

Е.В. ЛАРКИН, А.В. БОГОМОЛОВ, А.Н. ПРИВАЛОВ
**НЕЙРОСЕТЕВАЯ НАСТРОЙКА
ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ
ВЕКТОРНОЙ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ**

Ларкин Е.В., Богомолов А.В., Привалов А.Н. Нейросетевая настройка генетического алгоритма управления векторной иерархической системой.

Аннотация. Представлены результаты исследования иерархической двухуровневой системы векторного управления многосвязным объектом, эволюция которого описывается вектором состояния, изменяющегося путем воздействия на исполнительные устройства, каждое из которых включает привод и рабочий механизм. Рассматриваемая система управления отличается наличием дополнительного контура настройки виртуального регулятора на верхнем и функционально-логическом уровнях. Синтезирована математическая модель импульсного отклика исполнительного механизма системы, учитывающая сухое трение, люфт и ограничения по скорости и положению рабочего органа управляемого объекта. Исходная модель исполнительного органа представлена в форме Коши, а его импульсный отклик аппроксимирован импульсным откликом линейного звена второго порядка, оптимальным по критерию минимума ошибки аппроксимации. Доказано, что параметры линейаризованного импульсного отклика зависят от эксплуатационных параметров привода. Построена модель замкнутой системы управления объектом в целом и показано, что ее параметры зависят от эксплуатационных параметров приводов, желаемого значения вектора состояния объекта управления и параметров виртуальных регуляторов, реализованных на функционально-логическом и верхнем иерархическом уровнях. Полученные результаты демонстрируют, что изменение эксплуатационных параметров объекта может быть скомпенсировано за счет структурных и параметрических изменений генетического алгоритма управления. Разработана методика синтеза генетического алгоритма управления сложными многоконтурными объектами, реализуемого контроллером верхнего уровня иерархии, базирующаяся на использовании нейронной сети. Показано, что предлагаемый подход обеспечивает достижение синергетического эффекта, когда управляющие воздействия, реализуемые разными модификациями алгоритма управления, оказываются менее эффективными, чем управляющие воздействия, реализуемые с помощью составного алгоритма, подвергающегося эволюционным изменениям в процессе функционирования системы. Корректность теоретических положений подтверждена результатами вычислительного моделирования управления виртуальным регулятором с помощью нейронной сети, продемонстрировавшего существенное улучшение характеристик управления за счет уменьшения времени выхода на установившийся режим и времени перерегулирования.

Ключевые слова: иерархическая система управления, векторное управление, многосвязный объект, генетический алгоритм, нейронная сеть, виртуальный регулятор.

1. Введение. Использование универсальных контроллеров в качестве аппаратной платформы контроля технологических процессов промышленных объектов существенно расширяет класс законов управления, которые могут быть реализованы в системе [1 – 3]. Принцип гибкого программирования, реализованный в приборах подобного типа, позволяет, не меняя аппаратной части контроллера

управлять объектами, структура и параметры которых меняются в процессе функционирования в широких диапазонах, в том числе и такими, которые в некотором диапазоне регулируемых величин являются структурно неустойчивыми. К последним могут быть отнесены многосвязные объекты управления, описываемые вектором состояния, воздействие на которые осуществляется с помощью множества исполнительных устройств, каждое из которых включает привод и рабочий механизм [4, 5]. В местах стыковки привода и рабочего механизма исполнительного устройства всегда присутствуют существенные нелинейности типа люфт, сухое трение, ограничение по скорости и положению рабочего механизма [6, 7]. Параметры как собственно объекта, так и исполнительного устройства могут изменяться в процессе эксплуатации системы, причем вследствие наличия перекрестных связей между контурами изменение эксплуатационных параметров в каждом из каналов влияет на статические и динамические характеристики замкнутой системы в целом. Так, увеличение сухого трения в механизмах понижает точность поддержания регулируемых параметров, а увеличение люфта приводит к увеличению перерегулирования и времени выхода системы на установившиеся режимы. Для повышения эксплуатационной устойчивости систему управления на физическом уровне разделяют на верхний и функционально-логический уровни, что позволяет гибко изменять как алгоритмы управления контроллеров, замыкающих обратные связи по состоянию рабочих механизмов исполнительных устройств, так и алгоритма управления объектом в целом [8, 9].

Таким образом, сложность объекта управления, создаваемый избыток вычислительных мощностей за счет физического разделения контроллеров, а также возможность оперативного гибкого перепрограммирования контроллеров создает предпосылки для реализации генетических алгоритмов управления [10, 11]. Подобные алгоритмы за счет эволюционной (параметрической) и мутационной (структурной) трансформации могут адаптироваться в режиме «on line» [12 – 14] к текущим условиям эксплуатации системы и текущему состоянию, как приводов и рабочих механизмов, так и самого объекта с сохранением основных характеристик управления таких, как устойчивость, перерегулирование, точность, время достижения желаемых значений регулируемых параметров состояния [15, 16]. Рабочим инструментом настройки алгоритмов может быть нейронная сеть [17, 18].

Методы создания генетических алгоритмов управления распространены на практике недостаточно, что подтверждает актуальность исследований.

Цель проведенного исследования заключается в создании метода построения генетических алгоритмов иерархических векторных систем управления, включающих дополнительный контур контроля структуры и параметров виртуального регулятора, работающего по принципу нейронной сети.

Постановка решаемой задачи может быть представлена в следующем виде. Имеется объект управления, состояние которого описывается вектором регулируемых параметров и зависит от вектора воздействий, формируемых рабочими механизмами, подключенными через подсистему приводов к иерархическому цифровому регулятору, включающему контроллер верхнего уровня иерархии и контроллеры функционально-логического уровня, каждый из которых управляет своим приводом, и в свою очередь, управляется контроллером верхнего уровня. Для обеспечения эксплуатационной устойчивости в систему, наряду с контурами, реализующими принцип обратной связи по состоянию рабочего механизма и объекта управления, введены контуры настройки виртуальных регуляторов, которые выполняют компенсирующую подстройку параметров регуляторов при изменении условий функционирования системы. Для этого на этапе разработки программного обеспечения должны быть построены линеаризованные математические модели приводов с рабочими механизмами, сформирована структура нейронной сети, определены варьируемые параметры виртуальных регуляторов, а также разработан алгоритм изменения структуры и параметров виртуальных регуляторов по сигналам обратной связи в дополнительном контуре управления. Интеграция алгоритма вариации параметров в алгоритм управления дают генетический алгоритм управления, для которого должны быть определены условия эволюции (изменение параметров операторов управленческой компоненты интегрального алгоритма) и мутации (изменение структуры управленческой компоненты, в частности, добавление, исключение, замена операторов).

2. Структура двухуровневой системы управления. На структурной схеме двухуровневой цифровой системы управления (рисунок 1) [8, 9] показаны OUC (object under control) – многосвязный объект управления, MC (master controller) – контроллер верхнего уровня иерархии; FLC (functional-logical level controller) FLC_i , $1 \leq i \leq K$ – контроллеры функционально-логического уровня иерархии; K – количество регулируемых параметров состояния объекта.

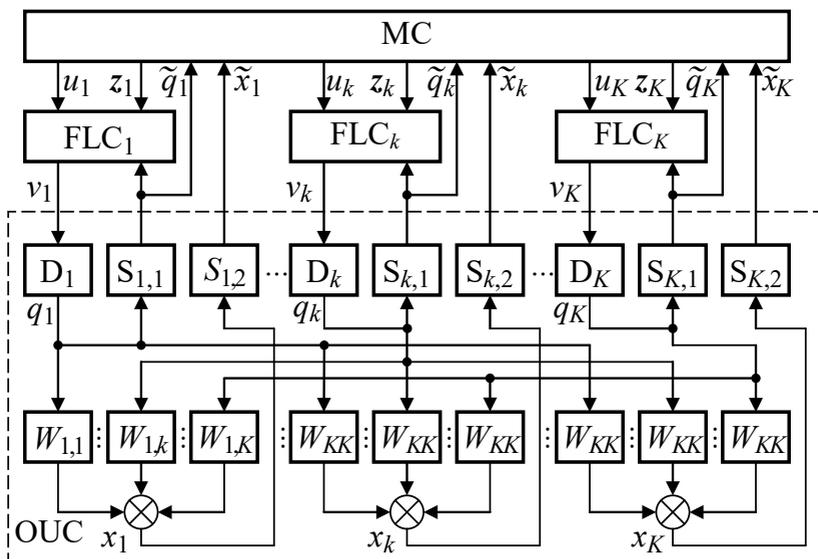


Рис. 1. Структурная схема двухуровневой системы управления

В объекте управления выделены физические исполнительные устройства D_k , включающие привод и рабочие механизмы (рули, заслонки, задвижки и т.п.); сенсоры $S_{k,1}$, измеряющие характеристики текущего состояния рабочих механизмов; сенсоры $S_{k,2}$, измеряющие параметры текущего состояния объекта управления.

Состояние объекта управления определяется вектором $\mathbf{x}(t) = [x_i(t)]^\theta$, где t – время; θ – обозначение операции транспонирования. Желаемые значения положений исполнительных механизмов рабочих органов задаются вектором $\mathbf{u}(t) = [u_i(t)]^\theta$, который генерируется контроллером верхнего уровня иерархии. Значения кодов вектора $\mathbf{u}(t)$ с выхода контроллера верхнего уровня иерархии подаются на управляющие входы контроллеров функционально-логического уровня иерархии. Контроллеры функционально-логического уровня иерархии формируют вектор сигналов $\mathbf{v}(t) = [v_i(t)]^\theta$, воздействующих на драйверы, в результате чего рабочие механизмы устанавливаются в состояния $\mathbf{q}(t) = [q_i(t)]^\theta$. Под воздействием $\mathbf{q}(t)$ объект управления переходит в состояние

$\mathbf{x}(t)$, параметры которого измеряются сенсорами $S_{2,1} - S_{2,K}$, вектор сигналов $\tilde{\mathbf{x}}(t) = [\tilde{x}_i(t)]^0$ вводится в контроллер верхнего уровня иерархии, в результате чего обратные связи по состоянию объекта управления в системе замыкаются.

Наряду с контурами, формируемыми для замыкания обратной связи по измеренному состоянию объекта $\tilde{\mathbf{x}}(t)$, в системе имеется контуры настройки виртуальных регуляторов, реализованных в контроллерах функционально-логического уровня иерархии. Настройка осуществляется за счет установки элементов вектора параметров $\mathbf{z}(t) = [z_i(t)]^0$. В свою очередь, параметры вектора $\mathbf{z}(t)$ формируются в соответствии с сигналами $\tilde{\mathbf{q}}(t) = [\tilde{q}_i(t)]^0$ сенсоров $S_{k,1}$ и сигналами $\tilde{\mathbf{x}}(t)$ сенсоров $S_{k,2}$.

3. Функционирование системы. Алгоритм работы контроллеров функционально-логического уровня иерархии при управлении исполнительными органами имеет следующий вид:

$$\mathbf{v}(t) = \mathbf{u}(t) - \mathbf{w}_c(t) * \tilde{\mathbf{q}}(t), \quad (1)$$

где $\mathbf{w}_c(\mathbf{t})$ – диагональная матрица размерности $K \times K$, описывающая закон управления, реализованный в контроллерах функционально-логического уровня иерархии; * – матричная свертка, выполняемая по правилам перемножения матриц, в котором операция произведения заменена операцией свертки.

Элементы матрицы $\mathbf{w}_c(\mathbf{t}) = [w_{c,k,l}(t)]$ описываются зависимостью:

$$w_{c,k,l}(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } k \neq l; \\ w_{c,k}(t, \mathbf{z}_k), & \text{если } k = l; \end{cases} \quad (2)$$

где $w_{c,k,l}(t, \mathbf{z}_{k,l})$ – импульсный отклик регулятора, реализуемый в контроллере программно; \mathbf{z}_k – вектор параметров виртуального регулятора, устанавливаемых на контроллеры функционально-логического уровня иерархии.

Динамика исполнительных устройств системы определяется динамикой приводов рабочих механизмов и физических процессов, протекающих на стыке приводов и рабочих механизмов. В реальных драйверах, на стыке привода и рабочего механизма всегда присутствуют существенные нелинейности (рисунок 2), а именно, сухое трение (рисунок 2(а)), люфт с ограничением на перемещение (рисунок 2(б)) и ограничение по скорости (рисунок 2(в)) [6, 7].

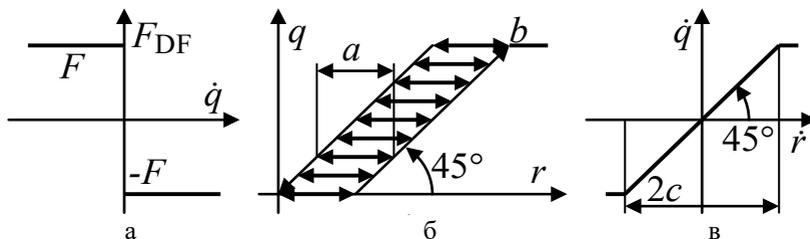


Рис. 2. Статические характеристики нелинейностей: а) сухое трение; б) люфт с ограничением; в) ограничение по скорости

В первом приближении сухое трение описывается выражением (для краткости индекс k опущен):

$$F_{DF} = -F \cdot \text{sgn} \dot{q}, \quad (3)$$

где F – величина сухого трения; зависящая от нагрузки на трущиеся поверхности, рабочего механизма, а также от текущего состояния (загрязнение трущихся поверхностей, наличие/отсутствие смазки, и т.п.); $\dot{q}_k = dq_k/dt$. $\dot{q} = dq/dt$.

Статическая передаточная характеристика люфта $q(r)$ относится к неоднозначным передаточным характеристикам, зависящим от предыстории процесса, и ее конкретная реализация определяется не только текущей величиной аргумента \tilde{q} , но и направлением скорости изменения аргумента $\dot{\tilde{q}}$ в предыдущий момент времени $t - dt$, то есть

$$q(r, \dot{r}, t) = \begin{cases} 0, & \text{если } r(t) < 0; \\ r(t) - a, & \text{если } r(t) = q(t) + a \text{ и } \dot{r}(t - dt) > 0; \\ b, & \text{если } r(t) > a + b; \\ r, & \text{если } r(t) = q(t) \text{ и } \dot{r}(t - dt) < 0; \\ q(t - dt), & \text{если } r(t) = q(t) + a \text{ и } \dot{r}(t - dt) < 0, \\ q(t - dt), & \text{если } r(t) = q(t) \text{ и } \dot{r}(t - dt) > 0, \\ q(t - dt), & \text{если } q(t) < r(t) < q(t) + a, \end{cases} \quad (4)$$

где r – величина перемещения привода; q – величина перемещения рабочего механизма; b – верхнее ограничение на перемещение рабочего механизма; a – величина люфта.

Статическая передаточная характеристика, описывающая ограничение по скорости рабочего механизма, представляется следующим выражением:

$$\dot{q} = \begin{cases} \dot{r}, & \text{если } |\dot{r}| < c; \\ c, & \text{если } \dot{r} \geq c; \\ -c, & \text{если } \dot{r} \leq -c, \end{cases} \quad (5)$$

где c – предельное достигаемое значение скорости перемещения рабочего механизма.

С учетом существенных нелинейностей и особенностей работы привода может быть построена модель функционирования драйверов в форме Коши:

$$\begin{cases} \dot{r}_{k,1}(t) = r_{k,2}(t); \\ \dot{r}_{k,2}(t) = -\alpha_{k,2} r_{k,2}(t) + \alpha_{k,v} v_k(t) + \alpha_{k,R} R_k(t), \end{cases} \quad (6)$$

где $r_{k,1}(t) = r_k(t)$ – регулируемая координата k -го привода исполнительного устройства, например, угол поворота вала привода; $r_{k,2}(t)$ – скорость изменения регулируемой координаты привода; $[\alpha_{k,2}]^{-1}$ – постоянная времени разгонной характеристики привода;

$\alpha_{k,v}/\alpha_{k,2}$ – коэффициент передачи по управляющему воздействию;
 $\alpha_{k,r}/\alpha_{k,2}$ – коэффициент передачи по полезной нагрузке.

В соответствии с зависимостью (4) полезная нагрузка на валу привода появляется только когда $r(t) = q(t) + a$ и $\dot{r}(t - dt) > 0$, или когда $q(t) = r(t)$ и $\dot{r}(t - dt) < 0$. В этом случае

$$R_k(t) = \mu_k \dot{q}_{k,2}(t) + \eta_k q_{k,2}(t) + F_{DF,k}(t), \quad (7)$$

где $R_k(t)$ – нагрузка на валу привода; μ_k – приведенная масса рабочего механизма; η_k – приведенный коэффициент вязкого трения в подвижных частях рабочего механизма; $F_{DF,k}(t)$ – сила сухого трения, определяемая по зависимости (3).

Решение системы нелинейных уравнений (3) – (7) совместно с уравнением (1), описывающим замыкание обратной связи, при $v_k(t) = \delta(t)$, где $\delta(t)$ – δ -функция Дирака, $1 \leq k \leq K$, позволяет сформировать диагональную $K \times K$ матрицу импульсных откликов исполнительного устройства $w_{DC}(t) = [w_{D,k,l}(t)]$. Элементы матрицы определяются как

$$w_{DC,k,l}(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } k \neq l; \\ w_{DC,k}(t, \mathbf{z}_k, a_k, b_k, c_k, \eta_k, F_{DF,k}, \mu_k), & \end{cases} \quad (8)$$

где \mathbf{z}_k – вектор параметров настройки k -го виртуального регулятора; a_k, b_k, c_k – значения параметров a, b, c существенных нелинейностей типа «люфт с ограничением по положению» и «ограничение по скорости» в k -м исполнительном устройстве; η_k и $F_{DF,k}$ – коэффициент вязкого трения и сила сухого трения в рабочем механизме исполнительного устройства; μ_k – приведенная масса исполнительного механизма.

Для упрощения решения задачи синтеза генетического алгоритма кривая импульсного отклика нелинейной замкнутой системы (8) должна быть аппроксимирована кривой отклика линейного звена второго порядка [8, 14, 15]:

$$\int_0^{\infty} \left\| w_{DC,k} \left(t, \mathbf{z}_k, a_k, b_k, c_k, \eta_k, F_{DF,k}, \mu_k \right) - \tilde{w}_{DC,k} \left(t, \kappa_{k,1}, \kappa_{k,2}, \kappa_{k,3} \right) \right\| dt \rightarrow \min, \quad (9)$$

где $w_{DC,k} \left(t, \mathbf{z}_k, a_k, b_k, c_k, \eta_k, F_{DF,k}, \mu_k \right)$ – аппроксимируемый импульсный отклик нелинейной модели; $\tilde{w}_{DC,k} \left(t, \kappa_{k,1}, \kappa_{k,2}, \kappa_{k,3} \right)$ – аппроксимирующий импульсный отклик линейной модели; $\kappa_{k,i} = \kappa_{k,i} \left(\mathbf{z}_k, a_k, b_k, c_k, \eta_k, F_{DF,k}, M_k \right)$, $i \in \{1, 2, 3\}$ – параметры оптимизации; $\|\dots\|$ – норма.

Линеаризация (9) позволяет представить описания замкнутых систем управления функционально-логического уровня с помощью аппарата передаточных функций:

$$\mathbf{Q}(s) = \tilde{\mathbf{W}}_{DC}(s) \cdot \mathbf{U}(s), \quad (10)$$

где $\mathbf{Q}(s) = L[\mathbf{q}(t)]$; $\mathbf{U}(s) = L[\mathbf{u}(t)]$; $\tilde{\mathbf{W}}_{DC}(s) = L[\tilde{\mathbf{w}}_{DC}(t)]$ $L[\dots]$ – прямое преобразование Лапласа; s – переменная Лапласа (оператор дифференцирования) [18, 19]; $\tilde{\mathbf{W}}_{DC}(s) = [\tilde{W}_{DC,k,l}(s)]$ – диагональная $K \times K$ матрица передаточных функций замкнутых систем управления исполнительными устройствами драйверов; $W_{DC,k,l}(s) = W_{DC,k}(s, \mathbf{z}_k)$ при $k=l$; \mathbf{z}_k – вектор параметров, устанавливаемых на k -й виртуальный регулятор.

Для замыкания обратной связи через генетический алгоритм первичная математическая модель объекта управления, в общем случае нелинейная, должна быть линеаризована и преобразована в операторную форму, которая принимает вид:

$$\mathbf{X}(s) = \mathbf{W}_{OUC}(s, \{x_k^0\}) \cdot \mathbf{Q}(s), \quad 1 \leq k \leq K, \quad (11)$$

где $\mathbf{W}_{OUC}(s, \{x_k^0\}) = [W_{OUC,k,l}(s, \{x_k^0\})]$ – матрица передаточных функций самого общего вида размерности $K \times K$; $\{x_k^0\}$ – точка разложения первичной модели в ряд Тейлора; $\mathbf{X}(s) = L[\mathbf{x}(t)]$.

В общем случае в объекте управления имеются перекрестные связи между каналами формирования элементов вектора $\mathbf{X}(s)$ (рисунок 1), поэтому матрица $\mathbf{W}_{OUC}(s, \{x_i^0\})$ не является диагональной, и при $k \neq l$ не все ее элементы равны нулю. С учетом этого, для случая, если в генетическом алгоритме контроллера верхнего уровня иерархии реализован линейный закон управления, матричное уравнение, описывающее замкнутую систему управления, принимает вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(s) = & \left[\mathbf{E} + \mathbf{W}_{MC}(s, \{\mathbf{z}_{MC,k}\}) \cdot \mathbf{W}_{S,2}(s) \cdot \right. \\ & \left. \cdot \tilde{\mathbf{W}}_{DC}(s, \{\mathbf{z}_k\}) \cdot \mathbf{W}_{OUC}(s, \{x_k^0\}) \right]^{-1} \cdot \\ & \cdot \tilde{\mathbf{W}}_{DC}(s, \{\mathbf{z}_k\}) \cdot \mathbf{W}_{OUC}(s, \{x_k^0\}) \cdot \mathbf{F}(s), \end{aligned} \quad (12)$$

где \mathbf{E} – единичная диагональная матрица; $\mathbf{W}_{MC}(s, \{\mathbf{z}_{MC,k}\})$ – диагональная матрица генетического алгоритма управления, реализованного в контроллере верхнего уровня иерархии; $\mathbf{z}_{MC,k} = [z_{MC,k,0(g)}, \{z_{MC,k,\gamma(g)}\}]$ – вектор описания k -го генетического алгоритма; $z_{MC,k,0(g)}$ – структура генетического алгоритма; $1(g, k) \leq \gamma(g, k) \leq \Gamma(g, k)$ – параметры; $\mathbf{W}_{S,2}(s)$ – диагональная матрица передаточных функций сенсоров $S_{2,i}$; $\mathbf{W}_{DC}(s, \mathbf{z}_i)$ – диагональная матрица передаточных функций исполнительных устройств; $\mathbf{F}(s) = L[\mathbf{f}(t)]$; $\mathbf{f}(t) = [f_k(t)]^0$ – вектор желаемых значений регулируемых параметров $\mathbf{x}(t)$, размерности всех диагональных матриц $K \times K$.

4. Настройка генетического алгоритма с помощью нейронной сети. Как следует из (9) и (11), статические и динамические характеристики замкнутой двухуровневой системы определяются эксплуатационными параметрами $a_i, b_i, c_i, \eta_i, F_{DF,i}, \mu_i$, $1 \leq i \leq K$, и значениями регулируемых параметров x_i^0 в точке разложения, зависящей от $\mathbf{f}(t)$. Перечисленные параметры могут значительно изменяться в процессе эксплуатации системы, однако эти изменения не должны оказывать влияния на ее работоспособность и такие характеристики, как перерегулирование, время выхода

на установившийся режим, точность. Изменения эксплуатационных параметров могут быть скомпенсированы на функционально-логическом уровне с помощью вариации векторов вектора $\mathbf{Z} = \mathbf{z} \cup \mathbf{z}_{MC}$. Настройка системы должна производиться по переходным процессам, наблюдаемым в драйверах D_k при замыкании обратных связей через FLC_k , а также по наблюдаемым переходным процессам в объекте управления при замыкании обратных связей через контроллер верхнего уровня иерархии.

Для управления настройкой наблюдаемые параметры представляются в виде обобщенного множества

$$\Xi(t) = \mathbf{f}(t) \cup \mathbf{u}(t) \cup \mathbf{v}(t) \cup \tilde{\mathbf{q}}(t) \cup \tilde{\mathbf{x}}(t), \quad (13)$$

где $\Xi(t) = \{ \xi_j(t) \}$, $1 \leq j \leq K$ – множество обобщенных наблюдаемых параметров системы.

Множество (13) описывает обобщенное пространство, в котором производится поиск эволюционно-мутационных вариаций генетических алгоритмов. Поиск параметров предлагается определять с помощью нейронной сети, структура которой показана на рисунке 3.

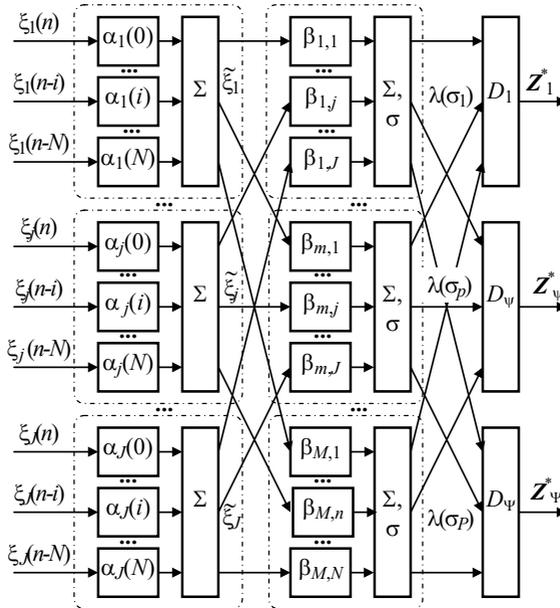


Рис. 3. Нейронная сеть управления параметрами регулятора

В сеть входят нейроны первого слоя, на входы которых подаются дискретные последовательности наблюдаемых сигналов

$$\xi_j(n), \dots, \xi_j(n-N), \quad (14)$$

где n – дискретный аналог физического времени, $N+1$ – длина последовательности.

Моменты физического времени $t_0, \dots, t_n, \dots, t_N$ и номера отсчетов $1, \dots, n, \dots, N$ связаны соотношением $t_n = 2\pi n\Omega^{-1}$, где Ω – круговая частота дискретизации, определяемая из условий Найквиста теоремы об отсчетах [8, 9].

Нейроны первого слоя осуществляют фильтрацию поступившей информации о состоянии драйверов D_k и объекта управления. Это может быть сделано с помощью вычисления линейной свертки [20, 21]

$$\tilde{\xi}_j(n) = \sum_{i=0}^N \alpha_j(i) \xi_j(n-i), \quad (15)$$

где $\alpha_j(i)$ – параметры фильтра, формируемые на этапе настройки нейронной сети.

Нейроны второго слоя формируют систему гиперплоскостей в J -мерном пространстве оценок параметров $\tilde{\xi}_j$

$$\mathbf{\beta} \cdot \tilde{\xi} = \mathbf{y}, \quad (16)$$

где $\mathbf{\beta} = [\beta_{p,j}]$ – матрица параметров размерности $P \times J$; P – количество гиперплоскостей; J – размерность пространства; $\mathbf{y} = (y_p)^{\theta}$ – вектор-столбец свободных членов, $1 \leq p \leq P$.

Матрица $\mathbf{\beta}$ и вектор \mathbf{y} определяют расположение гиперплоскостей в пространстве параметров, которые необходимы для задания вектора логических σ -функций $\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_p)^{\theta}$, имеющих вид

$$\sigma_p = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{j=1}^J \beta_{p,j} \xi_j > y_p; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (17)$$

где 0, 1 – логический ноль и единица, соответственно.

Вследствие того, что каждая из σ -функций представляется логической переменной, она может быть представлена как аргумент логической функции

$$\lambda(\sigma_p) = \begin{cases} \sigma_p, & \text{если } \sigma_p = 1; \\ \bar{\sigma}_p, & \text{если } \sigma_p = 0, \end{cases} \quad (18)$$

где $\bar{}$ – логическая операция отрицания.

Логическая единица в (17) означает, что точка, заданная суммой $\sum_{j=1}^J \beta_{p,j} \xi_j$, находится над плоскостью $\sum_{j=1}^J \beta_{p,j} \xi_j = y_p$, а логический ноль – под указанной плоскостью. Таким образом, все пространство оценок параметров $\tilde{\xi}_j$ гиперплоскостями (16) разделяется на области, описываемые с помощью дизъюнктивной нормальной формы

$$D_\psi = \bigvee_i \left[\bigwedge_{p=1}^P \lambda_{\psi,i,p}(\sigma_p) \right], \quad (19)$$

где ψ – номер области; i – номер элементарной конъюнкции; p – номер гиперплоскости, ограничивающей область; $\lambda_{\psi,i,p}(\sigma_p)$ – логическая функция от σ_p при ее вхождении в i -ю элементарную конъюнкцию ψ -й области.

Каждая отдельная подобласть, описываемая в пространстве оценок состояния элементарной конъюнкцией, является выпуклой или открыто-выпуклой. Дизъюнктивные комбинации элементарных конъюнкций описывают объединения выпуклых подобластей, и позволяют сформировать области практически любого вида, в том числе открытые, невыпуклые и многосвязные. Множество подобластей, описанных совершенной дизъюнктивной нормальной формы покрывает все пространство наблюдаемых параметров (13). Количество подобластей определяется матричным уравнением (16), в частности зависит от матрицы коэффициентов β и вектора свободных членов y , которые задаются на этапе настройки нейронной сети. Эти параметры определяют вычислительную сложность процедуры коррекции генетического алгоритма. Увеличение количества подобластей повышает точность настройки, но

увеличивает также вычислительную сложность генетического алгоритма.

Для решения задачи управления параметрами каждой области D_{ψ} может быть поставлен в соответствие набор параметров

$$D_{\psi} \rightarrow \mathbf{Z}^* = \mathbf{z}_{\psi}^* \cup \mathbf{z}_{MC,\psi}^*, \quad (20)$$

где \mathbf{z}_{ψ}^* – вектор векторов оптимальных параметров, устанавливаемых на виртуальные регуляторы контроллеров функционально-логического уровня иерархии, например ПИД регуляторов [22, 23]; $\mathbf{z}_{MC,\psi}^*$ – вектор текущих реализаций оптимальных генетических алгоритмов, реализованных в контроллере верхнего уровня иерархии.

Выбор (20) не накладывает никаких ограничений на алгоритмы управления, выбираемые для реализации. В том случае, если в каждом из выбираемых алгоритмов изменяется только параметры регуляторов, то эти изменения могут быть отнесены к эволюционным, а если изменяется принцип управления и параметры регулятора, то изменения могут быть отнесены к мутационным. Примером эволюционных вариаций может являться изменение коэффициентов передачи по пропорциональному, интегральному и дифференциальному каналам виртуального ПИД-регулятора. Примером мутационных изменений является случай, когда при большой ошибке в k -м канале

$$\|f_k(t) - x_k(t)\| > \varepsilon_k, \quad (21)$$

где ε_k – порог мутации, выбирается релейный способ управления, то есть $u_k = u_{k,\max} \operatorname{sgn}[f_k(t) - x_k(t)]$.

При малой ошибке, когда (21) не выполняется, закон управления может быть выбран линейным, например, в контур обратной связи этого канала может быть включен линейный ПИД регулятор. При этом релейный закон управления обеспечивает максимально быстрый выход параметра $x_k(t)$ из области (21), а параметры ПИД регулятора должны обеспечивать устойчивое удержание величины $x_k(t)$ вне зоны (21).

Таким образом, нейронная сеть формирует в системе дополнительный контур управления, в котором на основании анализа качественных характеристик переходных процессов в приводах

и системе в целом выбирается принцип управления объектом и параметры регулятора, обеспечивающие заданные показатели качества: устойчивость, перерегулирование, время выхода на установившийся режим, точность. Как следует из логики работы первого слоя нейронов для принятия решения о выборе Z^* необходимо, чтобы прошло как минимум, $J \cdot (N+1)$ транзакций по вводу данных о состоянии объекта. Таким образом, в системе на каждые $N+1$ циклов управления должен приходиться один цикл коррекции структуры и/или параметров генетического алгоритма.

5. Пример синтеза регулятора. Реализуемость этапов процесса синтеза генетического алгоритма показана на следующем примере.

В качестве исполнительного устройства в системе используется привод постоянного тока с управлением по якорной обмотке наиболее часто применяемый в системах управления промышленными объектами. В месте стыковки двигателя с рабочим механизмом действуют все существенные нелинейности, представленные на рисунке 2. Формирование эквивалентного линеаризованного импульсного отклика привода показано на рисунке 4(а).

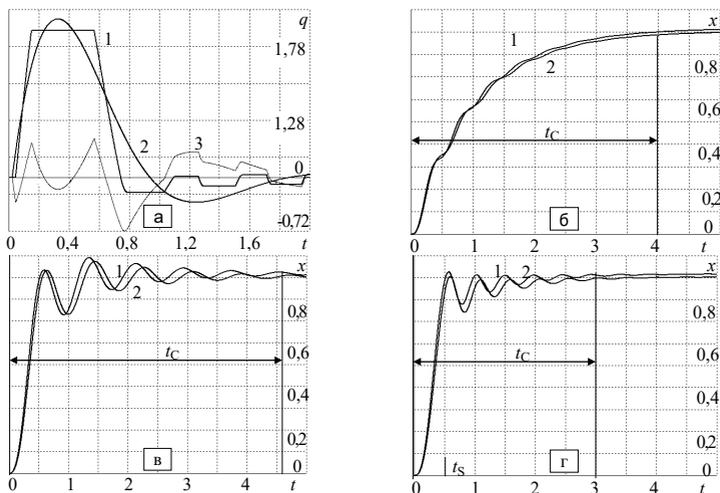


Рис. 4. Работа двухуровневой системы управления

Первичная модель привода имеет вид (1) – (8). Линейная часть привода с учетом электрической и механической постоянных времени

описывается передаточной функцией $W(s) = \frac{1,3}{0,01 \cdot s^2 + 0,4 \cdot s + 1}$.

Параметры нелинейной части модели являются следующими: $a = 0,2$, $b = 0,5$; $c = 0,1$; $F = 0,2$. Кривая 1 показывает импульсный отклик нелинейной системы. Кривая 2 показывает импульсный отклик линеаризованной системы, с передаточной функцией

$$W_{DC}(s) = \frac{1}{0,063 \cdot s^2 + 0,256 \cdot s + 1},$$

полученной как решение оптимизационной задачи (8). Кривая (3) показывает разность между импульсными откликами нелинейной и линеаризованной систем.

Объект управления описывается линейным матричным уравнением

$$\begin{bmatrix} X_1(s) \\ X_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{5}{s+1} & \frac{0,4}{0,8 \cdot s + 1} \\ -\frac{0,4}{0,8 \cdot s + 1} & \frac{5}{s+1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_1(s) \\ Q_2(s) \end{bmatrix},$$

где $X_1(s) = L[x_1(t)]$; $X_2(s) = L[x_2(t)]$;
 $Q_1(s) = L[q_1(t)]$; $Q_2(s) = L[q_2(t)]$.

В двухуровневой системе при управлении состоянием объекта управления использован виртуальный ПИД-регулятор [22, 23].

На рисунке 4(б) показан переходный процесс для случая, когда коэффициенты по пропорциональному и дифференциальному каналам виртуального регулятора равны $z_{MC,P,1} = z_{MC,P,2} = 1$, $z_{MC,D,1} = z_{MC,D,2} = 1$. Выход на установившийся режим осуществляется без перерегулирования за время $t_c = 4$ с.

На рисунке 4(в) показан переходный процесс для случая, когда коэффициенты по пропорциональному и дифференциальному каналам равны $z_{MC,P,1} = z_{MC,P,2} = 1$ $z_{MC,D,1} = z_{MC,D,2} = 0,3$. Выход на установившийся режим осуществляется с перерегулированием 12% за время $t_c = 4,6$ с.

На рисунке 4(г) показан переходный процесс для случая, когда для управления применяется генетический алгоритм. Разделяющие поверхности выражения (16) имеют вид $\bar{\xi}_1 = x_1 = 0,8$, $\bar{\xi}_2 = x_2 = 0,8$. Если значения регулируемых параметров x_1, x_2 меньше 0,8, то контур настройки генетического алгоритма устанавливает значения $z_{MC,D,1} = z_{MC,D,2} = 0,3$, а если больше, то $z_{MC,D,1} = z_{MC,D,2} = 1$. Это происходит через 0,5 с после начала переходного процесса. При таком эволюционном изменении алгоритма время выхода на установившийся режим сокращается до 3 с, а перерегулирование не превышает 2%.

Таким образом, оперативная переналадка виртуального регулятора с помощью нейронной сети позволяет сократить время переходного процесса с четырех до 3 с, т.е. на 25% по сравнению со случаем рисунка 4(б), и с 4,6 до 3 с, т.е. на 34,7%, по сравнению со случаем рисунка 4(в). Синергетический эффект достигается за счет того, что в каждой конкретной области пространства состояний в иерархической системе управления действует версия алгоритма управления, обеспечивающая оптимальные режимы функционирования исполнительных устройств системы.

6. Заключение. В результате исследования разработана модель синтеза генетического алгоритма управления сложными многоконтурными объектами, реализуемого контроллером верхнего уровня иерархии, базирующуюся на применении нейронной сети. Показано, что с применением нейросетевой настройки генетического управляющего алгоритма достигается синергетический эффект, когда в целом параметры, достигаемые при управлении объектом с помощью разных модификаций алгоритма являются худшими по сравнению с параметрами, достигаемыми с помощью составного алгоритма, который подвергается эволюционным и/или мутационным изменениям в процессе функционирования системы.

Дальнейшее развитие работ в этом направлении связывается с разработкой методов рассеяния пространства параметров на подобласти, в которых устанавливаются эволюционные и/или мутационные изменения генетического алгоритма управления, и обоснование оптимальной длительности временного интервала перенастройки генетического алгоритма.

Литература

1. Lofving M., Safsten K., Winroth M. Manufacturing strategy formulation, leadership style and organizational culture in small and medium-sized enterprises // International

- Journal of Manufacturing Technology and Management (IJMTM). 2016. vol. 30. no. 5. pp. 306–325. DOI: 10.1504/IJMTM.2016.078918.
2. Landau I.D., Zito G. *Digital Control Systems, Design, Identification and Implementation*. Springer, 2006. 484 p.
 3. Astrom J., Wittenmark B. *Computer Controlled Systems: Theory and Design*. H.J.: Prentice Hall, 2002. 557 p.
 4. Kilian C.T. *Modern control technology: Components and systems*. Novato, CA: Delmar Thomson Learning, 2000. 608 p.
 5. Babishin V., Taghipour S. Optimal maintenance policy for multicomponent systems with periodic and opportunistic inspections and preventive replacements // *Applied mathematical modelling*. 2016. vol. 40. no. 23. pp. 10480–10505. DOI: 10.1016/j.apm.2016.07.019.
 6. Акименко Т.А., Ларкин Е.В., Богомолов А.В., Привалов А.Н. Модель формирования образа сцены в телевизионном модуле мобильного робота, движущегося по пересеченной местности // *Информационно-управляющие системы*. 2024. № 5(132). С. 16–24. DOI: 10.31799/8853-2024-5-16-24.
 7. Larkin E., Privalov A., Bogomolov A., Akimenko T. Digital control of continuous production with dry friction at actuators // *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2022. vol. 232. pp. 427–436.
 8. Bogomolov A.V., Larkin E.V., Privalov A.N. Mathematical models of software failures of digital control systems // *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics*. 2025. vol. 59. no. 1. pp. 1–8. DOI: 10.3103/S000510552470041.
 9. Ларкин Е.В., Богомолов А.В., Привалов А.Н., Акименко Т.А. Математическое обеспечение иерархического цифрового управления сложным технологическим объектом // *Вестник ЮрГУ. Серия. Математика. Механика. Физика*. 2024. Т. 16. № 4. С. 43–55.
 10. Harada T, Alba E. Parallel genetic algorithms: a useful survey // *ACM Computing Survey*. 2020. vol. 53. no. (4). pp. 1–39. DOI: 10.1145/3400031.
 11. Hedar A., Fukushima M. Simplex coding genetic algorithm for the global optimization of nonlinear functions, in *Multi-Objective Programming and Goal Programming // Advances in Soft Computing*. Springer-Verlag, 2003. pp. 135–140. DOI: 10.1007/978-3-540-36510-5_17.
 12. Helal M.H.S., Fan C.C., Liu D., Yuan S. Peer-to-peer based parallel genetic algorithm // *International Conference on Information, Communication and Engineering (ICICE)*. Xiamen, 2017. pp. 535–538. DOI: 10.1109/ICICE.2017.8478917.
 13. Hu C., Wang X., Mandal M.K., Meng M., Li D. Efficient face and gesture recognition techniques for robot control // *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. IEEE, Montreal, 2003. pp. 1757–1762. DOI: 10.1109/CCECE.2003.1226250.
 14. Jebari K. Selection methods for genetic algorithms // *International Journal of Emerging Sciences*. 2013. no. 3. pp. 333–344.
 15. Hamann A., Racu R., Ernst R. Multi-dimensional robustness optimization in heterogeneous distributed embedded systems // *Proceedings of the 13th IEEE Real Time and Embedded Technology and Applications Symposium, (RTAS'07)*. 2007. pp. 269–280. DOI: 10.1109/RTAS.2007.19.
 16. Briat C. Stability and performance analysis of linear positive systems with delays using input-output methods // *International Journal of Control*. 2018. vol. 91. no. 7. pp. 1669–1692. DOI: 10.1080/00207179.2017.1326628.
 17. Islam M., Chen G., Jin S. An overview of neural network // *American Journal of Neural Network and Application*. 2019. vol. 5. no. 1. pp. 7–11. DOI: 10.11648/j.ajinna.20190501.12.

18. Pavlov A.V. About the equality of the transform of Laplace to the transform of Fourier // *Issues of Analysis*. 2016. vol. 5. no. 4. pp. 21–30.
19. Li J., Farquharson C.G., Hu X. Three effective inverse Laplace transform algorithms for computing time -domain electromagnetic responses // *Geophysics*. 2015. vol. 81. no. 2. DOI: 10.1190/geo2015-0174.1.
20. Meyer-Baese U. *Digital signal processing*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2004. 527 p.
21. Yeh Y.-C., Chu Y., Chiou C.W. Improving the sampling resolution of periodic signals by using controlled sampling interval method // *Computers & Electrical Engineering*. 2014. vol. 40. no. 4. pp. 1064–1071. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2013.12.002.
22. Ang K.N., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design and technology // *IEEE Transactions of control systems technology*. 2005. vol. 13. no. 4. pp. 559–576. DOI: 10.1109/TCST.2005.847331.
23. O’Dwier A. PID compensation of time delay processes 1999-2002: a survey // *Proceedings of the American control conference*. 2003. pp. 1494–1499. DOI: 10.21427/dkx2-9503.

Ларкин Евгений Васильевич — д-р техн. наук, профессор, почетный работник высшего профессионального образования РФ, профессор-консультант кафедры, кафедра «промышленная автоматика и робототехника», Тульский государственный университет. Область научных интересов: теория устойчивости иерархических многоконтурных систем управления сложными технологическими объектами. Число научных публикаций — 350. elarkin@mail.ru; проспект Ленина, 92, 300012, Тула, Россия; р.т.: +7(487)273-4444.

Богомолов Алексей Валерьевич — д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук. Область научных интересов: цифровые технологии сбора и обработки информации. Число научных публикаций — 350. a.v.bogomolov@gmail.com; улица Вавилова, 44/2, 119333, Москва, Россия; р.т.: +7(499)135-6260.

Привалов Александр Николаевич — д-р техн. наук, профессор, директор института, институт передовых информационных технологий, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого. Область научных интересов: методы проектирования программного обеспечения информационных систем, тренажерных систем, компьютерное моделирование, распределённые вычисления. Число научных публикаций — 350. privaloov.61@mail.ru; проспект Ленина, 125а, 300026, Тула, Россия; р.т.: +7(487)235-1488.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 24-29-20256).

E. LARKIN, A. BOGOMOLOV, A. PRIVALOV
**NEURAL NETWORK TUNING OF THE GENETIC ALGORITHM
FOR CONTROLLING A VECTOR HIERARCHICAL SYSTEM**

Larkin E., Bogomolov A., Privalov A. Neural Network Tuning of the Genetic Algorithm for Controlling a Vector Hierarchical System.

Abstract. The article presents the results of a study of a hierarchical two-level vector control system for a multi-connected object whose evolution is described by a state vector that changes in response to actions on actuators, each of which includes a drive and a working mechanism. The control system under consideration is distinguished by the presence of an additional tuning loop for the virtual regulator at the upper and functional-logical levels. A mathematical model of the impulse response of the actuator of the system is synthesized, taking into account dry friction, backlash, and limitations on the speed and position of the working element of the controlled object. The original model of the actuator is presented in the Cauchy form, and its impulse response is approximated by the impulse response of a second-order linear link, optimal according to the criterion of the minimum approximation error. It is proved that the parameters of the linearized impulse response depend on the operating parameters of the drive. A model of a closed control system for the object as a whole is constructed, and it is shown that its parameters depend on the operating parameters of the drives, the desired value of the state vector of the control object, and the parameters of the virtual controllers implemented at the functional-logical and upper hierarchical levels. The obtained results demonstrate that a change in the operating parameters of the object can be compensated for by structural and parametric changes in the genetic control algorithm. A technique for synthesizing a genetic control algorithm for complex multi-loop objects implemented by a controller at the upper level of the hierarchy based on the use of a neural network has been developed. It is shown that the proposed approach ensures the achievement of a synergetic effect, when the control actions implemented by different modifications of the control algorithm are less effective than the control actions implemented using a composite algorithm subject to evolutionary changes during the operation of the system. The correctness of the theoretical positions is confirmed by the results of computational modeling of the virtual controller control using a neural network, which demonstrated a significant improvement in the control characteristics due to a decrease in the time to reach a steady state and the overshoot time.

Keywords: hierarchical control system, vector control, multi-connected object, genetic algorithm, neural network, virtual controller.

References

1. Lofving M., Säfsten K., Winroth M. Manufacturing strategy formulation, leadership style and organizational culture in small and medium-sized enterprises. *International Journal of Manufacturing Technology and Management (IJMTM)*. 2016. vol. 30. no. 5. pp. 306–325. DOI: 10.1504/IJMTM.2016.078918.
2. Landau I.D., Zito G. *Digital Control Systems, Design, Identification and Implementation*. Springer, 2006. 484 p.
3. Astrom J., Wittenmark B. *Computer Controlled Systems: Theory and Design*. H.J.: Prentice Hall, 2002. 557 p.
4. Kilian C.T. *Modern control technology: Components and systems*. Novato, CA: Delmar Thomson Learning, 2000. 608 p.

5. Babishin V., Taghipour S. Optimal maintenance policy for multicomponent systems with periodic and opportunistic inspections and preventive replacements. *Applied mathematical modelling*. 2016. vol. 40. no. 23. pp. 10480–10505. DOI: 10.1016/j.apm.2016.07.019.
6. Akimenko T.A., Larkin E.V., Bogomolov A.V., Privalov A.N. [Model of formation of a scene image in the television module of a mobile robot moving over rough terrain]. *Informacionno-upravljajushhie sistemy – Information and control systems*. 2024. no. 5(132). pp. 16–24. DOI: 10.31799/8853-2024-5-16-24. (In Russ.).
7. Larkin E., Privalov A., Bogomolov A., Akimenko T. Digital control of continuous production with dry friction at actuators. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2022. vol. 232. pp. 427–436.
8. Bogomolov A.V., Larkin E.V., Privalov A.N. Mathematical models of software failures of digital control systems. *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics*. 2025. vol. 59. no. 1. pp. 1–8. DOI: 10.3103/S000510552470041.
9. Larkin E.V., Bogomolov A.V., Privalov A.N., Akimenko T.A. [Mathematical support for hierarchical digital control of a complex technological object]. *Vestnik JurGU. Serija: Matematika. Mehanika. Fizika – Bulletin of YuSU. Series: Mathematics. Mechanics. Physics*. 2024. vol. 16. no. 4. pp. 43–55. (In Russ.).
10. Harada T, Alba E. Parallel genetic algorithms: a useful survey. *ACM Computing Survey*. 2020. vol. 53. no. (4). pp. 1–39. DOI: 10.1145/3400031.
11. Hedar A., Fukushima M. Simplex coding genetic algorithm for the global optimization of nonlinear functions, in *Multi-Objective Programming and Goal Programming. Advances in Soft Computing*. Springer-Verlag, 2003. pp. 135–140. DOI: 10.1007/978-3-540-36510-5_17.
12. Helal M.H.S., Fan C.C., Liu D., Yuan S. Peer-to-peer based parallel genetic algorithm. *International Conference on Information, Communication and Engineering (ICICE)*. Xiamen, 2017. pp. 535–538. DOI: 10.1109/ICICE.2017.8478917.
13. Hu C., Wang X., Mandal M.K., Meng M., Li D. Efficient face and gesture recognition techniques for robot control. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. IEEE, Montreal, 2003. pp. 1757–1762. DOI: 10.1109/CCECE.2003.1226250.
14. Jebari K. Selection methods for genetic algorithms. *International Journal of Emerging Sciences*. 2013. no. 3. pp. 333–344.
15. Hamann A., Racu R., Ernst R. Multi-dimensional robustness optimization in heterogeneous distributed embedded systems. *Proceedings of the 13th IEEE Real Time and Embedded Technology and Applications Symposium, (RTAS'07)*. 2007. pp. 269–280. DOI: 10.1109/RTAS.2007.19.
16. Briat C. Stability and performance analysis of linear positive systems with delays using input-output methods. *International Journal of Control*. 2018. vol. 91. no. 7. pp. 1669–1692. DOI: 10.1080/00207179.2017.1326628.
17. Islam M., Chen G., Jin S. An overview of neural network. *American Journal of Neural Network and Application*. 2019. vol. 5. no. 1. pp. 7–11. DOI: 10.11648/j.ajnn.20190501.12.
18. Pavlov A.V. About the equality of the transform of Laplace to the transform of Fourier. *Issues of Analysis*. 2016. vol. 5. no. 4. pp. 21–30.
19. Li J., Farquharson C.G., Hu X. Three effective inverse Laplace transform algorithms for computing time -domain electromagnetic responses. *Geophysics*. 2015. vol. 81. no. 2. DOI: 10.1190/geo2015-0174.1.
20. Meyer-Baese U. *Digital signal processing*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2004. 527 p.

21. Yeh Y.-C., Chu Y., Chiou C.W. Improving the sampling resolution of periodic signals by using controlled sampling interval method. *Computers & Electrical Engineering*. 2014. vol. 40. no. 4. pp. 1064–1071. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2013.12.002.
22. Ang K.N., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design and technology. *IEEE Transactions of control systems technology*. 2005. vol. 13. no. 4. pp. 559–576. DOI: 10.1109/TCST.2005.847331.
23. O’Dwier A. PID compensation of time delay processes 1999-2002: a survey. *Proceedings of the American control conference*. 2003. pp. 1494–1499. DOI: 10.21427/dkx2-9503.

Larkin Eugene — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Professor-consultant of the department, Department of industrial automation and robotics, Tula State University. Research interests: stability theory of hierarchical multi-loop control systems for complex technological objects. The number of publications — 350. elarkin@mail.ru; 92, Lenin Ave., 300012, Tula, Russia; office phone: +7(487)273-4444.

Bogomolov Aleksey — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Leading researcher, Federal Research Center «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Sciences. Research interests: digital technologies for collecting and processing information. The number of publications — 350. a.v.bogomolov@gmail.com; 44/2, Vavilova St., 119333, Moscow, Russia; office phone: +7(499)135-6260.

Privalov Aleksandr — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Director of the institute, Institute of advanced information technologies, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University. Research interests: methods of designing software for information systems, training systems, computer modeling, distributed computing. The number of publications — 350. privaloov.61@mail.ru; 125a, Lenin Ave., 300026, Tula, Russia; office phone: +7(487)235-1488.

Acknowledgements. This research is supported by Russian Science Foundation (project No. 24-29-20256).