorithm of the multicoupling control for multi-parameter system of steam generation // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2012. Vol. 1. P. 26-31.
3. Ignatyev I.V., Kovrov A.E. Technique of coordination of set-up parameters for automatic regulators of excitation in complex power supply systems // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2007. №2. P. 8-12.
4. Dyakonitsa S.A., Fedorov A.A. Formation of model of multi-parameter dynamic system on experimental data // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2011. Vol. 1. P. 32-36.
5. Dyakonitsa S.A., Protasov D.A. Development of the program and research complex «Modelling the dynamics of steam boiler» // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2010. Vol. 1. P. 62-66.