

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАСШИРЕННЫХ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНОГО РАЗНОСТНОГО РЕГУЛЯТОРА

Куликов Владимир Валерьевич

аспирант, e-mail: godefired@mail.ru,

Куцый Николай Николаевич

д.т.н., профессор, институт информационных технологий и анализа данных,
e-mail: kucyinn@mail.ru,

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83

Аннотация. Для повышения качества переходных процессов в автоматических системах с запаздыванием применяют ПИ-регулятор со звеном запаздывания, компенсирующим интегральный компонент стандартного ПИ-регулятора, который обозначается в технической литературе как пропорционально-интегральный разностный регулятор (ПИР-регулятор). Важной задачей, стоящей перед промышленной реализацией данного регулятора, является определение оптимальных настраиваемых параметров, доставляющих экстремальное значение принятому критерию оптимальности. Наличие запаздывания в регуляторе и объекте затрудняет применение аналитических подходов для параметрического синтеза закона регулирования, обеспечивающего переходные процессы с приемлемым качеством. Это приводит к использованию алгоритмических методов. В статье показано применение метода расширенных частотных характеристик (РЧХ) для параметрического синтеза ПИР-регулятора в одноконтурной автоматической системе регулирования (АСР) объектом с запаздыванием, критичным для применения типовых регуляторов. Метод РЧХ позволяет получить значения настраиваемых параметров ПИР-регулятора, которые в некоторых сложных случаях могут быть использованы как стартовые точки градиентной процедуры. Для оценки качества переходных процессов, полученных методом РЧХ, задействованы широко распространенные в практике автоматического регулирования коэффициент перерегулирования и интегральный квадратичный критерий.

Ключевые слова: автоматическая система, транспортное запаздывание, устойчивость, ПИ-регулятор, ПИР-регулятор, метод расширенных частотных характеристик, пропорционально-интегральный разностный регулятор, параметрический синтез

Цитирование: Куликов В. В., Куцый Н.Н. Применение метода расширенных частотных характеристик для параметрического синтеза пропорционально-интегрального разностного регулятора // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 1 (21). С. 36-42. DOI:10.38028/ESI.2021.21.1.003

Введение. При синтезе автоматических систем регулирования (АСР) с большим запаздыванием обращаются к так называемым модифицированным регуляторам, исходя из того, что серийный ПИ-регулятор не обеспечивает требуемого качества работы в обозначенных условиях [1-3]:

$$\frac{\tau_{об}}{T_{об}} > 1, \quad (1)$$

где $T_{об} = \max[T_{об1}, \dots, T_{обn}]$ – постоянные времени объекта; $\tau_{об}$ – время запаздывания объекта.

Примером модифицированного ПИ-регулятора, работающего в автоматических системах при условии (1) является пропорционально-интегральный разностный регулятор (ПИР-регулятор) [4]. Данный регулятор является одним из вариантов регулятора с динамическим корректором [2,5-10]. Широкому внедрению различных вариантов реализации этого регулятора в практику автоматического регулирования препятствует недостаточная распро-

страненность методов настройки. Одним из подходов к решению задачи оптимизации таких регуляторов служит применение градиентного алгоритма на базе теории чувствительности [11]. Как известно, для применения градиентного алгоритма требуется выбрать стартовую точку – начальные значения настраиваемых параметров оптимизируемого регулятора. В настоящей работе предлагается для расчёта стартовой точки применять метод расширенных-частотных характеристик (РЧХ) [12]. Существенным преимуществом метода РЧХ для определения приближенных параметров автоматических регуляторов является его применимость к разнообразным непрерывным регуляторам [12-14].

1. Постановка задачи. Приведём передаточную функцию ПИР-регулятора [4]:

$$G_c(p) = q_1 + \frac{q_2}{p} \cdot (1 - q_3 \cdot e^{-q_4 \cdot p}), \quad (2)$$

где q_1, q_2, q_3, q_4 – настраиваемые параметры ПИР-регулятора; $p = j\omega - m\omega$ – комплексная переменная для расширенных частотных характеристик. Параметры q_1, q_2 рассчитываются в данной работе методом РЧХ, а q_3, q_4 принимает в процессе расчёта фиксированное значение.

В качестве критериев оценки переходного процесса АСР выбран широко распространённый в практике автоматического регулирования интегральный квадратичный критерий I и перерегулирование:

$$I = \int_0^L \varepsilon^2(t) dt, \quad (3)$$

где $\varepsilon(t)$ – ошибка системы; L – интервал интегрирования.

По методу РЧХ в пространстве настраиваемых параметров регулятора строится поверхность равной степени колебательности, на которой из условия минимума значения критериев определяется точка, соответствующая оптимальной настройке регулятора, при выполнении условия [11]:

$$-G_c(m, \omega) \cdot G_p(m, \omega) = 1, \quad (4)$$

где $G_c(m, \omega)$ – расширенная амплитудно-фазовая характеристика регулятора; $G_p(m, \omega)$ – расширенная амплитудно-фазовая характеристика объекта; ω – частота; m – степень колебательности.

Как известно из курса математического анализа, соотношение (4) двух комплексных чисел возможно в том случае, если произведение модулей векторов равно единице, а аргументы (фазы) отличаются на $2\pi n$ (примем $n=0$ без потери общности для результатов исследования) [11]:

$$\begin{cases} |G_c(m, \omega)| \cdot |G_p(m, \omega)| = 1 \\ \text{Arg}(G_c(m, \omega)) + \text{Arg}(G_p(m, \omega)) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Здесь $|G_c(m, \omega)|$ – расширенная амплитудно-частотная характеристика регулятора; $|G_p(m, \omega)|$ – расширенная амплитудно-частотная характеристика объекта; $\text{Arg}(G_c(m, \omega))$ – расширенная фазо-частотная характеристика регулятора; $\text{Arg}(G_p(m, \omega))$ – расширенная фазо-частотная характеристика объекта.

Результатом решения системы уравнений (5) является кривая настройки параметров q_1, q_2 регулятора $G_c(m, \omega)$ [11] на плоскости. При движении по данной кривой, путём соответствующего изменения настройки регулятора, переходный процесс качественно изменяется.

2. Применение метода РЧХ. Решим систему уравнений (5) с учётом (2), относительно $q_1(\omega)$ и $q_2(\omega)$.

Представим выражение для расчёта $q_1(\omega)$:

$$q_1(\omega) = \sqrt{\frac{|A_2(\omega)|}{|A_1(\omega)|}}, \quad (6)$$

где $A_1(\omega) = C_1^2(\omega) - C_2^2(\omega) + 4 \cdot C_3(\omega) \cdot C_4^2(\omega)$, $A_2(\omega) = \frac{4 \cdot C_3(\omega) \cdot C_4^2(\omega)}{|G_p(m, \omega)|^2}$; $|A_1(\omega)|, |A_2(\omega)|$ - абсолютное значение.

Параметр $q_2(\omega)$ определяется следующим образом:

$$q_2(\omega) = \sqrt{\frac{|B_2(\omega)|}{|B_1(\omega)|}}, \quad (7)$$

$$\text{где } B_1(\omega) = (2 \cdot C_3(\omega) + \frac{1}{D_1(\omega)} \cdot C_2(\omega))^2 - (\frac{1}{D_1(\omega)} \cdot C_2(\omega))^2 + \frac{8 \cdot C_3(\omega)}{D_1^2(\omega)} \cdot C_4^2(\omega),$$

$$B_2(\omega) = \frac{-4 \cdot C_3(\omega) \cdot C_4^2(\omega)}{|G_p(m, \omega)|^2},$$

$$C_1(\omega) = 2 \cdot D_1(\omega) \cdot C_3(\omega) + C_2(\omega), \quad C_2(\omega) = -2 \cdot C_4(\omega) \cdot C_5(\omega),$$

$$C_3(\omega) = C_5^2(\omega) + C_6^2(\omega) \quad C_4(\omega) = \omega \cdot (1 + m^2),$$

$$C_5(\omega) = m + q_3 \cdot e^{\omega \cdot m} \cdot \sin(\omega \cdot q_4) + m \cdot q_3 \cdot e^{\omega \cdot m} \cdot \cos(\omega \cdot q_4),$$

$$C_6(\omega) = 1 - q_3 \cdot e^{\omega \cdot m} \cdot \cos(\omega \cdot q_4) + m \cdot q_3 \cdot e^{\omega \cdot m} \cdot \cos(\omega \cdot q_4),$$

$$C_7(\omega) = m \cdot q_3 \cdot e^{\omega \cdot m} \cdot \cos(\omega \cdot q_4) - q_3 \cdot e^{\omega \cdot m} \cdot \cos(\omega \cdot q_4)$$

$$D_1(\omega) = \frac{\arctg(\arg(G_p(m, \omega))) \cdot C_4(\omega)}{\arctg(\arg(G_p(m, \omega))) \cdot (q_3 \cdot e^{\omega \cdot m} \cdot \sin(\omega \cdot q_4) - m + C_7(\omega) + C_8(\omega))},$$

$$C_8(\omega) = m \cdot q_3 \cdot e^{\omega \cdot m} \cdot \sin(\omega \cdot q_4) + 1, \quad |B_1(\omega)|, |B_2(\omega)| - \text{абсолютное значение.}$$

Полученные в данной работе выражения (6), (7) наглядно демонстрируют, что применение метода РЧХ усложняется, когда в регуляторе используется звено запаздывания, по сравнению с хорошо известным в литературе расчётом методом РЧХ настраиваемых параметров типовых ПИ-, ПИД-регуляторов [11]. Стоит отметить, что различные регуляторы, ориентированные на работу в автоматических системах с запаздыванием, содержат такое звено [1,2,4,5].

3. Численный пример. Далее приводится параметрический синтез ПИР-регулятора при математической модели объекта, которая может описывать процессы в автоматической системе регулирования температурой двигателя локомотива [15]:

$$G_p(p) = \frac{k_{об}}{(T_{об1}p + 1)(T_{об2}p + 1)} e^{-\tau_{об}}. \quad (8)$$

Здесь $k_{об}$ – статический коэффициент усиления; $T_{об1}, T_{об2}$ – постоянные времени объекта регулирования; $\tau_{об}$ – время запаздывания.

В данной работе приняты следующие параметры объекта (21):

$$T_{o61}=10.0; T_{o62}=40.0; \tau_{o6}=50.0; k_{o6}=1.0. \quad (9)$$

Для объекта (8) рассчитывается ниже графическим способом диапазон значений ω , используемый при построении линии заданной степени колебательности $m=0.221$:

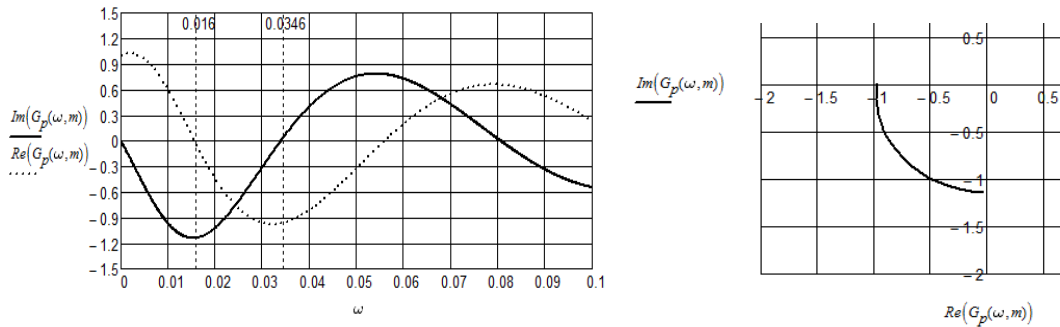


Рис. 1. Поиск диапазона значений ω

Рассмотрим выбор начального значения параметров q_3, q_4 .

В работе [4] рекомендуется выбирать q_3 в диапазоне (0..1), а $q_4 \approx T_{o61} + T_{o62} + \tau_{o6}$.

Учитывая результаты предварительных исследований, значение q_3 в данной работе предлагается брать как 0.1, а для объекта (8) при параметрах (9) $q_4=100$.

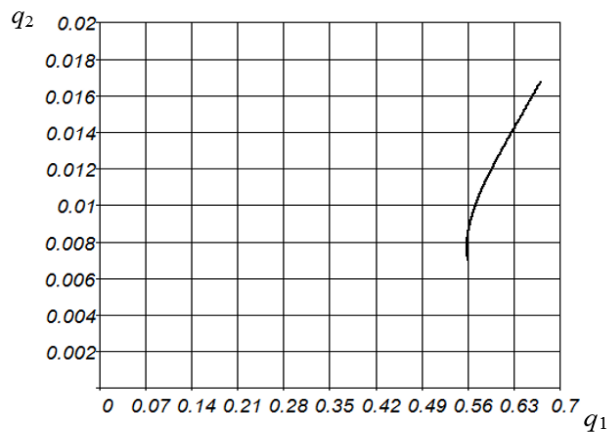


Рис. 2. Линия заданной степени колебательности m для ПИР-регулятора

Проиллюстрируем графики переходных процессов в автоматической системе, полученные в программе MathCad, на основе выше приведенной кривой настройки:

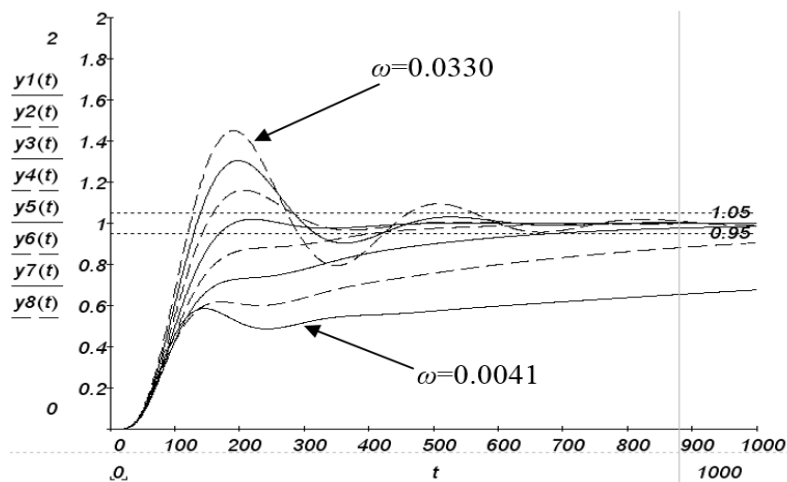


Рис. 3. Переходные процессы с ПИР-регулятором

На рис. 3 видно, что ПИР-регулятор в заданной автоматической системе обеспечивает минимальное время сходимости переходного процесса за время близкое к $4\tau_{об}$, что является допустимым в системах с запаздыванием [1].

Приведём таблицу, содержащую значения настраиваемых параметров и оценки качества переходных процессов, представленных на рис. 3.

Таблица 1. Результаты параметрического синтеза ПИР-регулятора

№	ω	q_1	q_2	q_3	q_4	I	$\sigma, \%$
1	0.0041	0.8000	0.0011	0.1	100	230.1	0
2	0.0083	0.6730	0.0031	0.1	100	141.2	0
3	0.0124	0.6120	0.0054	0.1	100	103.6	0
4	0.0165	0.5880	0.0079	0.1	100	87.8	0
5	0.0206	0.5840	0.011	0.1	100	80.8	3
6	0.0248	0.5930	0.0140	0.1	100	79.0	20
7	0.0289	0.6080	0.0170	0.1	100	82.0	30
8	0.0330	0.6270	0.0210	0.1	100	91.0	45

Заключение. Метод РЧХ позволяет производить параметрический синтез ПИР-регулятора в системе автоматического регулирования объектом с большим запаздыванием. Синтезированные настраиваемые параметры, в некоторых трудных случаях, могут быть использованы как стартовые значения алгоритма автоматической параметрической оптимизации на основе градиентной процедуры. Объем расчётов по методу РЧХ для параметрического синтеза линейных регуляторов, содержащих в своей структуре звено запаздывания, существенно возрастает в сравнении с типовыми ПИ-, ПИД-регуляторами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. М.: Машиностроение. 1974. 328 с.
2. Кулаков Г.Т. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. Минск: Вышэйшая школа. 2017 – 238 с.
3. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. М.: Горячая линия – Телеком. 2009. 608 с.
4. Тихонов О.Н. Автоматизация производственных процессов на обогатительных фабриках. Учебник для вузов. М.: Наука. 1985. 272 с.
5. A. Ramírez, S. Mondié, R Garrido, "Proportional integral retarded control of second order linear systems", 2013 IEEE 52nd Annual Conference on Decision and Control (CDC), 2239-2244.
6. A. Ramírez, R. Garrido, S. Mondié Integral Retarded Control Velocity Control of DC Servomotors //in IFAC TDS Workshop. Grenoble, France. 2013.Pp. 558-563.
7. R. Villafuerte, S. Mondié, R. Garrido, Tuning of Proportional Retarded Controllers: Theory and experiments, IEEE Transactions on Control Systems Technology. May. 2013.
8. A. Ramírez, S. Mondié, R Garrido Integral retarded velocity control of dc servomotors" //11th IFAC Workshop on Time-Delay Systems 46 (3). 558-563.
9. A. Ramírez, S. Mondié, R Garrido Velocity control of servo systems using an integral retarded algorithm //ISA transactions 58. Pp.357-366.
10. Городецкий В.И. Методы теории чувствительности в автоматическом. Л.: Энергия. Ленинградское отделение. 1971. 344 с.
11. Стефани, Е. П. Основы расчёта настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. М.: «Энергия». 1972. 376 с.

12. Марголис Б.И. Программа расчёта настроек регуляторов методом расширенных частотных характеристик // Программные продукты и системы. Тверь: ЗАО «Научно-исследовательский институт «Центрпрограммсистем». 2018. С. 636-639.
13. Марголис Б.И, Мешков И.С. Синтез настроек регуляторов в системах автоматического управления методом расширенных частотных характеристик // Вестник Костромского государственного университета. Кострома: издательство ФГБОУ ВО «Костромской государственной университет». 2014. № 2. С. 31–33.
14. Марголис Б.И, Мешков И.С. Синтез настроек пид-регуляторов в системах автоматического управления альтернативным методом расширенных частотных характеристик // Вестник Костромского государственного университета. Кострома: издательство ФГБОУ ВО «Костромской государственной университет». 2014. № 7. С. 104–106.
15. Луков, Н.М. Автоматические системы управления локомотивов: учебник для студентов вузов железнодорожного транспорта. Москва: Учеб.-методический центр по образованию на ж.-д трансп. 2007. 427с.

UDK 519.711.2

**APPLICATION OF THE EXTENDED FREQUENCY RESPONSE METHOD FOR
PARAMETRIC SYNTHESIS OF
A PROPORTIONAL-INTEGRAL DIFFERENCE CONTROLLER**

Vladimir V. Kulikov

Postgraduate student, e-mail: godefired@mail.ru

Nikolay N. Kutsy

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Institute of Information Technology and Data Analysis,
e-mail: kucyinn@mail.ru,

Irkutsk National Research Technical University,
str. Lermontov, 83, 664074, Irkutsk

Abstract. To improve the quality of transients in automatic systems with lag, a PI controller is used with a delay link that compensates for the integral component of the standard PI controller, which is designated in the technical literature as a proportional-integral difference controller (PIR controller). An important task facing the industrial implementation of this controller is to determine the optimal configurable parameters that deliver an extreme value to the accepted optimality criterion. The presence of a delay in the controller and the object makes it difficult to apply analytical approaches for the parametric synthesis of the control law, which provides transients with acceptable quality. This leads to the use of algorithmic methods. The article shows the application of the extended frequency response (RFC) method for the parametric synthesis of a PIR controller in a single-circuit automatic control system (ASR) by an object with a delay critical for the use of standard regulators. The RFC method allows you to obtain the values of the configurable parameters of the PIR controller, which in some complex cases can be used as the starting points of the gradient procedure. To assess the quality of the transient processes obtained by the RFC method, the overshoot coefficient and the integral quadratic criterion, which are widely used in the practice of automatic control, are used.

Keywords: automatic system, transport delay, stability, PI-controller, PIR-controller, extended frequency characteristics method, proportional-integral difference controller, parametric synthesis

REFERENCES

1. Guretskiy Kh. Analiz i sintez sistem upravleniya s zapazdyvaniyem [Analysis and synthesis of delayed control systems]. Moscow: Mashinostroyeniye = Mechanical engineering. 1974. 328 p. (in Russian).
2. Kulakov G.T., Kulakov A.T., Kravchenko V.V., Kukhorenko A.N. et al. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya teploenergeticheskimi protsessami [The theory of automatic con-

- trol of power energy processes]. Minsk: Vysheishaia shkola = High School. 2017. 238 p. (in Russian).
3. Denisenko. V.V. Kompyuternoye upravleniye tekhnologicheskim protsessom. eksperimentom. oborudovaniyem [Computer control of technological process, experiment, and equipment]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom = Hot line - Telecom. 2009. 608 p. (in Russian).
 4. Tihonov O.N. Avtomatizaciya proizvodstvennyh processov na obogatitel'nyh fabrikah. Uchebnik dlya vuzov [Automation of production processes at processing plants. Textbook for universities]. Moscow: Nauka = Science. 1985. 272 p. (in Russian).
 5. A. Ramírez, S. Mondié, R Garrido Proportional integral retarded control of second order linear systems // 2013 IEEE 52nd Annual Conference on Decision and Control (CDC). Pp. 2239-2244.
 6. A. Ramírez, R. Garrido, S. Mondié Integral Retarded Control Velocity Control of DC Servomotors //in IFAC TDS Workshop. Grenoble, France. 2013.Pp. 558-563.
 7. R. Villafuerte, S. Mondié, R. Garrido, Tuning of Proportional Retarded Controllers: Theory and experiments, IEEE Transactions on Control Systems Technology. May. 2013.
 8. A. Ramírez, S. Mondié, R Garrido Integral retarded velocity control of dc servomotors" //11th IFAC Workshop on Time-Delay Systems 46 (3). 558-563.
 9. A. Ramírez, S. Mondié, R Garrido Velocity control of servo systems using an integral retarded algorithm //ISA transactions 58. Pp.357-366.
 10. Gorodeckij V.I., Zaharin F.M., Rozenvasser E.N., Yusupov R.M. Metody teorii chuvstvitel'nosti v avtomaticheskoy upravlenii [Methods of the theory of sensitivity in automatic control]. L.: Energy = Leningrad: Energy. Leningrad branch. 1971. 343 p. (in Russian).
 11. Stefani E. P. Osnovy raschyota nastroyki regulyatorov teploenergeticheskikh processov [Fundamentals of calculating the settings of heat and power process regulators]. Moscow: Energiya = Energy. 1972. 376 p. (in Russian).
 12. Margolis B.I. Programma rascheta nastroyek regulyatorov metodom rasshirenykh chastotnykh kharakteristik [Program for calculating the settings of the regulators by the method of extended frequency characteristics]. Tver: Programmnyye produkty i sistemy = Software & Systems. 2018. Pp 636-639 (in Russian).
 13. Margolis B.I., Meshkov I.S. Sintez nastroyek regulyatorov v sistemakh avtomaticheskogo upravleniya metodom rasshirenykh chastotnykh kharakteristik [Synthesis of controller settings in automatic control systems by the method of extended frequency characteristics]. Kostroma: Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Kostroma State University. 2014. № 2. Pp 31–33 (in Russian).
 14. Margolis B.I., Meshkov I.S. Sintez nastroyek pid-regulyatorov v sistemakh avtomaticheskogo upravleniya alternativnym metodom rasshirenykh chastotnykh kharakteristik [Synthesis of PID controller settings in automatic control systems by an alternative method of extended frequency characteristics]. Kostroma: Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Kostroma State University. 2014. № 7. Pp. 104–106 (in Russian).
 15. Lukov N.M. Avtomaticheskiye sistemy upravleniya lokomotivov: uchebnik dlya studentov vuzov zheleznodorozhnogo transporta [Automatic locomotive control systems: a textbook for students of railway transport universities]. Moskva: Ucheb.-metodicheskiiy tsentr po obrazovaniyu na zh.-d transp = Educational-methodical center for education on the railway transport. 2007. 343 p. (in Russian).