

# АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОЙ САМОНАСТРОЙКИ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ КОНТРОЛЛЕРОВ

Л.А. Широков, О.Л. Широкова

*Для самонастройки систем регулирования, реализуемых на базе программируемых логических контроллеров и эксплуатируемых непосредственно на промышленных объектах, рассматривается существенно упрощенный алгоритм. Основными достоинствами алгоритма являются упрощение реализации и сокращение потребностей в вычислительных ресурсах. Это достигнуто применением квази-асимптотического подхода при решении вопроса формирования эталонной модели оптимизатора и критериального базиса оптимизации, а также модификации алгоритма Гаусса – Ньютона.*

**Ключевые слова:** автоматическое регулирование, программируемый контроллер, самонастройка, алгоритм, промышленный объект.

## OPTIMAL SELF-TUNING ALGORITHM FOR CONTROL SYSTEM FOR PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLERS

L.A. Shirokov, O.L. Shirokova

*In the article there is considered substantially simplified algorithm for self-tuning control systems implemented on the basis of programmable logic controllers and operated directly at industrial facilities. The main advantages of the algorithm is to simplify the implementation and reduce the need for computational resources. This is achieved by using the quasi-asymptotic approach in addressing the issue of forming the reference model optimizer and the optimization criterion basis, as well as modification of Gauss – Newton algorithm.*

**Keywords:** automatic control, programmable controller, self-tuning algorithm, industrial facility.

### Введение

При внедрении систем регулирования технологических параметров промышленных объектов актуальна задача самонастройки этих систем в режиме *on-line* [1–3]. Широкое применение программируемых логических контроллеров [4, 5] дает возможности решения этой задачи в режиме работы систем регулирования непосредственно на промышленных объектах, т.е. в режиме *on-line*. Однако существенной проблемой для решения этого вопроса является сложность эффективных алгоритмов, необходимость использования значительных вычислительных ресурсов, что проблемно для контроллеров [4, 5]. Вместе с тем, традиционно сложна также задача формирования желаемых качественных показателей регулирования оптимизируемых систем. Известные решения, получаемые с помощью достаточно эффективного подхода

с использованием эталонных моделей [6–8], в ряде случаев затруднительны. Прежде всего, их синтез требует существенных предварительных исследований промышленного объекта. В то же время получение требуемого качества при фиксированном эталоне осложняется нестационарностью характеристик реальных возмущающих воздействий на объекте автоматизации [1, 2]. Для промышленной самонастройки систем регулирования также важное значение имеет применение алгоритмического обеспечения, реализующего беспысковый подход при реализации процессов оптимизации.

Целью статьи является построение алгоритма с использованием анализа чувствительности для самонастройки систем регулирования на промышленных объектах. Применение анализа чувствительности создает возможность беспысковой реализации процессов самонастрой-

ки. Для алгоритма самонастройки решаются вопросы универсализации эталона, критериального базиса параметрической оптимизации, упрощения реализации алгоритма оптимизации Гаусса – Ньютона.

### Структура алгоритма параметрической самонастройки регуляторов

Для самонастройки параметров автоматических регуляторов, представляемых  $m$ -мерным вектором  $\mathbf{q}$  настраиваемых параметров, можно использовать оценку оптимальности  $V$  в виде:

$$V = LF(\boldsymbol{\varepsilon}(t, \mathbf{q})), t \in [t_0; t_f]; \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}(t, \mathbf{q}) = \mathbf{x}(t, \mathbf{q}) - \mathbf{x}_r(t), \quad (2)$$

где  $L$  – интегральный оператор;  $F$  – выпуклая функция;  $\boldsymbol{\varepsilon}(t, \mathbf{q})$  –  $n$ -мерный вектор рассогласования между текущими значениями  $n$ -мерного вектора  $\mathbf{x}(t, \mathbf{q})$  выходных координат (2) и заданными эталонной моделью [3] значениями  $n$ -мерного вектора  $\mathbf{x}_r(t)$  регулируемых координат объекта во времени  $t$ ;  $\mathbf{q}$  –  $m$ -мерный вектор параметров настройки регулятора системы.

Оптимальность параметров регулятора в системе имеет место при минимизации оценки (1). С этой целью будем использовать метод Гаусса – Ньютона [2]:

$$\begin{cases} \mathbf{q}(k+1) = \mathbf{q}(k) + \Delta \mathbf{q}(k); \\ \Delta \mathbf{q} = \mathbf{H}(k) \nabla V(\boldsymbol{\varepsilon}); \\ \nabla V(\boldsymbol{\varepsilon}) = \int_{t_0}^{t_f} \boldsymbol{\Xi}^T(t, \mathbf{q}(k)) \nabla_{\boldsymbol{\varepsilon}} F dt, \end{cases} \quad (3)$$

$$k = 1, 2, \dots,$$

$$\boldsymbol{\Xi} = \left\| \xi_{ij}(t) \right\|_{(m \times n)}, \quad (4)$$

где  $k$  – номер итерации процесса оптимизации;  $\Delta \mathbf{q}(k)$  – приращение вектора параметров настройки регулятора на итерации;  $\boldsymbol{\Xi}$  –  $(n \times m)$ -мерная матрица функций чувствительности  $\xi_{ij}(t) = \frac{\partial x_i(t)}{\partial q_j}$ ;  $\tau$  – символ транспонирования;  $\nabla$  – символ градиента.

Для алгоритма (3) градиент подынтегральной функции имеет вид

$$\nabla_{\boldsymbol{\varepsilon}} F = \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}} = \left( \frac{\partial F}{\partial \varepsilon_1}, \dots, \frac{\partial F}{\partial \varepsilon_n} \right)^T. \quad (5)$$

Выражение для вычисления матрицы Гессе [2] в алгоритме (3) с помощью функций чувствительности представим в виде:

$$\mathbf{H}(k) = \left( \frac{1}{t_f - t_0} \int_{t_0}^{t_f} \boldsymbol{\Xi}^T(t) \frac{\partial \nabla_{\boldsymbol{\varepsilon}} F}{\partial \mathbf{q}} + \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\Xi}_i^{(2)}(t) \frac{\partial F}{\partial \varepsilon_i} dt \right)^{-1}, \quad (6)$$

где  $\boldsymbol{\Xi}_i^{(2)}(t)$  – матрица функций чувствительности второго порядка  $\xi_{ij}^{(2)}(t) = \frac{\partial^2 x}{\partial q_i \partial q_j}$ ;  $n$  – размерность векторов  $\mathbf{x}$  и  $\boldsymbol{\varepsilon}$ .

Для алгоритма (3) при (4)–(6) с учетом связей функций чувствительности [9] можно записать

$$\Delta \mathbf{q}(n) = -\Gamma(n) \mathbf{H}(n) \nabla V(\boldsymbol{\varepsilon}), \quad (7)$$

где  $\Gamma(n) = \left\| \gamma_{ij} \right\|_{(m \times n)}$  – матрица весовых коэффициентов.

Проблема реализации рассматриваемого алгоритма настройки непосредственно на объекте состоит в выборе эталонной модели, оценки оптимальности, матрицы Гессе, значений элементов матрицы  $\Gamma$ , метода анализа функций чувствительности.

При анализе чувствительности будем использовать метод псевдофункций чувствительности [10]. Его важным достоинством является возможность применения в условиях квазистационарных вариаций параметров объектов регулирования фиксированных анализаторов чувствительности, что снимает задачу идентификации этих вариаций, и, следовательно, повышает быстродействие систем адаптации. Важно подчеркнуть, что для общепромышленных объектов регулирования квазистационарность является весьма характерным свойством.

Построение эталонов постоянно обсуждается во многих исследованиях. Ряд подходов к их построению описываются в работах [6, 8]. Однако при нестационарности объектов и возмущений построение эталона проблемно. В работе [7] на основе сформированного критериального базиса предложена реализация эталона по принципу квазиасимптотичности, при котором предложена реализация интегрального управления процессом регулирования в целом. При этом для систем стабилизации достаточно нулевой модели, а для следящих систем – единичной, т.е. вопрос предельно упрощается.

В целях упрощения изложения будем рассматривать модель системы регулирования в виде

$$\sum_{i=0}^{n_p} q_i \frac{d^i x(t)}{dt^i} = \sum_{i=0}^{m_p} b_i \frac{d^i z(t-\tau)}{dt^i}, \quad m_p < n_p, \quad (8)$$

где  $b_i$  и  $q_i$  – параметры системы;  $z(t-\tau)$  – смещенное на время чистого запаздывания  $\tau \geq 0$  внешнее входное воздействие на объект регулирования;  $x$  – регулируемый технологический параметр объекта;  $m_p$  и  $n_p$  – соответственно порядки правой и левой частей дифференциального уравнения объекта регулирования.

Для квадратичной оценки оптимизации при времени переходного процесса регулирования  $t_f$

$$V = \frac{1}{2t_f} \int_0^{t_f} x^2(t) dt, \quad (9)$$

запишем выражение ее вектор-градиента в виде:

$$\nabla V = \frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} \xi^T(t) x(t) dt,$$

где  $\xi(t) = (\xi_1(t), \dots, \xi_m(t))^T$  – вектор чувствительности в соответствии с (4) для случая (8).

Рассматривая (6) до первого слагаемого, что выделяется введением значка «тильда», запишем:

$$\tilde{\mathbf{H}} = \|\tilde{h}_{ij}\|_{(m \times m)}, \quad \tilde{h}_{ij} = \frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} \xi_i(t) \xi_j(t) dt,$$

причем  $\tilde{h}_{ij} = \tilde{h}_{ji}$ ,  $i, j = \overline{1, m}$ .

Для элементов матрицы  $\tilde{\mathbf{H}}$  с четными суммами индексов можно записать:

$$\tilde{h}_{i_1 j_1} = \frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} \xi_{i_1}(t) \xi_{j_1}(t) dt, \quad (10)$$

$$i_1, j_1 \in \overline{1, m}, \quad i_1 + j_1 = 2k, \quad k \in \overline{1, m}.$$

Интегрируя (10) с учетом связей функций чувствительности [9], получим

$$\tilde{h}_{i_1 j_1} = \xi_{i_1}(t) \xi_{j_1-1}(t) \Big|_0^{t_f} - \int_0^{t_f} \xi_{j_1-1}(t) d\xi_{i_1}(t). \quad (11)$$

Принимая во внимание условие устойчивости системы регулирования, уменьшаемое в (11) при  $t_f > t_p$ , где  $t_p$  – фактическое время переходного процесса в системе, можно записать

$$\xi_{i_1}(t) \xi_{j_1-1}(t) \Big|_0^{t_f} \approx 0. \quad (12)$$

При соотношении (12) с учетом связей функций чувствительности [1] представим (11) в виде

$$\tilde{h}_{i_1 j_1} = - \int_0^{t_f} \xi_{i_1+1}(t) \xi_{i_1-1}(t) dt. \quad (13)$$

При циклическом интегрировании (13), аналогично вышеизложенному, пока индексы функций чувствительности не сравняются, получим

$$\tilde{h}_{i_1 j_1} = (-1)^{k_1} \int_0^{t_f} \xi_{i_1+k_1}(t) \xi_{j_1-k_1}(t) dt, \quad (14)$$

$$k_1 = (j_1 - i_1)/2.$$

С учетом соотношений

$$i_1 + k_1 = i_1 - k_1 = (i_1 + j_1) / 2$$

можно записать:

$$\tilde{h}_{i_1 j_1} = (-1)^{k_1} \int_0^{t_f} \xi_{(i_1+j_1)/2}(t) dt. \quad (15)$$

Из полученного можно заключить, что элементы диагоналей матрицы  $\mathbf{\Gamma}(n)$  в (7), параллельных побочной диагонали, равны друг другу по модулю и чередуются по знакам, и элементы главной диагонали положительны.

Для элементов матрицы  $\tilde{\mathbf{H}}$  с нечетными суммами индексов

$$\tilde{h}_{i_2 j_2} = \int_0^{t_f} \xi_{i_2}(t) \xi_{j_2}(t) dt; \quad i_2, j_2 \in \overline{1, m}, \quad (16)$$

$$i_2 + j_2 = 2k + 1, \quad k \in \overline{1, m},$$

интегрируя с учетом связей функций чувствительности [9], получим

$$\tilde{h}_{i_2 j_2} = \xi_{i_2}(t) \xi_{j_2-1}(t) \Big|_0^{t_f} - \int_0^{t_f} \xi_{j_2-1}(t) d\xi_{i_2}(t). \quad (17)$$

Из (17), принимая во внимание (12) и связи функций чувствительности [9], запишем:

$$\tilde{h}_{i_2 j_2} = - \int_0^{t_f} \xi_{i_2+1}(t) \xi_{j_2-1}(t) dt.$$

Повторно интегрируя (17) в цикле, аналогично вышеизложенному, пока индексы функций чувствительности не будут различаться на единицу, получим

$$\tilde{h}_{i_2 j_2} = (-1)^{k_2} \int_0^{t_f} \xi_{i_2+k_2}(t) \xi_{j_2+k_2}(t) dt, \quad (18)$$

где  $k_2 = (j_2 - i_2 - 1)/2$ .

С учетом соотношения

$$i_2 + k_2 = j_2 + k_2 + 1$$

выражение (18) можно представить в виде

$$\tilde{h}_{i_2 j_2} = (-1)^{k_2} \frac{k_2 \xi_{i_2+k_2}^2(t)}{2} \Big|_0^{t_f}. \quad (19)$$

Учитывая (12), для (19) окончательно получим:

$$\tilde{h}_{i_2 j_2} = 0, \quad (20)$$

т.е. элементы диагонали матрицы  $\tilde{\mathbf{H}}$  с нечетными суммами индексов будут нулевыми.

Запишем матрицу, обратную аппроксимированной матрице Гессе  $\tilde{\mathbf{H}}$ , например, для нечетного числа  $m$ . С учетом соотношений (10), (15), (16) и (20) получим:

$$\tilde{\mathbf{H}}^{-1} = \tilde{\mathbf{H}} = \begin{pmatrix} \tilde{h}_{11} & 0 & -\tilde{h}_{22} & \dots & \tilde{h}_{kk} \\ 0 & \tilde{h}_{22} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & -\tilde{h}_{kk} & 0 & \dots & 0 \\ \tilde{h}_{kk} & 0 & -\tilde{h}_{k+1, k+1} & \dots & \tilde{h}_{mm} \end{pmatrix}^{-1}, \quad (21)$$

где  $k = (m + 1)/2$ .

В случае невырожденной квадратной матрицы  $\tilde{\mathbf{H}}$  обратная матрица  $\tilde{\mathbf{H}}^{-1} = \tilde{\mathbf{H}}$  будет единственной:

$$\tilde{\mathbf{H}} = \left\| \frac{H_{ij}}{\tilde{\mathbf{H}}} \right\|^T = \frac{1}{|\tilde{\mathbf{H}}|} \|\tilde{\mathbf{H}}_{ij}\|^T; \quad i, j = \overline{[1, m]};$$

$$\tilde{\mathbf{H}}_{ij} = (-1)^{i+j} M_{ij},$$

где  $\tilde{\mathbf{H}}_{ij}$  – алгебраическое дополнение элементов  $\tilde{h}_{ij}$  матрицы  $\tilde{\mathbf{H}}$ ;  $M_{ij}$  – минор элемента  $\tilde{h}_{ij}$  определителя  $|\tilde{\mathbf{H}}|$  порядка  $m \geq 2$ .

Учитывая структуру матрицы (21), можно заключить, что алгебраические дополнения элементов матрицы (21) с нечетными суммами индексов будут иметь нулевые значения. Следовательно, матрица  $\tilde{\mathbf{H}}$  будет иметь структуру, аналогичную структуре матрицы  $\tilde{\mathbf{H}}$  (21). Матрица  $\tilde{\mathbf{H}}$  дает наилучшее приближение к  $\tilde{\mathbf{H}}^{-1}$  в смысле минимума квадрата сферической нормы

$$N = \|\tilde{\mathbf{H}}^{-1} - \tilde{\mathbf{H}}\|^2,$$

следовательно, полученная матрица  $\tilde{\mathbf{H}}$  будет квазиоптимальной.

При использовании диагональной структуры матрицы  $\Gamma$  в алгоритме (7) для устойчивости процесса настройки следует формировать элементы матрицы  $\Gamma$  по алгоритму векторной коррекции эвристически [10]:

$$\gamma(n) = \gamma(n-1) \times \begin{cases} c_1 \ \& \ n_1 = 1 \ \text{при} \ n_1 = 3 \ \& \ n > 2 \ \& \ V(n) < V(n-1) \\ \ \& \ V(n-1) < V(n-2); \\ \frac{1}{c_2} \ \& \ n_1 = 1 \ \& \ \text{возврат на "пол-шага"} \\ \ \& \ n = \text{const} \ \text{при} \ V(n) > V(n-1); \\ \ \& \ n = \text{const} \ \text{при} \ V(n) > V(n-1); \\ 1 \ \& \ n_1 = n_1 + 1 \ \text{в остальных случаях,} \end{cases}$$

где  $c_1, c_2 > 1$  и  $c_1 > c_2$ ;  $n_1$  – счетчик улучшающих шагов.

На основании вышеизложенного алгоритм оптимизации запишем в виде:

$$\mathbf{q}(n+1) = \mathbf{q}(n) - \Gamma(n) \left( \int_0^{t_f} \text{diag} \Xi^T(t) \Xi(t) dt \right)^{-1} \times \int_0^{t_f} \Xi^T(t) \nabla_{\epsilon} F(t) dt. \quad (22)$$

Достоинство алгоритма (22) состоит в простоте и экономичности реализации. Единственная матрица функций чувствительности используется для вычисления градиента и матрицы ускорения сходимости.

### Исследование функционирования алгоритма системы самонастройки

В качестве примера реализации самонастраивающейся системы рассмотрим широко распространенную общепромышленную систему регулирования с пропорционально-интегральным регулятором применительно к наиболее сложному типу объектов, характеризующихся наличием чистого запаздывания. Систему регулирования представим в виде системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} T \frac{dx(t, \bar{q})}{dt} + x(t, \bar{q}) = k(t) e(t - \tau(t)); \\ u(t, \bar{q}) = - \left( q_1 \int_0^t x(t, \bar{q}) dt + q_2 x(t, \bar{q}) \right); \\ e(t, \bar{q}) = z(t) + u(t, \bar{q}), \end{cases}$$

где  $u$  – управляющее воздействие регулятора;  $\tau$ ,  $T(t)$  и  $k(t)$  – соответственно запаздывание, постоянная времени и коэффициент усиления объекта регулирования, причем  $T(t)$  и  $k(t)$  являются функциями, изменяющимися во времени в квазистационарном режиме.

Особенностью регулируемого объекта является неконтролируемость изменений запаздывания и коэффициента усиления. Эти изменения приводят к существенным отклонениям качественных показателей процессов регулирования и, в том числе, к потере устойчивости всей системы.

Задачей системы самонастройки является оптимизация настройки регулятора для обеспечения в новых условиях наилучшего качества регулирования при изменениях параметров объекта без процедуры их идентификации. Полученные результаты иллюстрируют графики, приведенные на рис. 1.

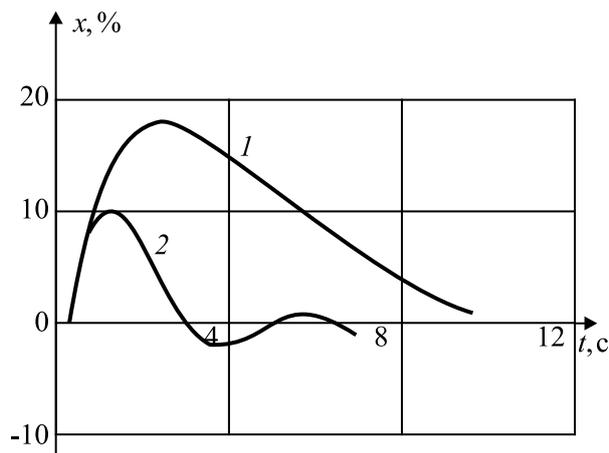
На рисунке 1 график 1 отображает переходный процесс для объекта при запаздывании 0,3 с, но при настройках регулятора, оптимизированных для объекта, имевшего ранее запаздывания  $\tau = 1$  с. В результате, естественно, процесс регулирования резко ухудшается. График 1 имеет по отношению к оптимальному почти вдвое большую динамическую ошибку, т.е. первую амплитуду, и более чем в три раза увеличенное время регулирования. После включения системы самонастройки при новых параметрах объекта, которые предварительно не идентифицируются, регулятор перестраивается и результирующий переходный процесс (кривая 2) вновь приобретает оптимальные характеристики.

На рисунке 2 приведены процессы регулирования в адаптивной системе при вариациях коэффициента усиления объекта. При увеличении коэффициента усиления объекта до  $k = 2$  в системе регулирования, исходно оптимально настроенной для значения  $k = 1$ , процесс регулирования, представленный кривой 1, становится расходящимся. После же самонастройки в системе определяются новые параметры регулятора и вновь обеспечивается высокое качество регулирования.

Таким образом, система самонастройки эффективно функционирует для наиболее сложного класса объектов регулирования – объектов с чистым запаздыванием, относящихся к классу неминимально-фазовых. В обоих рассмотренных примерах процессы настройки заканчиваются за 8-10 итераций.

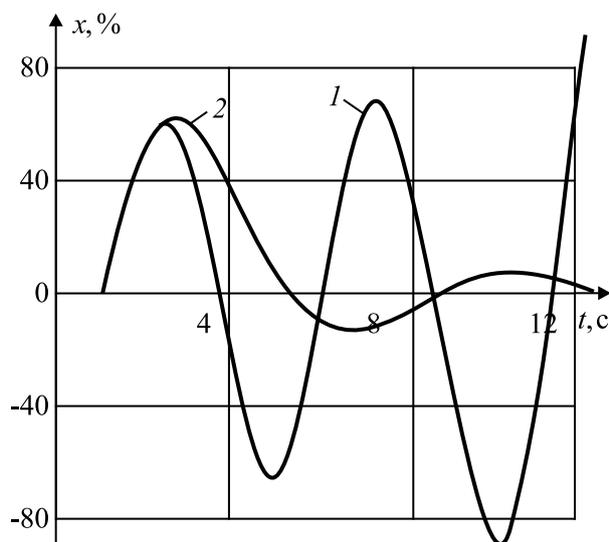
### Заключение

В статье сформирован беспоисковый алгоритм оптимизации для самонастройки систем регулирования промышленных объектов в режиме *on-line*. Алгоритм ориентирован на применение в качестве программного обеспечения программируемых логических контроллеров. Эффективность его функционирования обеспечивается беспоисковостью процессов самонастройки за счет использования анализа чувствительности. Сокращение необходимых вычислительных ресурсов для реализации алгоритма достигнуто за счет формирования эталона на основе применения квазиасимптотического управления качеством процессов регулирования, что одновременно позволило решить вопрос о выборе оценки качества для критерия оптимизации. Применение псевдо-



**Рис. 1. Переходные процессы системы регулирования:**

1 – при изменении запаздывания объекта от  $\tau = 1$  с до  $\tau = 0,3$  с без самонастройки; 2 – оптимальный процесс в системе регулирования после самонастройки для нового значения запаздывания



**Рис. 2. Переходные процессы системы регулирования:**

1 – при изменении коэффициента усиления объекта от  $k = 1$  до  $k = 2$  без самонастройки; 2 – оптимальный процесс в системе регулирования после самонастройки для нового значения коэффициента усиления

функций чувствительности позволило проводить процессы адаптации без идентификации квазистационарных вариаций параметров объектов регулирования. Изложенная в работе модификация алгоритма Гаусса – Ньютона позволила упростить его реализацию и одновременно сократила потребности в вычислительных ресурсах. Проведенное моделирование процессов самонастройки в системе регули-

рования подтвердило эффективность алгоритма и его применимость для самонастройки в условиях изменений во времени параметров объекта.

### Список литературы

1. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы. М.: Электронная книга. М., 2003. – 278 с.
2. Черноуцкий И.Г. Методы оптимизации в теории управления. СПб.: Питер, 2004. – 256 с.
3. Александров А.Г. Адаптивное управление с эталонной моделью при внешних возмущениях // Автоматика и телемеханика. 2004. № 5. С. 77-90.
4. Парк Дж., Маккуй Ст., Райт Эд. Передача данных в системах контроля и управления. М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 480 с.
5. Технические средства автоматизации. Программно-технические комплексы и контроллеры / И.А. Елизаров, Ю.Ф. Мартмянов, А.Г. Схиртладзе, С.В. Фролов. М.: Машиностроение. 2004. – 126 с.
6. Бронников А.М., Буков В.Н. Условия точного слежения выхода линейной системы за эталонной моделью пониженного порядка // Автоматика и телемеханика. 2008. № 3. С. 60-69.
7. Широков Л.А. Квазиасимптотическое управление качеством регулирования при автоматической оптимизации и адаптации систем регулирования // Машиностроение и инженерное образование. 2015. № 3. С. 2-8.
8. Щедринов А.В., Феденко С.В. Адаптивная система управления с идентификатором и неявной эталонной моделью // Автоматизация и современные технологии. 2006. № 3. С. 8-11.
9. Широков Л.А. Синтез компактов чувствительности для автоматизации параметрического проектирования линейных систем регулирования // Машиностроение и инженерное образование. 2008. № 3. С. 22-29.
10. Рутман Р.С., Сергеев В.И., Широков Л.А. Алгоритм беспойсковой самонастройки с помощью псевдофункций чувствительности // Сб. «Автоматизация научных исследований в машиностроении и приборостроении». 1971. С. 3–17.

Материал поступил в редакцию 21.07.2015

#### ШИРОКОВ Лев Алексеевич

E-mail: [eduarlev@gmail.com](mailto:eduarlev@gmail.com)  
Тел.: (962) 964-36-48

Доктор технических наук, профессор Национального исследовательского университета «Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ). Академик Международной академии информатизации, член-корреспондент Российской академии естественных наук, изобретатель СССР. Сфера научных интересов – теория систем и системный анализ, оптимальное управление, САПР, информационные технологии, интегрированные АСУ. Автор более 150 научных трудов, включая три монографии.

#### ШИРОКОВА Ольга Львовна

E-mail: [ol.shirokova@gmail.com](mailto:ol.shirokova@gmail.com)  
Тел.: (903) 135-47-61

Кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры информатики и прикладной математики НИУ МГСУ. Сфера научных интересов – информационные технологии и системы, методы оптимизации, математические методы в экономике, автоматические системы контроля и управления. Автор 30 научных трудов.