

УДК 517.987

КВАЗИАСИМПТОТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ И АДАПТАЦИИ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Л.А. Широков

В статье рассмотрено построение эффективных алгоритмов автоматической итеративной оптимизации систем автоматического регулирования (САР), в которых снята сложная проблема формирования структур и параметров эталонных моделей. Решение основано на предложенной методологии квазиасимптотического управления для обеспечения качества процессов в САР при их структурно-параметрической оптимизации и адаптации. Ее суть заключается в применении интегрального управления процессом регулирования в целом путем приближения его конфигурации к некоторой квазиасимптоте, определяющей характер затухания переходного процесса в САР. Основная функция по управлению качественными показателями переходного процесса регулирования возлагается на трансформированный критерий оптимизации. Исследована эффективность формирования процессов регулирования при квазиасимптотическом управлении показателями качества на основе алгоритма оптимизации ньютоновского типа с идеальной эталонной моделью. На конкретном примере иллюстрируется высокая эффективность применения предложенного подхода при оптимизации САР объекта регулирования с чистым запаздыванием.

Ключевые слова: система автоматического регулирования, эталонная модель, оптимизация, структурный, параметрический синтез, качество переходного процесса.

QUASIASYMPTOTIC MANAGEMENT OF CONTROL OF QUALITY IN AUTOMATIC OPTIMIZATION AND ADAPTATION OF CONTROL SYSTEMS

L.A. Shirokov

In the article, the construction of efficient algorithms for automatic iterative optimization of automatic control systems (ACS) is considered, in which the complex problem of formation of structures and parameters of reference models removed. The solution is based on the proposed methodology of quasi-asymptotic management to ensure the quality of processes in the ACS when structurally and parametrically optimized and adapted. Its essence is in the application of the integrated management of the control process as a whole by bringing it closer to a quasi-asymptotic configuration, defining the nature of the attenuation of the transition process in the ACS. The main function of quality indicators management of transient control process rests with the transformed optimization criterion. The effectiveness of the control process in the form of quasi-asymptotic management by quality indicators based on the Newton-type optimization algorithm with an ideal reference model is investigated. A particular example illustrates the high efficiency of the proposed approach in the optimization of the ACS object control with pure delay.

Keywords: automatic control system, reference model, optimization, structural, parametric synthesis, quality of the transition process.

Введение

При проектировании различных классов оптимальных и адаптивных систем управления [1, 2] важное значение имеют различные эталонные модели. Их структура и параметры определяются структурно-параметрическими особенностями объектов управления, применяемыми автоматическими устройствами, характеристиками и параметрами внешних воздействий на объект управления. Например, в работе [3] рассмотрен метод построения адаптивного управления в системах с эталонной моделью, к объектам которых приложено неизвестное ограниченное внешнее возмущение в виде суммы неограниченного числа гармоник. Это адаптивное управление обеспечивает заданную точность слежения выхода объекта за выходом эталонной модели. В работе [4] рассмотрены системы автоматического управления динамическими объектами широкого класса с неизвестными переменными параметрами и неконтролируемыми возмущениями. Предложена адаптивная система управления с идентификатором и неявной эталонной моделью. В результате упрощены условия и сокращено время достижения адаптации замкнутой системы управления, а также расширены области ее применения.

В работе [5] представлена методика формирования алгоритма параметрической оптимизации при применении улучшенных интегральных критериев качества. Показана возможность использования эталонной модели. Приведены результаты исследования алгоритма параметрической оптимизации применительно к системам с широтно-импульсной модуляцией.

Условия точного слежения выхода линейной системы за эталонной моделью пониженного порядка сформированы в работе [6], в которой рассмотрена задача точного слежения выхода линейной стационарной системы, представленной в пространстве состояний, за эталонной моделью пониженного порядка по сравнению с размерностью вектора состояния системы.

Задаче синтеза робастных алгоритмов для систем управления априорно неопределенно неустойчивыми нелинейными скалярными объектами с использованием стационарного наблюдателя Льюенбергера и малоинерционной явно-неявной эталонной модели посвящена работа [7], в которой рассмотрено робастное управление нелинейным объектом со стацио-

нарным наблюдателем и быстродействующей эталонной моделью.

В работе [8] рассмотрены свойства адаптивных систем управления, синтезированных методом вектора скорости. Показано, что системы отличаются разнотемповой динамикой процессов, так как содержат эталонную модель, «быстрый» адаптор и фильтр оценки производных. Выполнен анализ влияния параметров эталонной модели на свойства систем с сигнальной и сигнально-параметрической адаптацией. Определены наиболее значимые с точки зрения влияния на управление параметры системы и даны рекомендации по их выбору с учетом ограничений на управляющее воздействие.

В работе [9] предлагается при синтезе системы управления скалярным нелинейным объектом с запаздыванием использовать стационарный наблюдатель полного порядка и быстродействующую явно-неявную эталонную модель (БЭМ). Показано, что применение БЭМ повышает эффективность оценок переменных состояния и допускает упрощение технической реализации эталона.

Эффективность, точность и оптимальность функционирования системы автоматического регулирования (САР) весьма важна в машиностроительном производстве, которое характеризуется высокими требованиями к качеству реализации различных технологических процессов. Это во многом определяет качество выпускаемой продукции, снижает расходы материалов, приводит к экономии различных видов энергетических потоков.

Среди технологических процессов, в которых широко применяются различные виды САР, можно выделить производства конструкционных материалов, к которым относятся черные и цветные металлы и сплавы, порошковые и композиционные материалы; производство заготовок методами литья и пластического деформирования; процессы термической обработки комплектующих изделий и заготовок; производства, в которых выполняются различные работы по лакокрасочным покрытиям изделий, производства деталей из неметаллических материалов и металлических порошков и т.п.

Целью статьи является разработка методологии решения проблемы эталонных моделей для различных САР, использование которой, во-первых, освобождало бы проектировщиков систем автоматизации технологических про-

цессов как от структурного, так и от параметрического синтеза этих моделей, а во-вторых, упрощало бы саму реализацию алгоритмов оптимизации.

Постановка задачи

В градиентных итеративных алгоритмах оптимизации систем автоматического регулирования (САР) желаемый характер переходного процесса регулирования формируется эталонной моделью. В этом случае при оптимизации минимизируется рассогласование $\varepsilon(t, \mathbf{q})$ между переходным процессом САР $x(t, \mathbf{q})$, определяющим отклонение технологического параметра от заданного значения, и процессом $x_r(t)$, задаваемым моделью

$$\varepsilon(t, \mathbf{q}) = x(t, \mathbf{q}) - x_r(t), \quad (1)$$

где $\mathbf{q}$ – m -мерный вектор оптимизируемых параметров настройки регулятора в САР.

Оценку оптимальности в алгоритме примем в виде

$$V = \frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} F(\varepsilon(t, \mathbf{q})) dt, \quad (2)$$

где F – нелинейная функция (например, квадратичная или модульная); t_f – время переходного процесса регулирования.

Правильный выбор эталонной модели определяет результат оптимизации. Однако выбор ее – проблемная задача. Неудачно построенная эталонная модель будет предъявлять к системе невыполнимые требования по каким-либо показателям, что в целом приведет к ухудшению качества регулирования. С другой стороны, модель может задавать явно заниженные при данной структуре САР и параметрах объекта требования, что не позволит при настройке в полной мере использовать возможности САР. В ряде случаев оптимизации промышленных САР, например, многоконтурных, многосвязных, в алгоритмах адаптации [10] при параметрической и структурной нестационарности объектов регулирования построение эталонной модели чрезвычайно затруднительно.

В целях упрощения задачи на практике часто применяют эталонную модель (порядок дифференциального уравнения которой не выше второго), представляющей колебательное звено. Это упрощает реализацию эталонной модели и облегчает выбор ее параметров.

Но, тем не менее, возникает вопрос разработки методики определения параметров, т.е. собственной частоты и коэффициента затухания модели. В неминимально-фазовых объектах высокого порядка, характеризующихся наличием чистого запаздывания, эталонная модель типа колебательного звена может компенсировать запаздывание путем соответствующего выбора собственной частоты. Но в этом случае имеют место достаточно жесткие ограничения на допустимый частотный спектр входного воздействия.

Следовательно, проблемы формирования эталонных моделей требуют проведения дальнейших исследований по их решению.

Методология квазиасимптотического управления качеством процессов САР при структурно-параметрической оптимизации и адаптации

С целью решения проблемы построения эталонных моделей рассмотрим методологию, основанную на применении квазиасимптотического подхода. Его суть заключается в том, что для управления качеством переходных процессов регулирования в САР вместо выделения отдельных параметров качества регулирования предлагается реализация интегрального управления процессом регулирования в целом путем приближения его конфигурации к некоторой квазиасимптоте, определяющей характер затухания переходного процесса в САР. Понятие квазиасимптотичности подчеркивает тот факт, что в методологии не формируется какая-либо конкретная асимптота, а обозначается только принцип, который автоматически реализуется в процессах автоматической структурно-параметрической оптимизации или адаптации САР.

Для обоснования методологии рассмотрим характеристику результата автоматической структурно-параметрической оптимизации САР по беспойсковому градиентному алгоритму Ньютона с использованием анализа чувствительности [11]

$$U = U(B_1, B_2, B_3); \quad (3)$$

$$B_1 = B_1(V(\varepsilon(t, \mathbf{q}))), \quad B_2 = B_2(G_r(p));$$

$$B_3 = B_3(G_{as}(p)), \quad p = \frac{d}{dt},$$

где B_i ($i=1,2,3$) – факторы оптимизации, характеризующие соответственно критерием

оптимизации V , эталонной моделью G_r и анализатором чувствительности G_{as} .

Характеристику (3) оценим нормой N :

$$N(U) = \|U(B_1, B_2, B_3)\|. \quad (4)$$

Пусть оператор эталонной модели $G_r(P)$ изменен на $\Delta G_r(P)$. Тогда

$$\tilde{G}_r(p) = G_r(p) \oplus \Delta G_r(p), \quad (5)$$

где $\oplus$ – символ операторного суммирования, обозначающий в рассматриваемом случае варьирование.

В этом случае для (3) измененное значение фактора эталонной модели B_2 можно представить в следующем виде:

$$\tilde{B}_2(G_r(p)) = B_2(G_r(p)) + B_2(\Delta G_r(p)). \quad (6)$$

Обозначив

$$\tilde{N}(U_{B_2}) = \|U(B_1, \tilde{B}_2, B_3)\|;$$

$$\Delta N(\Delta U_{B_2}) = \|\Delta U(B_1, \Delta B_2, B_3)\|,$$

запишем эту норму при изменении фактора B_2 в (6):

$$N(\tilde{U}_{B_2}) = N(U) + \Delta N(\Delta U_{B_2}). \quad (7)$$

С другой стороны, при вариации критерия оптимизации V изменение фактора B_1 алгоритма (6) можно записать в следующем виде:

$$\tilde{B}_1(V(\varepsilon(t, \mathbf{q}))) = B_1(V(\varepsilon(t, \mathbf{q}))) + \Delta B_1(\Delta V(\varepsilon(t, \mathbf{q}))). \quad (8)$$

Обозначив

$$\tilde{N}(U_{B_1}) = \|U(\tilde{B}_1, B_2, B_3)\|;$$

$$\Delta N(\Delta U_{B_1}) = \|\Delta U(\Delta B_1, B_2, B_3)\|,$$

запишем норму при изменении фактора B_1 в (8):

$$\tilde{N}(U_{B_1}) = N(U) + \Delta N(\Delta U_{B_1}). \quad (9)$$

Составим разность, которая с учетом (7) и (9) примет вид:

$$\tilde{N}(U_{B_2}) - \tilde{N}(U_{B_1}) = \Delta N(\Delta U_{B_2B_1}); \quad (10)$$

$$\Delta N(\Delta U_{B_2B_1}) = \Delta N(\Delta U_{B_2}) - \Delta N(\Delta U_{B_2B_1}).$$

Учитывая вышеизложенное и основываясь на неортогональности факторов B_2 и B_1 , сформируем следующую задачу минимизации: для измененного оператора эталонной модели G_r определить соответствующее изменение оценки качества V из условия

$$\begin{aligned} \Delta N(\Delta U_{B_2B_1}) &= \min \Delta N(\Delta U_{B_2B_1}); \\ B_1(V(\varepsilon(t, \mathbf{q}))) &\in D_{B_1}. \end{aligned} \quad (11)$$

Практически задачу можно считать решенной, если

$$|\Delta N(\Delta U_{B_2B_1})| \leq \varepsilon_M, \quad (12)$$

где ε_M – заданное положительное число.

На основе предложенного подхода рассмотрим возможность применения идеальной эталонной модели $G_{r,id}$. Для систем стабилизации ее можно записать в виде:

$$G_{r,id}(p) = 0. \quad (13)$$

Это означает, что принимается нулевая эталонная модель, т.е. фактически эталонная модель отсутствует, и, следовательно

$$\varepsilon(t, \mathbf{q}) = x(t, \mathbf{q}).$$

Для систем воспроизведения соответственно принимаем модель

$$G_{r,id}(p) = 1. \quad (14)$$

Далее для простоты изложения будем рассматривать системы стабилизации (для систем воспроизведения существо методологии аналогично).

Идеальная эталонная модель (13) или (14) обеспечивает важные преимущества. Во-первых, снимается задача структурного и параметрического синтеза эталонной модели; во-вторых, упрощается реализация алгоритма оптимизации. Однако у предложенной методологии имеются и недостатки. При идеализации эталонной модели теряются задания по отдельным показателям качества переходного процесса регулирования: динамической ошибке, перерегулированию, времени регулирования. Это вызывает существенное изменение характеристики результата оптимизации (3) и соответственно нормы (4). Но согласно (11) можно осуществить необходимую компенсацию результата изменением критерия оптимизации по (8). Целесообразно трансформировать критерий оптимизации (2) в направлении компенсации указанного недостатка идеальной эталонной модели. С этой целью введем в оценку качества фактор взвешивания переходного процесса регулирования по времени в виде:

$$V_w = \frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} F_w(F(x(t, \mathbf{q}), F_t(t))) dt, \quad (15)$$

где $F_t(t)$ – функция времени, назначение которой акцентировать отклонения на после-

довательных участках переходного процесса регулирования, которую в дальнейшем будем называть весовой функцией. Именно она формирует виртуальную квазиасимптоту, определяющую степень затухания переходного процесса регулирования в САР.

Беспоисковый градиентный алгоритм оптимизации Ньютона с использованием функций чувствительности с идеальной эталонной моделью можно записать в виде:

$$\mathbf{q}(n+1) = \mathbf{q}(n) - \left(\int_0^{t_f} \xi(t) \frac{\partial F_w(t)}{\partial \mathbf{q}} dt + \Xi^{(2)}(t) \nabla_x F_w(t) dt \right)^{-1} \times \int_0^{t_f} \xi^T(t) \nabla_x F_w(t) dt, \quad (16)$$

где $\xi(t) = \frac{\partial x(t)}{\partial \mathbf{q}}$ – вектор-строка функций чувствительности; $\Xi^{(2)}(t)$ – матрица функций чувствительности второго порядка, вычисление которых показано в работе [11].

В качестве весовых функций $F_i(t)$ будем использовать функции, обеспечивающие последовательное взвешивание отклонений процесса САР во времени. Выбор конкретного вида функции определяется требованиями к характеру затухания переходного процесса регулирования и простоте реализации в алгоритме оптимизации. Примем функцию $F_i(t)$ в виде:

$$F_i(t) = \left(\frac{t}{t_f} \right)^{\ell_i}, \quad (17)$$

где ℓ_i – показатель степени, положительное целое число, значение которого определяет кривизну виртуальной квазиасимптоты и, в результате, интенсивность затухания переходного процесса в САР.

Введение в критерий оптимизации весового множителя во времени существенно деформирует подынтегральную функцию и при квадратичной, и при модульной оценке оптимизации. В результате возрастает вес поздней ошибки относительно начальной. Следовательно, введение в подынтегральное выражение оценки качества весовых функций открывает возможность синтеза алгоритмов оптимизации систем регулирования с идеальной эталонной моделью. В этих алгоритмах критерий оптимизации используется как для минимизации ошибки регулирования, так и для формирования качества процесса регулирования.

Исследование эффективности формирования показателей качества процессов регулирования при квазиасимптотическом управлении качеством

Алгоритм оптимизации с идеальной эталонной моделью ньютоновского типа запишем в виде:

$$\mathbf{q}(n+1) = \mathbf{q}(n) - Y_r(n) \mathbf{H}^{-1}(x(t), F_i) \nabla V(x(t), F_i), \quad (18)$$

где $\nabla V = \partial V / \partial \mathbf{q}$ – градиент оценки качества; $\mathbf{H} = \nabla^2 V = \partial(\nabla V^T) / \partial \mathbf{q}$ – матрица Гессе; $Y_r(n) = Y(n) \left(\left\| (\nabla^2 V(\cdot))^{-1} \nabla V(\cdot) \right\| \right)^{-1}$ – варьируемые весовые коэффициенты.

Итеративный процесс оптимизации заканчивается при выполнении условия останова:

$$\nabla V(x(t)) < \varepsilon_v, \quad (19)$$

где ε_v – заданное значение.

Рассмотрим САР, включающую широко распространенный в практике автоматизации неминимально-фазовый объект, описываемый оператором

$$G_p(p) = K_p ((1 + pT_1)(1 + pT_2))^{-1} \exp(-p\tau), \quad (20)$$

и непрерывный пропорционально-интегральный регулятор с оператором

$$G_c(p) = q_1 + q_2 p^{-1},$$

где K_p – коэффициент передачи объекта; T_i – постоянная времени i -го звена ($i = 1, 2$).

Для определенности примем в (20) $T_2 \geq T_1$ и диапазон изменения параметров $\tau/T_2 \in [0, 1; 2, 0]$, рекомендуемый для использования непрерывных законов регулирования [12, 13].

Для алгоритма оптимизации с идеальной эталонной моделью примем критерий с введенной в подынтегральную функцию весовой функцией в соответствии с (17). Рассмотрим влияние изменений показателя степени ℓ_i в весовом множителе на значение перерегулирования переходных процессов в САР

$$V_p = (x_{a2}/x_{a1}) \cdot 100 \quad (21)$$

и степень их затухания

$$\psi = (x_{a1} - x_{a3}) / x_{a1}. \quad (22)$$

Исследования проведем для ℓ_i из области, представляющей диапазон рассматриваемых значений, $D_i \in [1, 2, \dots, 10]$.

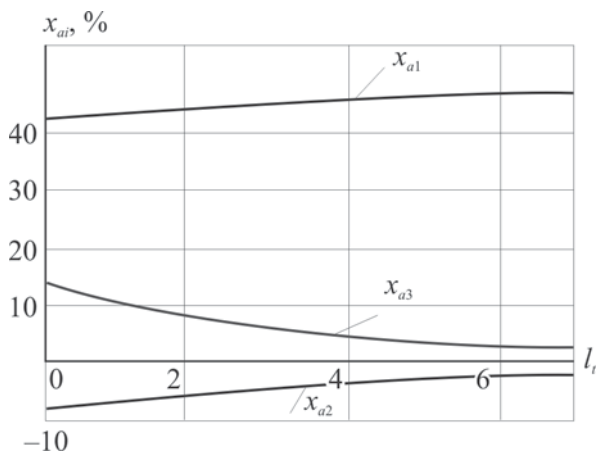


Рис. 1. Зависимости первых трех амплитуд (x_{a1} , x_{a2} , x_{a3}) оптимальных переходных процессов

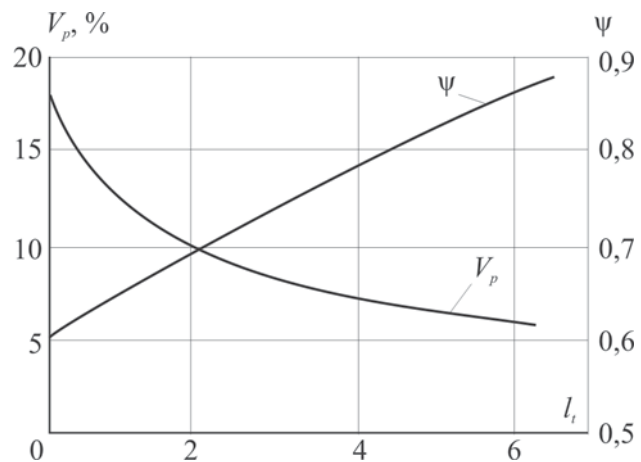


Рис. 2. Зависимости перерегулирования V_p и степени затухания ψ

Результаты параметрической оптимизации САР приведены на рис. 1 в виде графиков зависимостей первых трех амплитуд, полученных переходных процессов, и на рис. 2 – в виде графиков зависимостей перерегулирования V_p и степени затухания ψ при различных l_t . На рисунке 1 видно, что при увеличении значения весового коэффициента первая амплитуда x_{a1} переходного процесса увеличивается, а вторая и третья (x_{a2} и x_{a3}) – уменьшаются. Одновременно увеличивается степень затухания ψ и уменьшается перерегулирование V_p (рис. 2). Это означает, что с увеличением l_t процессы регулирования имеют более интенсивное затухание. Сходимость процессов беспойсковой градиентной оптимизации по алгоритму Ньютона при различных начальных значениях параметров настройки регулятора обеспечивается за 8–14 итераций.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что весовой коэффициент l_t в алгоритме с идеальной эталонной моделью позволяет при беспойсковой градиентной оптимизации успешно управлять показателями качества переходных процессов регулирования в САР.

Заключение

Предложенное построение алгоритмов оптимизации для решения задачи автоматической параметрической оптимизации систем регулирования с использованием идеальной эталонной модели создает возможность ква-

зиасимптотического управления качеством процессов в САР. Реализация рассмотренной методологии создает ряд преимуществ. Во-первых, снимается проблема синтеза эталонных моделей. Это освобождает проектировщиков систем автоматизации технологических процессов как от структурного, так и от параметрического их синтеза. Во-вторых, упрощается реализация алгоритмов оптимизации. Действительно, блок эталонной модели в алгоритмах параметрической оптимизации САР или адаптации фактически отсутствует. Проведенные исследования подтвердили эффективность введения в оценку оптимизации весовой функций времени для формирования качества переходных процессов регулирования.

Список литературы

1. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы М.: Электронная книга. 2003. – 278 с.
2. Liptak B.G. Instrument Engineers' Handbook: Process control and optimization. Boca Raton, FL: CRC Pres, 2006. – 2304 p.
3. Александров А.Г. Адаптивное управление с эталонной моделью при внешних возмущениях // Автоматика и телемеханика. 2004. № 5. С. 77–90.
4. Щедрин А.В., Феденко С.В. Адаптивная система управления с идентификатором и неявной эталонной моделью // Автоматизация и современные технологии. 2006. № 3. С. 8–11.

5. Куцый Н.Н., Усталков М.В. Применение эталонных моделей при параметрической оптимизации автоматических систем с широкоимпульсной модуляцией // Известия вузов. Электромеханика. 2007. № 1. С. 44–47.
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. Еремин Е.Л., Кван Н.В., Семичевская Н.П. Робастное управление нелинейным объектом со стационарным наблюдателем и быстродействующей эталонной моделью // Информатика и системы управления. 2008. № 4. С. 122–130.
8. Шпилева О.Я. Формирование управляющих воздействий в системах прямого адаптивного управления // Автометрия. 2009. Т. 45. № 5. С. 94–103.
9. Семичевская Н.П. Робастное управление нелинейным объектом с запаздыванием, быстрый эталонной моделью и наблюдателем // Вестник Амурского государственного университета. 2009. Вып. 47. Сер. Естеств. и экон. науки. С. 39–42.
10. Черноруцкий И.Г. Методы оптимизации в теории управления. СПб.: Питер. 2004. – 256 с.
11. Широков Л.А. Синтез компактов чувствительности для автоматизации параметрического проектирования линейных систем регулирования // Машиностроение и инженерное образование. 2008. № 3. С. 22–29.
12. Ключев А.С. и др. Проектирование систем автоматизации технологических процессов: справочное пособие. М.: Энергоатомиздат. 1990 г. – 464 с.
13. Petrkov N. A new approach for adaptive tuning of PI controllers. Application in cascade systems // Inf. Technol. and Contr. 2008. Vol. 6. No. 1. P. 19–26.

Материал поступил в редакцию 11.05.15

ШИРОКОВ Лев Алексеевич

E-mail: eduarlev@gmail.com
Тел.: 8 (962) 964-36-48

Доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматики и управления в технических системах» МГИУ, академик Международной академии информатизации, член-корреспондент Российской академии естественных наук, изобретатель СССР. Сфера научных интересов: теория систем и системного анализа, оптимального управления, САПР, информационных технологий, интегрированных АСУ. Автор трех монографий, более 150 научных статей.