

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ БЕСПОИСКОВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПО МОДИФИЦИРОВАННОМУ АЛГОРИТМУ ГАУССА – НЬЮТОНА

Л.А. Широков, П.Д. Челышков, О.Л. Широкова

Для беспоисковой автоматической параметрической оптимизации систем регулирования, реализуемых в среде программируемых логических контроллеров, рассматривается вопрос модификации алгоритма Гаусса – Ньютона с целью упрощения его реализации в системе оптимизации. Сформированы модели составных компонентов для беспоисковой системы оптимизации систем автоматического регулирования технологических процессов. Управление показателями качества процессов в системах регулирования реализовано на основе квазиасимптотического подхода. Его применение фактически снимает проблему создания эталонной модели. Синтезирована система автоматической оптимизации, реализация которой значительно упрощается. Кроме того, уменьшается потребность в вычислительных ресурсах по объему памяти и процессорному времени для оптимизации. Это особенно важно при использовании в системах управления программируемых логических контроллеров. Проведенное моделирование работы сгенерированного алгоритма автоматической оптимизации систем регулирования для конкретного объекта подтвердило его высокую эффективность.

Ключевые слова: система регулирования, оптимизация, алгоритм, модификация, оценки оптимальности, программируемый логический контроллер.

MODELING THE NON-SEARCH OPTIMIZATION SYSTEM FOR AUTOMATIC CONTROL SYSTEM PARAMETERS WITH THE MODIFIED GAUSS – NEWTON ALGORITHMUS

L.A. Shirokov, P.D. Chelishkov, O.L. Shirokova

Modification of the Gauss – Newton algorithm is considered for simplification its implementation for non-search automated parametric optimization of control systems based on programmable logic controllers. Component models of non-search optimization systems for technological automatic control systems. Management of quality processes indicators in the control system is implemented on the basis of quasi-asymptotic approach. This allows you to avoid the problem of reference model synthesis. The automatic optimization system is synthesized, implementation of which is greatly simplified. Computing resources (memory and time) requirements for optimization process are reduced. This is especially important when programmable logic controllers are used in control systems. Simulation of the generated algorithm for automatically optimizing the control systems for a particular object confirmed its high efficiency.

Keywords: control system, optimization, algorithm, modification, evaluation of optimality, a programmable logic controller.

Введение

Для интенсификации технологических процессов, повышения эффективности использования различных видов сырья, энергетических ресурсов в машиностроении, строительной индустрии, в электроэнергетике, химической и нефтехимической, легкой и других отраслях промышленности необходимы системы оптимального автоматического регулирования [1, 2]. Для оптимизации процессов наиболее эффективно использование реальных условий функционирования технологических объектов. Такие возможности предоставляются программируемыми логическими контроллерами, которые при современном уровне научно-технического прогресса наиболее широко применяются для реализации проектов автоматизации. Использование их вычислительной базы создает широкие возможности для выполнения оптимизационных процедур применительно к системам автоматического регулирования в режиме *on-line*. В этом направлении весьма эффективны беспоисковые алгоритмы оптимизации, в том числе и беспоисковый алгоритм Гаусса – Ньютона [1, 2]. Его преимущество состоит в отсутствии пробных поисковых вариаций параметров настройки регуляторов для вычисления векторов-градиентов. Реализация поисковых вариаций параметров, во-первых, предусматривает применение дополнительных аппаратных средств для их выполнения, а также соответствующего программного обеспечения; во-вторых, с введением поисковых вариаций нарушается нормальное течение технологических процессов, что приводит к снижению качества их выполнения и материальным потерям. Применение беспоискового алгоритма Гаусса – Ньютона позволяет избежать этих проблем, однако трудности его применения для рассматриваемой задачи связаны с потребностями в значительных вычислительных ресурсах при определении вектора-градиента для выполнения оптимизационных процедур. Это, в свою очередь, во-первых, усложняет реализацию системы оптимизации, а, во-вторых, требует более значительных временных затрат для достижения оптимальных настроек систем автоматического регулирования.

Целью работы является синтез беспоискового алгоритма автоматической параметрической оптимизации систем регулирования на основе модифицируемого метода Гаусса – Ньютона для снижения потребностей в аппаратных ресур-

сах, используемых программируемых логических контроллеров и снижения временных затрат на оптимизационные операции. В синтезируемой системе реализовано формирование показателей качества процессов систем регулирования на основе квазиасимптотического подхода [3].

Структура беспоискового алгоритма параметрической оптимизации систем регулирования

Оптимизация вектора настраиваемых параметров регуляторов в системах автоматического регулирования выполняется в соответствии с требованиями к качеству переходных процессов автоматического регулирования, обычно задаваемых эталонной моделью [1, 2, 4]. В этом случае качество переходных процессов можно оценить посредством функционала

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

где L – линейный оператор; F – выпуклая положительно определенная функция; $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_m)^T$ – m -мерный вектор параметров настройки регулятора в системе автоматического регулирования; $\boldsymbol{\varepsilon}$ – n -мерный вектор невязки между n -мерными векторами эталонной модели $\mathbf{x}_e$ [1, 2, 4] и выходной координатой объекта регулирования $\mathbf{x}$ во времени t .

Вектор регулируемых параметров регулятора в системе регулирования будет оптимальным при минимуме (1). Для минимизации функционала (1) применим беспоисковый градиентный метод Гаусса – Ньютона. Алгоритм метода для вычисления приращения вектора параметров регулятора на некотором шаге оптимизации можно записать в виде:

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{q} = \mathbf{H} \nabla V(\boldsymbol{\varepsilon}(t)); \\ \nabla V(\boldsymbol{\varepsilon}(t)) = \int_{t_0}^{t_0+t_f} \boldsymbol{\Xi}^T(t, \mathbf{q}) \nabla_{\boldsymbol{\varepsilon}} F(\boldsymbol{\varepsilon}(t, \mathbf{q})) dt; \\ \boldsymbol{\Xi} = \|\xi_{ij}(t)\|_{(n \times m)}; \quad \xi_{ij}(t) = \frac{\partial x_i(t)}{\partial q_j}, \end{cases} \quad (2)$$

где $\boldsymbol{\Xi} = \|\xi_{ij}(t)\|_{(n \times m)}$ – $(n \times m)$ -матрица функций чувствительности первого порядка [5]; t – символ транспонирования; ∇ – символ градиента; $\mathbf{H}$ – Гессиян; $\nabla_{\boldsymbol{\varepsilon}} F$ – вектор-градиент функции F .

Вектор-градиент функции F и Гессиян имеют вид:

$$\nabla_{\boldsymbol{\varepsilon}} F(\boldsymbol{\varepsilon}(t)) = \frac{\partial F(\boldsymbol{\varepsilon}(t))}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}} = \left(\frac{\partial F}{\partial \varepsilon_1}, \dots, \frac{\partial F}{\partial \varepsilon_n} \right)^T; \quad (3)$$

$$\mathbf{H} = \left(\frac{1}{t_f} \int_{t_0}^{t_0+t_f} (\mathbf{E}^T(t) \frac{\partial \nabla_{\varepsilon} F(\mathbf{\varepsilon}(t))}{\partial \mathbf{q}} + \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i^{(2)}(t) \frac{\partial F(\mathbf{\varepsilon}(t))}{\partial \varepsilon_i}) dt \right)^{-1}, \quad (4)$$

где $\mathbf{E}_i^{(2)}(t)$ – матрица функций чувствительности второго порядка $\xi_{ij}^{(2)}(t) = \frac{\partial^2 \mathbf{x}(t)}{\partial q_i \partial q_j}$ [5].

Вводя для корректировки сходимости в ов-
ражных профилях поверхностей коэффициент
шага [6], можно записать

$$\Delta \mathbf{q} = -\gamma \mathbf{H} \nabla \mathbf{V}(\mathbf{\varepsilon}(t, \mathbf{q})), \quad (5)$$

где γ – коэффициент шага, выбираемый по не-
которому эвристическому алгоритму.

Модификация алгоритма

Гаусса – Ньютона

При реализации алгоритма Гаусса – Ньюто-
на в системах автоматизации с программируе-
мыми логическими контроллерами актуален
вопрос упрощения его схемной реализации для
снижения объемов требуемых вычислитель-
ных ресурсов контроллеров. Для его решения
рассмотрим модификацию алгоритма Гаусса –
Ньютона. В целях упрощения дальнейшего
изложения без потери общности представим
модель оптимизируемой системы регулирова-
ния для случая скалярных функций с нулевыми
начальными условиями в виде

$$\sum_{i=0}^{n_p} q_i \frac{d^i \mathbf{x}(t)}{dt^i} = \sum_{i=0}^{m_p} b_i \frac{d^i z(t-\tau)}{dt^i}, \quad m_p < n_p, \quad (7)$$

где $z(t-\tau)$ – некоторая функция (возмущающее
воздействие на объект регулирования), смещен-
ная во времени на величину чистого запазды-
вания τ , которая рассматривается равной нулю
при $t < \tau$, так что уравнение (7) удовлетворяет
условиям непрерывности в некоторой открытой
области D и условию Липшица [6]; b_i – фиксир-
ованные параметры объекта регулирования.

Проведем анализ алгоритма на предмет его
избыточности для рассматриваемого класса
оптимизируемых систем и, в соответствии
с этим, выявления возможностей упрощения
алгоритма. Это весьма актуально при реализа-
ции алгоритма оптимизации в среде програм-
мируемых логических контроллеров, на базе
которых строятся автоматические регуляторы
технологических процессов.

Примем в алгоритме Гаусса – Ньютона инте-
гральную квадратичную оценку оптимальности

$$V = \frac{1}{2t_f} \int_0^{t_f} x^2(t) dt, \quad (8)$$

где t_f – время переходного процесса в системе
регулирования.

В этом случае вектор-градиент настраивае-
мых параметров записывается 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 функций
чувствительности по параметрам q_j ($j = 1, \dots, m$).

Рассматривая в формуле (4) первый член
и, соответственно, вводя далее в обозначения
усеченной матрицы и ее элементов знак «*»,
можем записать:

$$\mathbf{H}^* = \left\| h_{ij}^* \right\|_{(m \times m)}, \quad h_{ij}^* = \frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} \xi_i(t) \xi_j(t) dt; \quad (9)$$

$$h_{ij}^* = h_{ji}^*, \quad i, j = \overline{1, m}.$$

Для элементов матрицы $\mathbf{H}^*$, которые имеют
четные суммы индексов

$$h_{i_1 j_1}^* = \frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} \xi_{i_1}(t) \xi_{j_1}(t) dt, \quad i_1, j_1 \in \overline{1, m}; \quad (10)$$

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

Интегрируя (10) по частям и принимая во
внимание взаимосвязи функций чувствитель-
ности [5], получаем

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

В равенстве (11) при условии устойчивости
системы регулирования, принимая во внимание
взаимосвязи функций чувствительности [5],
для первого члена правой части при $t_f > t_r$ (здесь
 t_r – фактическое время регулирования) можно
принять

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

С учетом (12) и принимая во внимание вза-
имосвязи функций чувствительности [5], выра-
жение (11) принимает вид

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

Очевидно, что при повторном интегрирова-
нии выражения (13) получим

$$h_{i_1 j_1}^* = - \int_0^{t_f} \xi_{i_1+2}(t) \xi_{i_1-2}(t) dt.$$

Продолжая операцию интегрирования до тех пор, пока индексы функций чувствительности не сравняются, окончательно получим

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

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

Учитывая, что

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

выражение (14) принимает вид

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

Следовательно, элементы диагоналей матрицы $\mathbf{H}$ в выражении (5), параллельные побочной диагонали, равны друг другу по модулю и чередуются по знакам, причем знаки элементов, принадлежащих главной диагонали положительны.

Теперь рассмотрим элементы матрицы $\mathbf{H}^*$ с нечетной суммой индексов:

$$h_{i_2 j_2}^* = \int_0^{t_f} \xi_{i_2}(t) \xi_{j_2}(t) dt; \quad i_2, j_2 \in [1, m], \quad (16)$$

$$i_2 + j_2 = 2k + 1; \quad k \in [1, m].$$

Интегрируя выражение (16) по частям и принимая во внимание взаимосвязи функций чувствительности [5], получим

$$h_{i_2 j_2}^* = \xi_{i_2}(t) \xi_{j_2-1}(t) \Big|_0^{t_f} - \int_0^{t_f} \xi_{j_2-1}(t) d\xi_{i_2}(t),$$

откуда с учетом (12) и взаимосвязей функций чувствительности [5] следует

$$h_{i_2 j_2}^* = - \int_0^{t_f} \xi_{i_2+1}(t) \xi_{j_2-1}(t) dt.$$

Аналогичным образом, при повторном интегрировании получим

$$h_{i_2 j_2}^* = \int_0^{t_f} \xi_{i_2+2}(t) \xi_{j_2-2}(t) dt.$$

Операцию интегрирования будем продолжать, пока индексы функций чувствительности не будут отличаться на единицу. Окончательно получим

$$h_{i_2 j_2}^* = (-1)^{k_2} \int_0^{t_f} \xi_{i_2+k_2}(t) \xi_{j_2+k_2}(t) dt, \quad (17)$$

$$k_2 = (j_2 - i_2 - 1) / 2.$$

Учитывая, что $i_2 + k_2 = j_2 + k_2 + 1$, выражение (17) можно представить в виде

$$h_{i_2 j_2}^* = (-1)^{k_2} \int_0^{t_f} \xi_{i_2+k_2}(t) d\xi_{j_2+k_2}(t) \quad (18)$$

или

$$h_{i_2 j_2}^* = (-1)^{k_2} \frac{k_2 \xi_{i_2+k_2}^2(t)}{2} \Big|_0^{t_f}.$$

Окончательно, в соответствии с (12) для выражения (18) получаем

$$h_{i_2 j_2}^* = 0. \quad (19)$$

Следовательно, диагонали матрицы $\mathbf{H}^*$, элементы (9) которых имеют нечетную сумму индексов, будут содержать только нулевые элементы. Для невырожденной квадратной матрицы $\mathbf{H}^*$ обратная матрица $\mathbf{H}^{*-1} = \overline{\mathbf{H}}$ будет единственной:

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

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

где $\mathbf{H}_{ij}^*$ – алгебраическое дополнение элементов h_{ij}^* в матрице $\mathbf{H}^*$; $\mathbf{M}_{ij}$ – минор элемента h_{ij}^* определителя $|\mathbf{H}^*|$ порядка $m \geq 2$.

Матрица $\overline{\mathbf{H}}$ дает наилучшее приближение к $\mathbf{H}$ в смысле минимума квадрата сферической нормы

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

следовательно, в соответствии с работой [7] полученную матрицу $\overline{\mathbf{H}}$ можно рассматривать как квазиоптимальную.

Для коэффициентов шага γ , в соответствии с работой [6], применим эвристический подход их формирования. В рассматриваемом модифицированном методе Гаусса – Ньютона примем эвристический алгоритм, посредством которого будем учитывать совокупности различных нерегулярных ситуаций, возникающих при вычислениях функционала V , в виде

$$\gamma(n) = \gamma(n-1) \times \quad (20)$$

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

где $c_1, c_2 > 1$ и $c_1 > c_2$ (например, $c_1 = 2$; $c_2 = 1,7$); n_1 – счетчик последовательности улучшающих шагов.

С учетом проведенного упрощения алгоритма (5) окончательно модифицированный алгоритм оптимизации Гаусса – Ньютона можно записать в виде

$$\Delta \mathbf{q} = -\mathbf{\Gamma} \left(\int_0^{t_f} \text{diag} \mathbf{\Xi}^T(t) \mathbf{\Xi}(t) dt \right)^{-1} \times \\ \times \int_0^{t_f} \mathbf{\Xi}^T(t) \nabla_{\mathbf{e}} F(t) dt. \quad (21)$$

Для модифицированного алгоритма (21) характерным является то, что одна и та же матрица функции чувствительности используется и для вычисления градиента, и для вычисления экстраполяционной матрицы ускорения сходимости – аппроксимированного Гессияна. При использовании эффективных методов построения анализаторов чувствительности [5] это дает существенную экономию вычислительных ресурсов при реализации систем автоматического регулирования в среде программируемых логических контроллеров.

Следующим важным этапом упрощения реализации алгоритма оптимизации является применение квазиасимптотического подхода [3] для управления показателями качества переходных процессов в системах регулирования. В этом случае снимается проблема построения эталонных моделей для формирования заданных показателей качества переходных процессов. При этом в качестве критериальной базы будем использовать взвешенные оценки качества. Их характерная особенность состоит в том, что в отличие от выражения (8) подынтегральная функция этих оценок формируется с использованием в качестве сомножителей весовых функций [3]. Так, весовая функция времени может быть записана в виде

$$F_i = t^i, i = 1, 2, \dots \quad (22)$$

Соответственно функционал качества (1) принимает вид

$$V = LF(x(t, q)) * F_i, t \in [t_0; t_f]. \quad (23)$$

Выбором в (23) значения i при квазиасимптотическом подходе реализуется управление показателями качества процессов регулирования.

ПРИМЕР

В качестве примера рассмотрим достаточно распространенные в машиностроении, в химической, нефтехимической, пищевой и других отраслях промышленности системы автома-

тического регулирования расходов потоков жидкостей в трубопроводах. Математические модели этих объектов рассмотрены в работе [8]. В случае турбулентного движения жидкости система регулирования с пропорционально-интегрально-дифференциальным регулятором нелинейного объекта расхода при нулевых начальных условиях описывается системой уравнений [8]:

$$\begin{cases} \frac{dQ(t)}{dt} = P_n(t) S_{yc} \frac{g}{L\rho} - \\ - \left(1 + \frac{\lambda L}{D_{yc}} \sum_j \xi_{ej} + \xi_a(u_1(t)) \right) \frac{Q^2(t)}{2LS_{yc}}; \\ \xi_a(u_1(t)) = 2000g \left(\frac{S_{yc}}{u_1(t)Q_{yc}} \right)^2; \\ T_m \frac{dy_2(t)}{dt} + y_2(t) = k_m Q^2(t - \tau); \\ \tau = L_1 / \vartheta \\ T_m = \frac{1}{f_2 RT} + \left(128\mu \frac{L_1}{\pi d^4} (P_0 - y_2(t)) \right) \pi d^2 \frac{L_1}{4}; \\ T_i \frac{dy_3(t)}{dt} + y_3(t) = k_i u_2(t); \\ x(t) = x_0 - \sqrt{u_3(t)}; \\ y_1(t) = q_1 \int_0^t x(t) dt + q_2 x(t) + q_3 \frac{dx(t)}{dt}; \end{cases} \quad (24)$$

где Q – расход жидкости; P_n – перепад давления жидкости в объекте на концах трубопровода; S_{yc} – условное сечение клапана, регулирующего расход жидкости; g – ускорение свободного падения; L – длина трубопровода; ρ – плотность жидкости; λ – коэффициент трения трубопровода; D_{yc} – условный диаметр трубопровода; ξ_{ej} – коэффициенты местных сопротивлений соединительных частей трубопровода; ξ_a – гидравлическое сопротивление регулирующего органа; u_1 – положение плунжера; Q_{yc} – условная пропускная способность клапана (техническая характеристика); T_m и k_m – соответственно постоянная времени и коэффициент передачи пневмодатчика давления; y_2 – давление воздуха на выходе пневмодатчика; τ – время запаздывания пневмодатчика давления; ϑ – скорость звука в воздухе; f_2 – коэффициент проводимости пневматического сигнала датчиком давления; R – универсальная газовая постоянная; d и L_1 – соответственно диаметр пневмопровода и его длина от датчика давления до преобразователя; T – температура окружающей среды; μ – дина-

мический коэффициент вязкости воздуха; P_0 – исходное значение давления воздуха на выходе датчика давления; T_i и k_i – соответственно постоянная времени и коэффициент передачи пневмоэлектрического преобразователя; y_3 – выходной сигнал пневмоэлектрического преобразователя; u_2 – входной сигнал пневмоэлектрического преобразователя; x_0 – заданный расход жидкости; x – рассогласование между заданным и текущим значениями расхода жидкости в относительных единицах, выраженное в процентах; u_3 – сигнал пневмодатчика расхода жидкости; y_1 – управляющее воздействие регулятора на положение плунжера регулирующего органа; q_1, q_2, q_3 – элементы вектора $\mathbf{q}$ настраиваемых параметров пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора.

Моделирование процессов параметрической оптимизации описанной системы регулирования целесообразно проводить на основании алгоритма (24) с использованием упрощенной диагональной матрицы экстраполяции (20), анализатора функций чувствительности, построенного с учетом [5], на котором одновременно вычисляются все необходимые для алгоритма и экстраполятора функции чувствительности. В алгоритме для управления качеством применим квазиасимптотический подход [3], соответственно функционал качества примем в виде (23).

Результаты моделирования процессов оптимизации параметров регуляторов автоматической системы рассматриваемого объекта (24), которые получены после оптимизации по рассмотренному алгоритму, приведены на рис. 1.

Сопоставляя полученные качественные показатели результирующих процессов на рис. 1, а, можно заключить, что у графика 3 степень затухания существенно выше, чем у графика 1, переходный процесс на котором имеет колебательный слабозатухающий характер. Длительные колебательные процессы приводят к нарушению нормального течения технологического процесса в объекте. На графике же 3 переходный процесс затухает очень быстро, т.е. возникающие в процессе эксплуатации объекта в результате внешних возмущений отклонения технологического параметра быстро устраняются.

Графики на рис. 1, б свидетельствуют о том, что степень затухания у процесса 3 выше, чем у процесса 2, что весьма важно при регулировании технологических параметров объектов.

Следовательно, моделирование подтверждает эффективность применения взвешенного

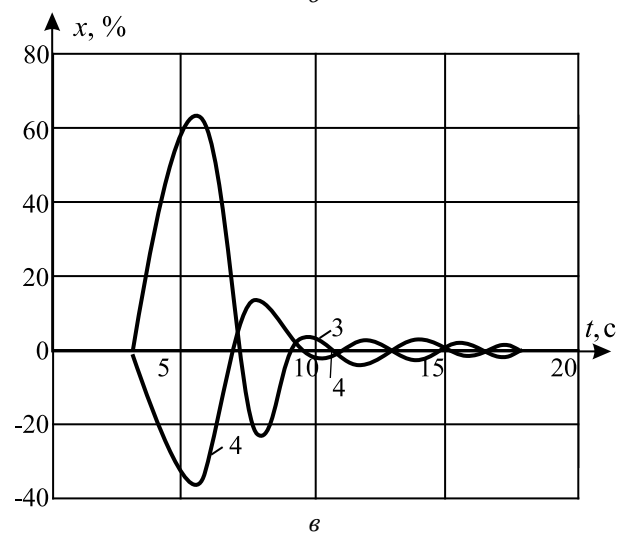
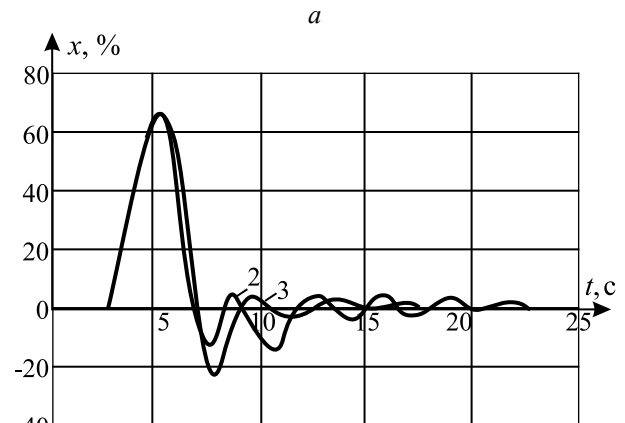
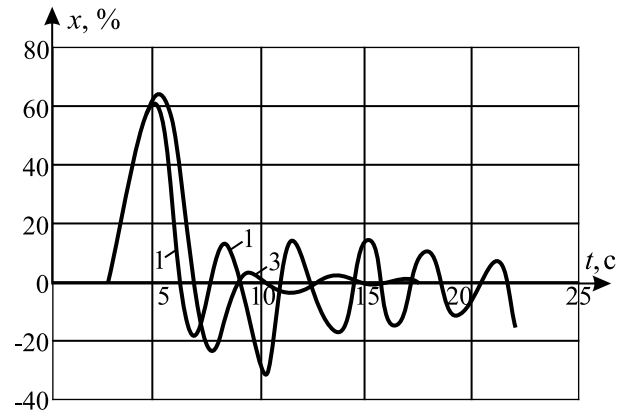


Рис. 1. Переходные процессы системы регулирования при различных оценках оптимизации (а), при различных весовых функциях (б), при обратном знаке возмущающего воздействия на объект (в):
1 – по интегральной квадратичной оценке оптимальности (8); 2 – по интегральной квадратичной оценке оптимальности (22) с весовой функцией при $i = 1$; 3 – по оценке (22) с весовой функцией при $i = 2$ и положительном знаке возмущающего воздействия на технологический объект регулирования; 4 – при настройках, соответствующих процессу 3, и обратном знаке возмущающего воздействия

функционала (22) для управления качественными показателями процессов регулирования в системах автоматизации.

Вследствие нелинейности объекта амплитуды процессов 3 и 4 (см. рис. 1, в) различаются. Вместе с тем в обоих случаях качество регулирования остается на высоком уровне.

Моделирование процессов оптимизации проведено также и для обратного знака возмущающего воздействия $z(t)$. Результаты моделирования, приведенные на рис. 2, и в этом случае подтверждают неудовлетворительность показателей качества результирующего процесса регулирования 2, полученного при использовании интегральной квадратичной оценки оптимальности (8). Переходный процесс 2 является сильно колебательным со слабым затуханием в отличие от рассмотренного ранее оптимального процесса регулирования 4, приведенного на этом же рисунке.

Настройки регулятора, получаемые при использовании интегральной квадратичной оценки оптимальности (8), дают низкогокачественный слабо затухающий переходный процесс регулирования 1 (см. рис. 2).

На основе анализа результатов моделирования, представленных на рис. 1, можно сделать вывод, что процесс 1, полученный при оптимизации по интегральной квадратичной оценке оптимальности (8), имеет неудовлетворительные показатели качества регулирования. Процессы 2, 3 и 4, полученные в результате оптимизации настроек регулятора, по взвешенной оценке, качества (22) при $i = 2$, характеризуются быстрым затуханием и, соответственно, имеют малое время регулирования. Это подтверждает выводы в работе [9] о том, что интегральная квадратичная оценка и построенный

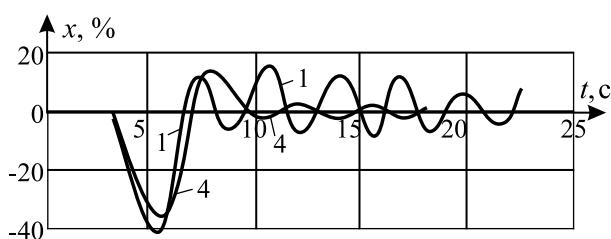


Рис. 2. Переходные процессы системы регулирования при отрицательном знаке возмущающего воздействия

на технологический объект регулирования:
1 – при интегральной квадратичной оценке оптимальности (8); 4 – при оптимизации по оценке (22) с весовой функцией при $i = 2$

на ее основе критерий не обеспечивают получение быстро затухающих переходных процессов регулирования. Вместе с тем применение взвешенных оценок качества типа (22) позволяет получать в результате оптимизации настройки регуляторов, обеспечивающие высокие качественные показатели переходных процессов в объектах автоматизации.

На основании проведенного моделирования выявлено, что сходимость рассмотренного алгоритма оптимизации достигается при различных начальных значениях параметров настройки регулятора, соответствующих как устойчивым, так и существенно расходящимся исходным переходным процессам регулирования. Для всех случаев оптимизация завершилась не более чем за 20 итераций.

Заключение

Сформулированный алгоритм оптимизации с модифицированным методом Гаусса – Ньютона, с использованием для вычисления матриц градиента и экстраполяции с целью ускорения сходимости одной той же матрицы функций чувствительности, с упрощенной методикой формирования весовых коэффициентов, а также с применением квазиасимптотического подхода для управления показателями качества процессов в системах автоматического регулирования одновременно с решением вопроса выбора для параметрической оптимизации систем регулирования эффективных критериев, позволяет успешно оптимизировать настройки регуляторов в системах автоматизации промышленных объектов. Полученные в результате беспоиcковой параметрической оптимизации переходные процессы регулирования характеризуются высокой степенью затухания и соответственно малым временем регулирования. Вместе с тем, модификация алгоритма Гаусса – Ньютона существенно упростила его реализацию. Это заметно сократило потребности в вычислительных ресурсах и во времени, необходимого для оптимизации, что особенно важно в условиях широкого применения для реализации промышленных систем регулирования программируемых логических контроллеров.

Проведенное моделирование работы алгоритма по автоматической оптимизации системы регулирования расхода потока жидкости в трубопроводе подтвердило его высокую эффективность.

Список литературы

1. Теория оптимизации систем автоматического управления: под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Езупова. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 742 с.
2. Liptak B.G. Instrument Engineers' Handbook: Process control and optimization. – Boca Raton, FL: CRC Pres, 2006. – 2304 p.
3. Широков Л.А. Квазиасимптотическое управление качеством регулирования при автоматической оптимизации и адаптации систем регулирования // Машиностроение и инженерное образование. 2015. № 3. С. 2–8.
4. 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.
5. Широков Л.А. Синтез компактов чувствительности для автоматизации параметрического проектирования линейных систем регулирования // Машиностроение и инженерное образование. 2008. № 3. С. 22–29.
6. Цирлин А.М. Оптимальное управление технологическими процессами. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 400 с.
7. Цыпкин Я.З. Квазиоптимальные алгоритмы обучения // Автоматика и телемеханика. 1973. № 6. С. 62–73.
8. Гонне Г.Г. Исследование непосредственного цифрового управления потоками жидкости в химико-технологических процессах: автореф. дисс. канд. н., Ангарск, 1972. – 145 с.
9. Shirokov L.A. The method of automated optimization of a class of non-minimal-phase systems // Proc. System Sensitivity and Adaptivity. Preprints 2 IFAC Symposium, Dubrovnik, 1968. С. 624–635.

Материал поступил в редакцию 11.08.16

**ШИРОКОВ
Лев Алексеевич**

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

Доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и электроснабжение» НИУ МГСУ. 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 160 опубликованных научных трудов.

**ЧЕЛЫШКОВ
Павел Дмитриевич**

E-mail: mgsu.ru/mgsu.pф
Тел.: (499) 959-50-42

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматика и электроснабжение» НИУ МГСУ. Сфера научных интересов: инженерная кибернетика, системы автоматизации проектирования, автоматизированные системы управления, технологии информационного моделирования. Автор 102 опубликованных научных работ, 23 патентов РФ на изобретения, полезные модели и промышленные образцы и 22 свидетельств на программы для ЭВМ.

**ШИРОКОВА
Ольга Львовна**

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

Кандидат экономических наук, доцент кафедры «Информатика и прикладная математика» НИУ МГСУ. Сфера научных интересов: информационные технологии и системы, методы оптимизации, математические методы в экономике, автоматические системы контроля и управления. Автор 30 научных трудов.