

## Прикладной метод исследования промышленного объекта с запаздыванием как объекта диагностики на примере САР гидроагрегата Братской ГЭС

А.Д. УЛЬЯНОВ

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия  
coberul@gmail.com

Статья поступила 2.12.2015, принята 20.01.2016

*Приведен процесс исследования промышленной системы автоматического регулирования скорости вращения гидроагрегата Братской ГЭС. Рассмотрена структурная схема системы автоматического регулирования (САР) гидроагрегата с пропорциональным регулятором. Представлены экспериментальная кривая разгона гидротурбины со сложным управляющим воздействием и результат ее идентификации, а также передаточная функция и дифференциальные уравнения системы с запаздывающим аргументом. Выведено условие устойчивости для дифференциального уравнения, описывающего динамику САР, предложено операторное изображение процесса запаздывания  $e^{-\tau p}$ , представленного суммой первых трех членов разложения  $e^{-\tau p}$  в ряд Маклорена. Показано поведение САР с тремя различными коэффициентами пропорционального регулятора. Замечено, что наличие колебаний позволяет применить способ резонансного диагностирования для нахождения структурных параметров объекта и прогнозирования его постепенных отказов. Рассмотрена экспериментальная схема САР, состоящая из последовательно соединенных гидроагрегата, маятника, турбины, сервомотора и золотника. Сделан вывод о невозможности аналитического определения переходной функции замкнутой экспериментальной САР при запаздывании в объекте регулирования и отсутствии демпфирования в регуляторе в связи с наличием автоколебаний сложной формы.*

**Ключевые слова:** гидроагрегат; САР; устойчивость; ряд Маклорена.

## Applied research method of an industrial facility with retard action as an object of diagnostics on the example of automatic control system of a hydraulic unit at Bratsk Hydro Power Plant

A.D. Ulyanov

Bratsk State University; 40, Makarenko St, Bratsk, Russia  
Coberul@gmail.com

Received 2.12.2015, accepted 20.01.2016

*The paper presents the research process of an industrial automatic control system for rotary velocity of a hydraulic unit at Bratsk Hydro Power Plant. Structural scheme has been presented for automatic control system of a hydraulic unit with a proportional control. Experimental curve has been showed for accelerating hydraulic generator with a complex control action and the result of its identification as well as transfer function and differential equations of a system with retard action. Stability condition has been derived for a differential equation describing the dynamics of automatic control system. Operator representation has been proposed for the process of retard action  $e^{-\tau p}$  represented by a sum of the first three expanding members of  $e^{-\tau p}$  in Maclaurin's series. Behavior of automatic control system has been presented with three different coefficients of the proportional control. It has been noticed that the presence of oscillations makes it possible to apply the method of resonant diagnostics to find structural parameters of the industrial facility and to forecast its gradual retard actions. Experimental scheme of automatic control system has been studied which consists of a hydraulic unit, turbine pendulum, servo-engine and valve spindle connected in sequence. A conclusion has been made about impossibility of analytical determination of a transfer function of closed-loop control system with retard action in regulation unit and with lack of damping control in the connection controller with automatic oscillations of a complex form.*

**Key words:** hydraulic unit; automatic control system; stability; Maclaurin's series.

### Введение

Устойчивость, в частности запас устойчивости промышленных объектов (ПО), является необходимым признаком их работоспособности. В связи с разработкой высоких технологий, высокоточных ПО особое внимание уделяется явлению запаздывания выходного сигнала относительно входного, что связано как с

большой практической значимостью этих ПО, так и с необходимостью учитывать явления последействия для адекватного математического моделирования различных ПО [1; 2].

Априори известно, что все ПО в той или иной мере имеют запаздывание, которое обусловлено необходимостью передачи сигнала, энергии или вещества во

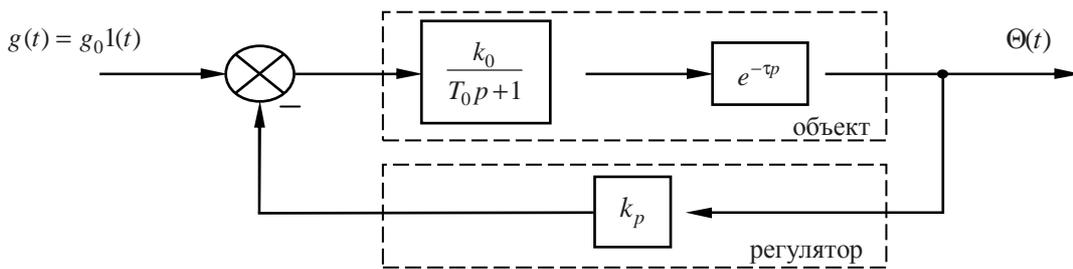
времени и пространстве и информационным запаздыванием [3].

Как и каким образом учитывать явление запаздывания в ПО, определяется в основном следующими факторами:

- величинами и характером запаздывания как в элементах, так и в целом ПО;
- целями и задачами исследования ПО;
- возможностями экспериментального и физико-математического исследования таких ПО. [4]

Для математического описания динамики ПО с запаздыванием находят широкое применение дифференциальные уравнения с запаздывающим аргументом.

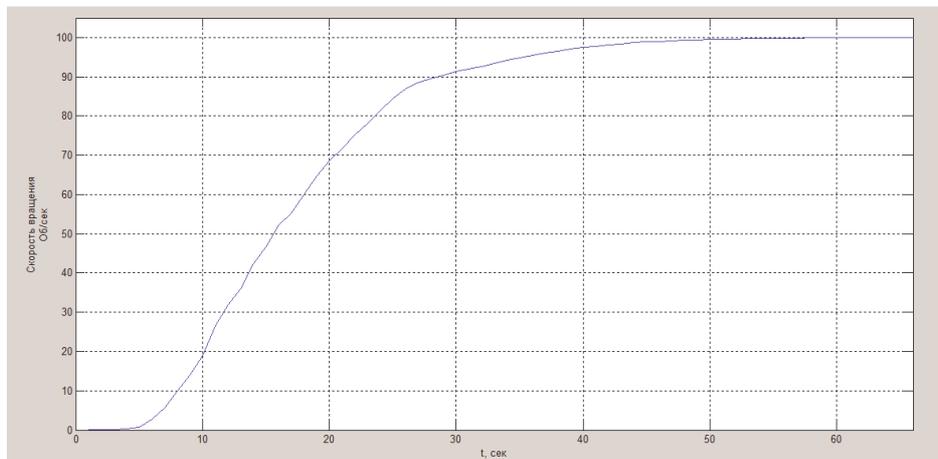
**Прикладной метод исследования динамики гидроагрегата с запаздыванием.** Рассмотрим систему автоматического регулирования (САР) скорости вращения гидроагрегата. Динамика процесса управления гидроагрегатом достаточно полно представлена в работах [5–7], а структурная схема регулирования скорости вращения гидроагрегата с пропорциональным регулятором по аналогии со структурной схемой САР температуры ТЭНа [8] представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Структурная схема САР скорости вращения гидроагрегата:  $g(t)$  — входной сигнал;  $k_0, T_0, \tau$  — соответственно коэффициент передачи, постоянная времени и время запаздывания гидроагрегата;  $k_p$  — коэффициент передачи регулятора;  $\Theta(t)$  — выходной сигнал

При проведении первичной и вторичной идентификации экспериментальной переходной характеристики гидроагрегата со сложным управляющим воздействием (рис. 2) были получены следующие значения [9]: по-

стоянная времени объекта  $T = 40,9$  с; коэффициент передачи  $k_0 = 7.272$  об/м<sup>0</sup>; постоянная времени запаздывания  $\tau = 0,8$  с.



**Рис. 2.** Экспериментальная переходная характеристика процесса разгона гидроагрегата Братской ГЭС

Передаточная функция замкнутой системы имеет вид:

$$W(p) = \frac{k_0 e^{-\tau p}}{T p + 1 + k_0 k_p e^{-\tau p}} \quad (1)$$

Передаточной функции (1) соответствует дифференциальное уравнение с запаздывающим аргументом:

$$x'(t) + \frac{1}{T_0} x(t) + \frac{k_0 k_p}{T_0} x(t - \tau) = \frac{k_0}{T_0} \cdot g_0 1(t - \tau), t \in [0, \infty). \quad (2)$$

$$x(\xi) = 0, \xi < 0.$$

В работах [8; 10; 11] приводится утверждение об устойчивости уравнения:

$$\dot{x}(t) + \sum_{k=1}^m H_k(t) x[h_k(t)] = f(t), t \in [0, \infty), \quad (3)$$

$$x(\xi) = 0, \xi < 0,$$

рассматриваемого в предположениях:  $f, H_k: [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$  — суммируемые на каждом конечном отрезке  $[0, b] \subset [0, \infty)$  функции;  $h_k: [0, \infty)$  измеримы,  $h_k(t) \leq t, k = 1, 2, \dots, m$  при почти всех  $t \in [0, \infty)$ .

Сформулируем это утверждение в удобной для наших целей форме [8].

Пусть существует функция  $y: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^+$  ( $y(t) = 0$  при  $t < 0$ ) такая, что выполняется неравенство:

$$y(t) \geq \sum_{k=1}^m H_k^+(t) \sigma_{h_k}(t) \exp \left( \int_{h_k(t)}^t y(t) d\xi \right). \quad (4)$$

Тогда уравнение (2) устойчиво.

Здесь  $H_k^+(t)$  — положительная часть функции  $H_k(t)$ ,  $k = 1, 2, \dots, m$ .

Заметим, что вместо выполнения неравенства (4) в теореме можно потребовать выполнение неравенства:

$$\sum_{k=1}^m \int_{h_k(t)}^t H_k^+(t) \sigma_{h_k}(t) ds \leq \frac{1}{e}. \quad (5)$$

Применив неравенство (5) к уравнению (2), получим следующее условие устойчивости этого уравнения:

$$\frac{\tau}{T_0} \leq \frac{1}{k_0 k_p e}, \quad (6)$$

которое и является диагностическим признаком, определяющим наличие в данной системе неустойчивых явлений.

Построим кривые переходных процессов для различных значений коэффициента передачи регулятора  $k_p$ . Как известно, аналитического решения уравнение (2) не имеет, так как число корней характеристического полинома этого уравнения бесконечно. Это можно показать, разлагая  $e^{-\tau p}$  в ряд Маклорена:

$$e^{-\tau p} = \frac{1}{e^{\tau p}} = \frac{1}{1 + \frac{\tau p}{1!} + \frac{(\tau p)^2}{2!} + \frac{(\tau p)^3}{3!} + \dots + \frac{(\tau p)^n}{n!} + \dots}$$

Приближенное уравнение переходного процесса может быть получено, если в разложении экспоненты ограничиться несколькими членами ряда [12] (например тремя членами), тогда передаточная функция (1) будет иметь вид:

$$W(p) = \frac{k_0}{(T_1 p + 1) \left( \frac{\tau^2 p^2}{2} + \tau p + 1 \right) + k_0 k_p}. \quad (7)$$

Для получения диагностической информации необходимо уравнение (7) привести к виду:

$$W(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1)}, \quad (8)$$

где  $k$  — коэффициент передачи САР;  $T_1$  и  $T_2$  — постоянные времени, характеризующие суммарную инерционность гидрогенератора и сервомотора.

Коэффициенты  $k$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $\xi$  можно определить на основании решения системы нелинейных алгебраических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} k &= \frac{k_0}{1 + k_0 k_p}; \\ T_1 + 2\xi T_2 &= \frac{T + \tau}{1 + k_0 k_p}; \\ 2\xi T_1 T_2 + T_2^2 &= \frac{2\tau T + \tau^2}{2(1 + k_0 k_p)}; \\ T_1 T_2^2 &= \frac{T\tau^2}{2(1 + k_0 k_p)}. \end{aligned} \right\}$$

1. При  $k_p = 15$  (условие (6) не выполняется) передаточная функция примет вид:

$$W(p) = \frac{0.06606}{0.1189 p^3 + 0.2595 p^2 + 0.2748 p + 1}.$$

График переходного процесса представлен на рис. 3.

2. При  $k_p = 0.15$  (условие (6) выполняется) передаточная функция примет вид:

$$W(p) = \frac{3.478}{6.259 p^3 + 15.8 p^2 + 19.94 p + 1}.$$

График переходного процесса представлен на рис. 4.

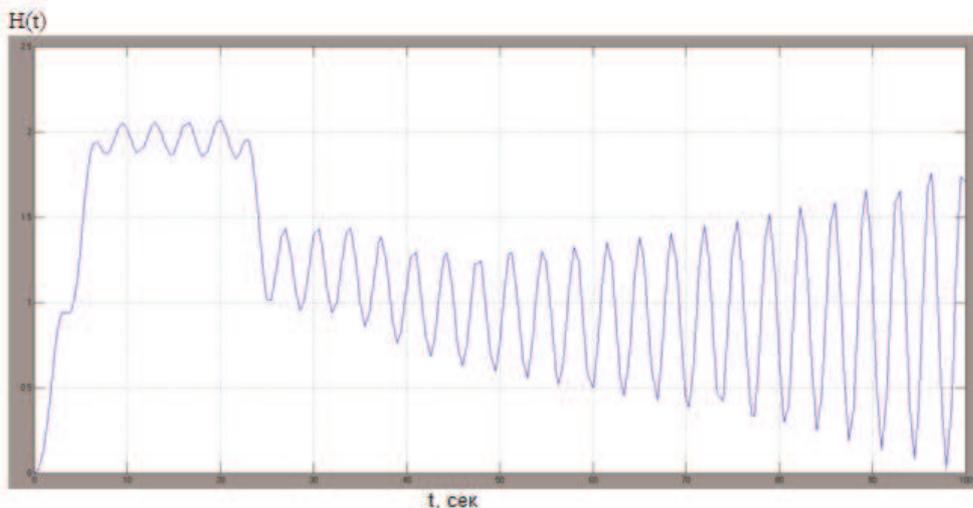


Рис. 3. Переходная характеристика при  $k_p = 15$

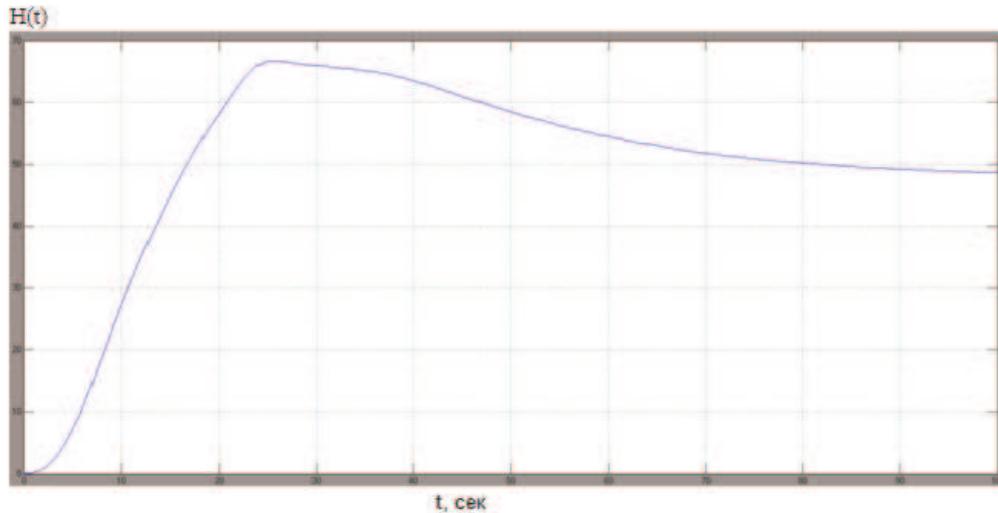


Рис. 4. Переходная характеристика при  $k_p = 0,15$

3. При  $k_p = 0,15 \cdot 10^{-2}$  (условие (6) выполняется) передаточная функция примет вид:

$$W(p) = \frac{7.194}{12.94p^3 + 32.68p^2 + 41.25p + 1}.$$

График переходного процесса представлен на рис. 5.

Экспериментальная САР скорости вращения гидроагрегата состоит (рис. 6) из последовательно соединен-

ных гидроагрегата, турбины, маятника, сервомотора и золотника [13].

Так как инерционности и запаздывания гидроагрегата и турбины соизмеримы, а маятника, сервомотора и золотника — существенно меньше, в данной схеме следует учесть лишь их коэффициенты передачи. Тогда расчетная схема экспериментальной САР скорости вращения гидроагрегата будет иметь вид, как на рис. 7 [14].

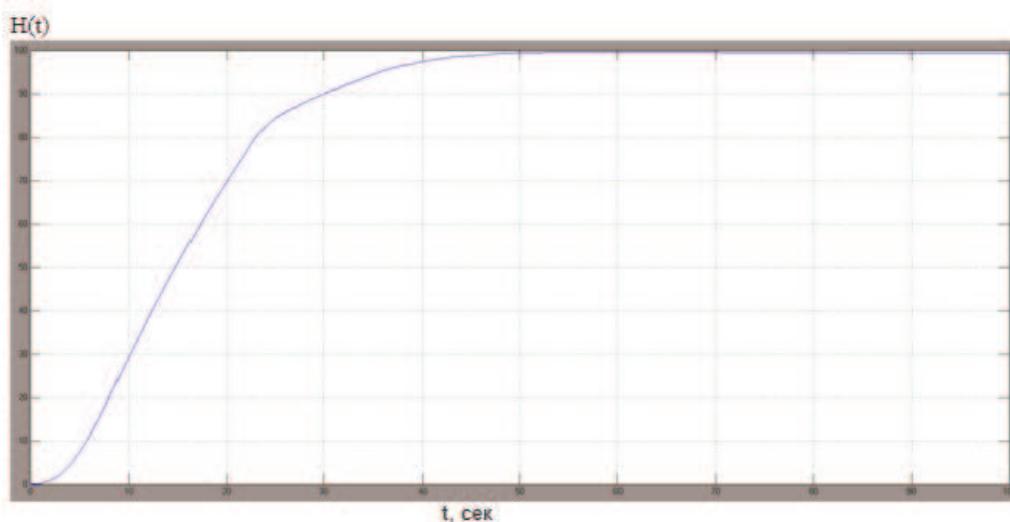


Рис. 5. Переходная характеристика при  $k_p = 0,15 \cdot 10^{-2}$

Передаточная функция разомкнутой системы:

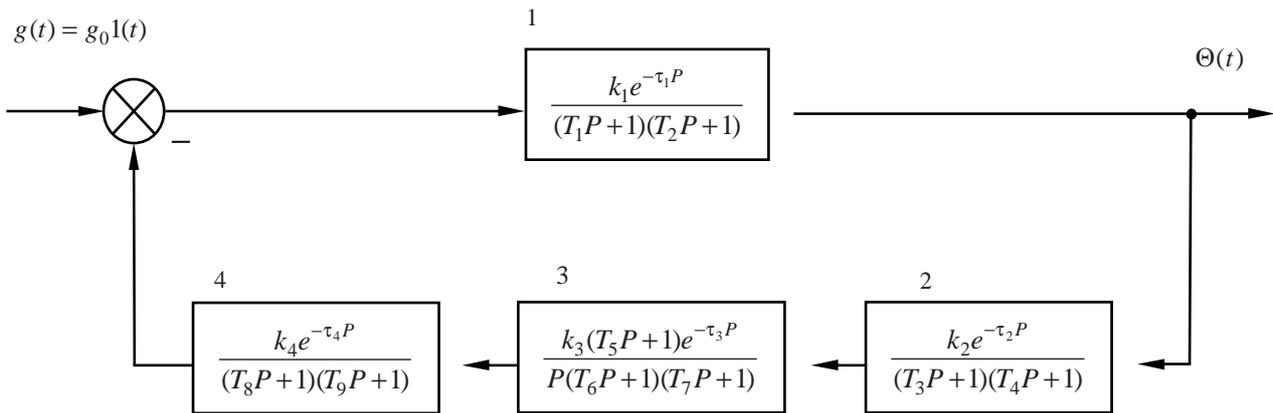
$$W_{p.c}(p) = \frac{k_0 k_p e^{-(\tau_1 + \tau_2)p}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)}, \quad (9)$$

где  $k_0 = k_1$  — коэффициент передачи гидроагрегата;  $k_p = k_2 k_3 k_4$  — коэффициент передачи регулятора.

Соответственно передаточная функция замкнутой системы:

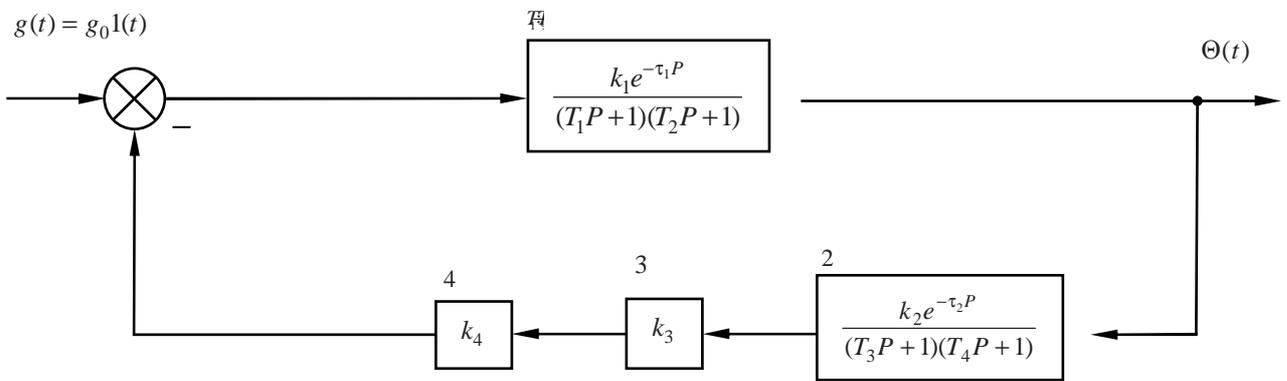
$$W_{z.c}(p) = \frac{k_0 k_p e^{-(\tau_1 + \tau_2)p}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)(T_4 p + 1) + k_0 k_p e^{-(\tau_1 + \tau_2)p}}. \quad (10)$$

Очевидно, что невозможно аналитически определить переходную функцию, соответствующую (10). Экспериментальные переходные характеристики имеют автоколебания сложной формы ввиду наличия запаздывания в объекте регулирования 2-го порядка, а также наличия запаздывания и отсутствия демпфирования в регуляторе. Такие характеристики могут быть представлены соответствующим числом алгебраической суммы членов ряда Фурье.



**Рис. 6.** Структурная схема экспериментальной САР скорости вращения гидроагрегата:  $g(t)$  — входной сигнал (напряжение); 1, 2, 3, 4 — соответственно передаточные функции гидроагрегата, турбины маятника, сервомотора и золотника;  $k_1 - k_4, T_1 - T_4, \tau_1 - \tau_4$  — соответственно их коэффициенты передачи, постоянные времени и время запаздывания;  $\Theta(t)$  — выходной сигнал (скорость вращения)

я



**Рис. 7.** Расчетная схема экспериментальной САР скорости вращения гидроагрегата

**Выводы**

1. С использованием операционного исчисления приводится методика построения переходных процессов САР скорости вращения гидроагрегата, основанная на замене операторного изображения  $e^{-\tau P}$  тремя членами ряда Маклорена.
2. По полученным диагностическим признакам устойчивости проведены экспериментальные исследования и вычислительные эксперименты для САР скорости вращения гидроагрегата.
3. Коэффициенты  $k, T_1, T_2$  являются диагностическими параметрами, определяющими состояния САР в динамическом режиме ее функционирования. Эти коэффициенты могут быть определены на основании решения системы нелинейных алгебраических уравнений.
4. В случае колебательного характера переходного процесса (рис. 3) можно использовать резонансный метод диагностирования [15].

*Литература*

1. Березанский Л. М. Положительность функции Коши и устойчивость линейных дифференциальных уравнений с

последствием // Дифференц. уравнения. 1990. Т. 26, № 9. С. 1490-1500.  
 2. Ларионов А.С., Лузгин В.В., Панасов В.В. Устойчивость регулируемой системы с последствием // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2005. С. 132-135.  
 3. Лузгин В.В., Панасов В.В. Прикладной метод идентификации динамики промышленных объектов // Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте: сб. науч. тр. Братск, 2007. Вып. 15. С. 36-41.  
 4. Ларионов А.С., Панасов В.В. Об устойчивости систем автоматического регулирования на примере электротеплового объекта // Вестн. Бурят. ун-та. Сер. 13. Математика и информатика. 2006. С. 232-236.  
 5. Watanabe T. Robust decentralized turbine-governor control subject to saturation nonlinearity // American Control Conference, 2002. P. 948-1953.  
 6. Eker I. Hydro-turbine models for robust governor designs in hydro-power generation // In: 2nd International Conference on Responsive Manufacturing, 2002. P. 609-613.  
 7. Jones D, Mansoor SP. Predictive feedforward control for a hydroelectric plant // IEEE Trans Control Syst Technol 2004. № 12. P. 956-965.  
 8. Лузгин В.В., Ларионов А.С., Панасов В.В. Прикладной метод исследования динамики систем автоматического регу-

лирования с запаздыванием // Научный вестн. НГТУ. 2008. № 2 (31). С. 165-170.

9. Ульянов А.Д. Идентификация процесса разгона гидроагрегата Братской ГЭС // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2015. Т. 1. С. 81-84.

10. Ларионов А.С. Панасов В.В. Об одном подходе к исследованию устойчивости систем автоматического регулирования // Труды Братского государственного университета: Сер. Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. Братск: БрГУ, 2006. Т. 2. С. 88-92.

11. Лузгин В.В., Ларионов А. С., Панасов В.В. Исследование динамики электротеплового объекта // Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири: материалы межрегион. научно-техн. конф. Братск, 2006. С. 24-27.

12. Колмановский В.Б. Уравнения с последействием и математическое моделирование // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 4. С.122-127.

13. Urban V. Adoption of automatic identification systems by grocery retailers in the Johannesburg area // Journal of transport and Supply Chain Management. 2011.

14. Urban V. Adoption of automatic identification systems by grocery retailers in the Johannesburg area // Journal of transport and Supply Chain Management. 2011.

15. Лузгин В.В., Ульянов А.Д. Резонансный метод диагностирования колебательных промышленных объектов // Вестн. Моск. автомобильно-дорожного гос. техн. ун-та (МАДИ). 2015. № 1 (40). С. 42-45.

#### References

1. Berezanskii L. M. The positiveness of the Cauchy function and stability of linear differential equations with aftereffect // Differents. uravneniya. 1990. Т. 26, № 9. P. 1490-1500.

2. Larionov A.S., Luzgin V.V., Panasov V.V. The stability of the controlled system with delay // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2005. P. 132-135.

3. Luzgin V.V., Panasov V.V. Applied method of identifying the dynamics of industrial plants // Informatsionnye sistemy kontrolya i upravleniya v promyshlennosti i na transporte: sb. nauch. tr. Bratsk, 2007. Vyp. 15. P. 36-41.

4. Larionov A.S., Panasov V.V. On the stability of automatic control systems on the example of electro object // Bulletin of the Buryat State University. Ser. Mathematics, Informatics. 2006. P. 232-236.

5. Watanabe T. Robust decentralized turbine-governor control subject to saturation nonlinearity // American Control Conference, 2002. P. 948-1953.

6. Eker I. Hydro-turbine models for robust governor designs in hydro-power generation // In: 2nd International Conference on Responsive Manufacturing, 2002. P. 609-613.

7. Jones D., Mansoor S.P. Predictive feed forward control for a hydroelectric plant // IEEE Trans Control Syst Technol 2004. № 12. P. 956-965.

8. Luzgin V.V., Larionov A S., Panasov V.V. Application method for studying the dynamics of automatic control systems with delay // Scientific Bulletin of NSTU. 2008. № 2 (31). P. 165-170.

9. Ul'yanov A.D. Identification of the Bratsk hydroelectric station hydroelectric acceleration // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2015. Т. 1. P. 81-84.

10. Larionov A.S. Panasov V.V. An approach to the study of the stability of automatic control systems // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta: Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki - razvitiyu regionov Sibiri. Bratsk: BrGU, 2006. Т. 2. P. 88-92.

11. Luzgin V.V., Larionov A. S., Panasov V.V. Research of dynamics of electro object // Estestvennye i inzhenernye nauki - razvitiyu regionov Sibiri: materialy mezhtregion. nauchno-tekhn. konf. Bratsk, 2006. P. 24-27.

12. Kolmanovskii V.B. Equations with Delay and mathematical modeling // Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal. 1996. № 4. P. 122-127.

13. Urban V. Adoption of automatic identification systems by grocery retailers in the Johannesburg area // Journal of transport and Supply Chain Management. 2011.

14. Urban V. Adoption of automatic identification systems by grocery retailers in the Johannesburg area // Journal of transport and Supply Chain Management. 2011.

15. Luzgin V.V., Ul'yanov A.D. Resonant vibrational method of diagnosing industrial facilities // Vestnik MADИ. 2015. № 1 (40). P. 42-45.