

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 62-503.56

Анатолий Анатольевич Анисимов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры электроники и микропроцессорных систем, Россия, Иваново, e-mail: anis-2012@yandex.ru

Марк Евгеньевич Сороковнин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, ассистент кафедры электроники и микропроцессорных систем, Россия, Иваново, e-mail: marki_1997@mail.ru

Сергей Вячеславович Тарарыкин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры электроники и микропроцессорных систем, Россия, Иваново, e-mail: tsv@ispu.ru

Повышение точности идентификации и настройки линейных систем с регуляторами состояния при помощи искусственной нейронной сети¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. Высокие потенциальные возможности систем управления с регуляторами состояния могут быть реализованы только при наличии средств автоматической настройки. Так как настройка проводится в режиме реального времени, предъявляющем повышенные требования к быстродействию, для снижения ее длительности предлагается использовать искусственную нейронную сеть. Однако в условиях воздействия помех в каналах измерения качество идентификации параметров объекта управления существенно снижается. В связи с этим целью исследования является поиск оптимального состава каналов измерения на входе сети, позволяющего минимизировать влияние помех на оценки параметров объекта для улучшения качества настройки.

Материалы и методы. Для построения векторно-матричной модели объекта и синтеза регулятора состояния использованы методы пространства состояний. Для решения задачи идентификации параметров векторно-матричной модели использована радиальная искусственная нейронная сеть. Обучение сетей, исследование эффективности их работы, а также построение моделей осуществлено при помощи средств программного комплекса MatLab.

Результаты. Разработана методика выбора оптимального состава каналов измерения, дающего максимальное отношение сигнал-шум, и формирования соответствующей структуры радиальной искусственной нейронной сети для решения задач идентификации параметров объекта и настройки системы управления с регулятором состояния. Для оценки мощности информационных сигналов на входах нейронной сети предложено использовать функции чувствительности координат состояния объекта управления к изменению его параметров.

¹Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ №075-03-2023-025 (1/23).

The study is conducted within the framework of the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 075-03-2023-025 (1/23).

Выводы. Результаты проведенных вычислительных экспериментов подтвердили эффективность разработанной методики, позволяющей повысить точность идентификации и настройки систем с регуляторами состояния в условиях действия помех. Полученные результаты могут использоваться для обеспечения заданного качества управления при параметрической неопределенности объекта.

Ключевые слова: мехатронная система, регулятор состояния, идентификация параметров, настройка линейных систем, радиальная искусственная нейронная сеть, функции чувствительности системы

Anatoly Anatolievich Anisimov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Postdoctoral degree), Professor of Electronics and Microprocessor Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: anis-2012@yandex.ru

Mark Evgenievich Sorokovnin

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student, Teaching Assistant of Electronics and Microprocessor Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: marki_1997@mail.ru

Sergey Vyacheslavovich Tararykin

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Postdoctoral degree), Professor of Electronics and Microprocessor Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: tsv@ispu.ru

Improving the accuracy of identification and tuning of linear systems with state controllers using an artificial neural network

Abstract

Background. High potential capabilities of control systems with state controllers can be realized only if automatic tuning tools are available. Since the tuning is carried out in real-time mode, which places increased demands on performance, it is proposed to use an artificial neural network to reduce its duration. However, under the conditions of noise in the measurement channels, the quality of identification of the parameters of the control object is significantly reduced. In this regard, the aim of the study is to find the optimal composition of measurement channels at the network input, which allows minimizing the influence of noise on the estimates of object parameters to improve the quality of tuning.

Materials and methods. During the study, state space methods are used to design a vector-matrix model of an object and synthesize a state controller. A radial artificial neural network is used to solve the problem of identifying the parameters of a vector-matrix model. The training of networks, the study of the effectiveness of their work, as well as the development of models is carried out using the tools of the MatLab software package.

Results. The authors have developed the method to select the optimal composition of measurement channels which gives the maximum signal-to-noise ratio and forming the corresponding structure of a radial artificial neural network to solve the problems of object parameters identification and control system tuning with state controller. It is proposed to use the sensitivity functions of the state coordinates of control object parameters variation to estimate power of information signals at the inputs of neural network.

Conclusions. The results of the conducted computational experiments have confirmed the effectiveness of the developed method, which makes it possible to increase the accuracy of identification and tuning of systems with state regulators under noise conditions. The obtained results can be used to ensure a given quality of control with parametric uncertainty of the object.

Key words: mechatronic system, state controller, parameter identification, linear system tuning, radial artificial neural network, system sensitivity functions

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.6.057-068

Введение. В настоящее время повышение качества управления линейными системами, в том числе мехатронными (МС), во многих случаях обеспечивается за счет применения регуляторов состояния (РС), эффективность которых объясняется повышенным числом степеней свободы, т. е. количеством настраиваемых параметров, а проектирование осуществляется известными методами модального или оптимального синтеза.

Вместе с тем высокие потенциальные возможности систем с регуляторами состояния могут быть реализованы только при наличии средств автоматической настройки на реальном объекте управления [1, 2]. Необходимость

настройки РС связана с неопределенностью параметров большинства реальных систем, значения которых могут существенно меняться в процессе эксплуатации, а также погрешностями идентификации объектов.

Автоматическая настройка систем управления проводится в режиме реального времени, что предъявляет повышенные требования к быстродействию и сходимости применяемых алгоритмов. При этом наиболее распространенные в настоящее время итерационные методы настройки, основанные на алгоритмах численной оптимизации, требуют проведения большого количества экспериментов на реальном объекте управления [1].

Ранее для снижения длительности настройки было предложено использовать искусственную нейронную сеть (ИНС), позволяющую проводить идентификацию объекта и синтез регулятора по одной динамической характеристике системы во временной области [2]. Однако данный способ настройки был ориентирован на системы с динамическими (полиномиальными) регуляторами и не учитывал особенностей идентификации матричных моделей в пространстве состояний.

В условиях воздействия помех в каналах измерения качество идентификации параметров объекта управления как классическими, так и интеллектуальными методами существенно снижается. В связи с этим при проведении идентификации возникает задача оптимального выбора координат состояния объекта, позволяющего минимизировать влияние помех на оценки параметров.

Для сравнения эффективности доступных каналов измерения предлагается использовать отношение мощностей информационного сигнала и помехи, причем мощность сигнала определяется с использованием функций чувствительности координат состояния к изменению параметров объекта управления. Для каждого неизвестного параметра находится координата состояния, дающая максимальное отношение сигнал-шум, после чего формируется оптимальное сочетание координат на входе ИНС, обеспечивающее наиболее точные оценки в условиях действия помех и, как следствие, наилучший результат настройки системы с РС.

Постановка задачи исследования. Будем рассматривать случай идентификации параметров и настройки системы управления линейным одноканальным объектом известной структуры с регулятором состояния. Синтез системы с РС методом модального управления проводится на основе векторно-матричной модели в пространстве состояний:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}; \quad \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}, \quad (1)$$

где \mathbf{x} – вектор координат состояния с размерностью n ; \mathbf{A} , \mathbf{B} и \mathbf{C} – матрицы состояния, входа и выхода с размерностями $n \times n$, $n \times 1$ и $1 \times n$ соответственно; \mathbf{y} – выходной сигнал объекта; \mathbf{u} – управляющее воздействие, определяемое как $\mathbf{u} = \mathbf{y}_r - \mathbf{K} \cdot \mathbf{x}$ (где \mathbf{y}_r – задающее воздействие; $\mathbf{K} = [k_1, k_2, \dots, k_n]$ – вектор параметров РС).

В процессе настройки проводится идентификация неизвестных параметров объекта управления по динамическим характеристикам во временной области, снятым для одной или нескольких координат состояния, и формируются оценки матриц \mathbf{A} , \mathbf{B} и \mathbf{C} . Для идентификации применяется предварительно обученная радиальная ИНС, позволяющая опе-

ративно получать оценки параметров линейной системы по результатам единственного эксперимента [2].

Параметрический синтез и настройка РС осуществляется по полученным оценкам матриц \mathbf{A} и \mathbf{B} методом модального управления на основе желаемого характеристического полинома замкнутой системы $D(s) = s^n + \dots + d_1s + d_0$. При этом расчет параметров РС реализуется программно по формулам [3] в канонической форме управляемости с последующим преобразованием в реальные координаты объекта управления.

Поставим задачу повышения точности идентификации и настройки линейной системы управления с РС при воздействии помех случайного характера путем выбора оптимального состава каналов измерения координат состояния объекта и формирования соответствующей структуры радиальной искусственной нейронной сети.

В качестве критерия оптимальности при выборе каналов измерения будем использовать отношения мощности несущих информацию сигналов к мощности помех на входах ИНС. При этом для оценки мощности информационных сигналов используем функции чувствительности координат состояния к изменению параметров объекта.

Принципы идентификации объекта и настройки системы с использованием радиальной ИНС. В целях снижения длительности настройки линейной системы с РС (рис. 1) предлагается идентификационный метод, основанный на применении ИНС [2, 4, 5].

На вход объекта управления подается тестовый сигнал известной формы, позволяющий провести идентификацию. Полученные в результате дискретные значения динамических характеристик по координатам состояния поступают на входы ИНС, которая дает оценки неизвестных параметров модели (1). На основе оценок матриц \mathbf{A} и \mathbf{B} в блоке настройки выполняется расчет параметров РС методом модального управления с использованием формул [3].

Поскольку применяемая ИНС не обладает свойством памяти, при идентификации на вход сети подаются дискретизированные по времени значения динамических характеристик системы. Структура преобразователя координат состояния приведена на рис. 1, где $\tilde{\mathbf{C}} = [\mathbf{C}_1; \mathbf{C}_2; \dots; \mathbf{C}_m]$ – матрица выбора выходов размерностью $m \times n$, строки которой – двоичные коды с единичным весом; $\tilde{\mathbf{x}}_1, \tilde{\mathbf{x}}_2, \dots, \tilde{\mathbf{x}}_m$ – векторы дискретных значений сигнала на входах ИНС; m – число используемых для идентификации каналов измерения; q_1, \dots, q_l – оценки параметров объекта на выходах ИНС.

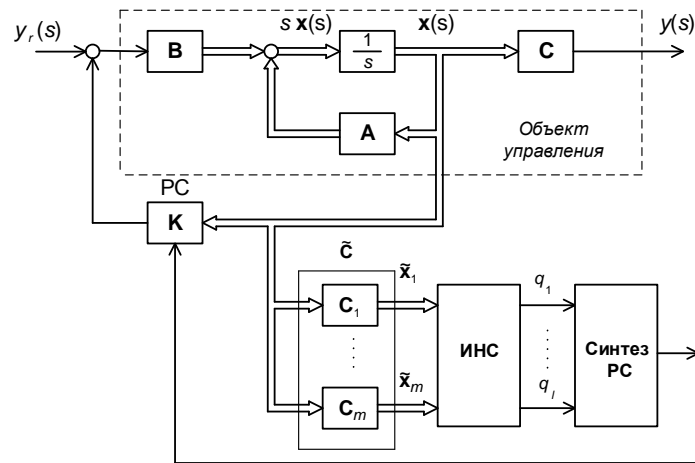


Рис. 1. Структурная схема системы управления на основе РС с настройкой при помощи ИНС

Обобщенная структура радиальной ИНС прямого распространения типа HRBF (Hyper Radial Basis Functions), применяемой для идентификации параметров объекта в соответствии с рекомендациями [2, 6–8], состоит из двух слоев – 1-го (скрытого) и 2-го (внешнего), причем нейроны 1-го слоя реализуют радиальные базисные функции (RBF) Гаусса $\phi_g(\tilde{\mathbf{x}})$:

$$\phi_g(\tilde{\mathbf{x}}) = \exp[-(\tilde{\mathbf{x}} - \mathbf{r}_g)^T \mathbf{Q}_g^T \mathbf{Q}_g (\tilde{\mathbf{x}} - \mathbf{r}_g)], \quad (2)$$

где $\tilde{\mathbf{x}} = [\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_m]$; \mathbf{r}_g – вектор центров g -го нейрона; \mathbf{Q}_g – диагональная матрица коэффициентов дисперсии.

Каждому нейрону RBF соответствует множество значений $\tilde{\mathbf{x}}$, образующее кластер. Центр кластера определяется вектором \mathbf{r}_g , а его размеры – матрицей \mathbf{Q}_g . Функции активации нейронов 2-го (внешнего) слоя являются линейными и вычисляют взвешенную сумму входных сигналов:

$$q_j = w_0 + \sum_{g=1}^K w_g \phi_g(\tilde{\mathbf{x}}),$$

где K – число нейронов 1-го (скрытого) слоя (базисных функций); $\mathbf{w} = (w_0, w_1, \dots, w_K)$ – вектор весовых коэффициентов.

Согласно (2), уровень информационного сигнала на входе g -го нейрона 1-го (скрытого) слоя ИНС определяется величиной усредненной суммы квадратов разности (невязки) вектора дискретных значений динамической характеристики $\tilde{\mathbf{x}}$ и вектора центра \mathbf{r}_g при вариации параметров объекта управления.

В связи с этим для оценки эффективности канала измерения координаты x_i при идентификации предлагается использовать функции чувствительности координат состояния к изменению определяемых параметров объекта управления [9, 10, 11]. При малых и средних (до 100 %) вариациях параметров энергетиче-

ский интеграл функции чувствительности позволяет достаточно точно оценить соотношение мощностей информационных сигналов, поступающих на входы ИНС.

Функция чувствительности выходной величины динамической системы $x_i(t, q_1, \dots, q_l)$ к вариациям постоянных или медленно изменяющихся параметров q_j в окрестности номинального режима, характеризуемого точкой $Q^0(q_1^0, \dots, q_l^0)$ пространства параметров системы, находится при помощи частных производных:

$$U_{ij}(t, Q^0) = \left. \frac{\partial x_i(t, q_1, \dots, q_l)}{\partial \ln q_j} \right|_{Q^0},$$

где $i = 1, \dots, n$; n – число координат состояния; $j = 1, 2, \dots, l$; l – число переменных параметров системы.

Для определения функции чувствительности в линейной динамической системе наиболее удобно использовать структурный метод, предполагающий построение модели чувствительности [10]. Точки чувствительности, при помощи которых вычисляются соответствующие функции, находятся непосредственно на структурной схеме динамической модели исходной системы. Таким образом, появляется возможность одновременно определить все функции чувствительности по одной динамической модели (рис. 2).

Согласно данному методу, функция чувствительности получается в результате воздействия выхода исследуемого объекта y на систему, состоящую из последовательного соединения двух блоков, передаточные функции которых имеют вид:

$$\frac{\partial \ln H_i}{\partial \ln H_j} = B_{ij}(s); \quad \frac{\partial \ln H_j}{\partial \ln q_j} = C_j(s),$$

где H_i – передаточная функция от входа объекта до канала измерения координаты состояния, исследуемой на чувствительность; H_j – передаточная функция звена, содержащего параметр q_j , относительно которого определяется чувствительность.

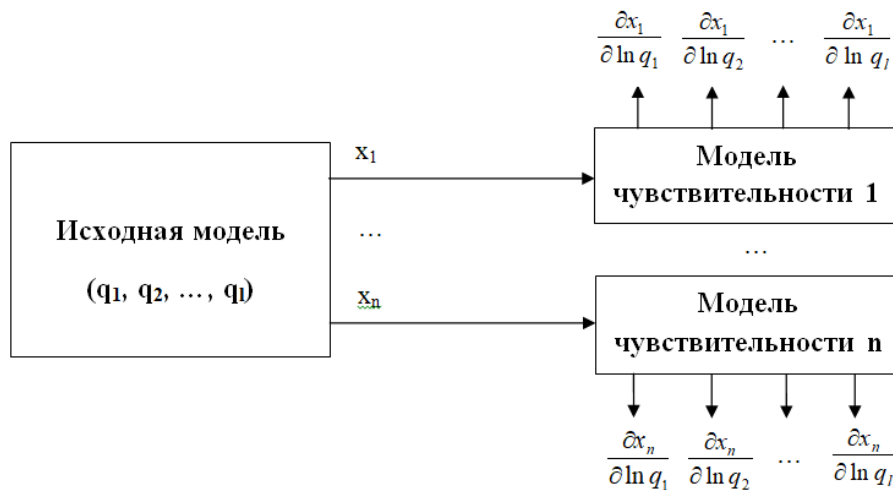


Рис. 2. Динамическая модель для определения функций чувствительности

Итоговое выражение для функции чувствительности принимает вид

$$U_{ij}(s, Q^0) = x_i(s, q_1, \dots, q_l) B_{ij}(s) C_j(s).$$

Очевидно, что функция $B_{ij}(s)$ зависит от структуры объекта, а функция $C_j(s)$ – от структуры звена H_j . В многоконтурной системе все передаточные функции $B_{ij}(s)$ реализуются при помощи структуры исследуемого объекта, формируя точки чувствительности (рис. 2). Для определения функций чувствительности на структурной схеме достаточно сигналы от точек чувствительности подать на блоки, имеющие соответствующие передаточные функции $C_j(s)$.

В качестве количественной оценки мощности информационного сигнала координаты состояния x_i , поступающего на вход ИНС при идентификации параметра объекта q_j , целесообразно использовать усредненный интеграл квадрата функции чувствительности:

$$Sx_i(q_j) = \frac{1}{T} \int_0^T U_{ij}^2(t, Q^0) dt, \quad (3)$$

где T – интервал времени измерения.

Пусть каждый из доступных каналов измерения координат состояния объекта x_i обозначается двоичным кодом \mathbf{C}_i с единичным весом разрядностью n , где единица располагается в i -м разряде. Тогда матрица выбора выхода $\tilde{\mathbf{C}}$ состоит из m строк и n столбцов: $\tilde{\mathbf{C}} = [\mathbf{C}_1; \mathbf{C}_2; \dots; \mathbf{C}_m]$.

Рассмотрим сначала случай определения оптимальной координаты состояния и соответствующей матрицы $\tilde{\mathbf{C}}(q_j)$ при идентификации отдельного параметра объекта q_j . В условиях воздействия широкополосных некоррелированных помех $n_i(t)$ в каналах измерения в качестве критерия оптимальности при идентификации q_j предлагается использовать отношение оценок

мощности информационного сигнала $Sx_i(q_j)$ и помехи Sn_i :

$$F_i\{q_j\} = \frac{Sx_i(q_j)}{Sn_i}, \quad (4)$$

где величина Sn_i определяется по формуле

$$Sn_i = \frac{1}{T} \int_0^T n_i^2(t) dt.$$

При известной дисперсии широкополосной помехи $\sigma_n^2(x_i)$ можно принять $Sn_i = \sigma_n^2(x_i)$. Тогда оптимальное значение матрицы выбора координаты состояния $\tilde{\mathbf{C}}(q_j) \in \{\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \dots, \mathbf{C}_m\}$ при идентификации параметра объекта q_j будет соответствовать максимальному значению критерия $F_i(q_j)$.

В более общем случае идентификации ряда параметров динамического объекта q_1, \dots, q_l , оказывающих перекрестное влияние на координаты состояния x_1, \dots, x_n , предлагается объединение на входе ИНС оптимальных для каждого отдельного параметра каналов измерения:

$$\tilde{\mathbf{C}}(q_1, q_2, \dots, q_l) = [\tilde{\mathbf{C}}(q_1); \tilde{\mathbf{C}}(q_2); \dots; \tilde{\mathbf{C}}(q_l)].$$

Поскольку оптимальные значения матриц выбора координаты $\tilde{\mathbf{C}}(q_j)$ для различных параметров объекта могут совпадать, общее число поступающих на входы ИНС координат состояния m лежит в диапазоне $1 \leq m \leq l$.

Таким образом, задача оптимизации структуры устройства идентификации заключается в определении оптимального канала измерения координат состояния для каждого из определяемых параметров объекта и объединение этих каналов на входах нейронов 1-го слоя радиальной ИНС.

Алгоритм оптимизации размещения каналов измерения в задаче идентификации параметров. Перед началом оптимизации структуры идентификатора необходимо определить доступные каналы измерения координаты

нат, а также уровень помех в каждом из них. В связи с этим предлагается следующий алгоритм оптимизации размещения каналов измерения в задаче идентификации параметров мехатронной системы с применением ИНС.

Шаг 1. Определить виды двоичной матрицы \mathbf{C}_i , соответствующие доступным каналам измерения координат состояния системы $i = 1, 2, \dots, n$: $\mathbf{C}_1 = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$, $\mathbf{C}_2 = [0 \ 1 \ \dots \ 0]$, ..., $\mathbf{C}_n = [0 \ 0 \ \dots \ 1]$.

Шаг 2. Составить модель чувствительности координат состояния объекта управления x_1, x_2, \dots, x_n к вариации параметров q_1, q_2, \dots, q_l , подлежащих идентификации.

Шаг 3. Выполнить вычисление функций чувствительности с использованием полученной модели, а также значения интеграла $Sx_i(q_j)$ по формуле (3) для каждого переменного параметра q_j и канала измерения координаты x_i при $i = 1, 2, \dots, n$ и $j = 1, 2, \dots, l$.

Шаг 4. Определить мощность помех Sn_i в каналах измерения координат x_i при $i = 1, 2, \dots, n$, для каждого переменного параметра объекта q_j при $j = 1, 2, \dots, l$ вычислить значения критерия оптимальности $F_i\{q_j\}$ по формуле (4).

Шаг 5. Для каждого переменного параметра объекта q_j при $j = 1, 2, \dots, l$ найти оптимальную координату состояния и соответствующий вид матрицы выбора выхода $\tilde{\mathbf{C}}(q_j)$, дающий максимум критерия $F_i\{q_j\}$.

Шаг 6. Выполнить объединение наиболее эффективных каналов измерения координат для множества переменных параметров объекта управления q_1, q_2, \dots, q_l , определить оптимальную структуру идентификатора.

Шаг 7. Составить обучающую выборку ИНС, представляющую собой массив динамических характеристик, путем вариации параметров в заданных пределах и моделирования объекта управления.

Шаг 8. Выполнить формирование и обучение ИНС радиального типа по вектору коор-

динат состояния объекта управления, дающих для каждого параметра оптимальное значение критерия $F_i\{q_j\}$.

Для формирования структуры радиальной ИНС целесообразно использовать адаптивный алгоритм *newrb*, входящий в состав программного комплекса MatLab, позволяющий оптимизировать количество нейронов 1-го слоя сети и координаты их центров. В процессе обучения алгоритм добавляет в структуру сети новые нейроны до тех пор, пока максимальная ошибка аппроксимации данных обучающей выборки не станет меньше заданной малой величины.

Обучающая выборка радиальной ИНС представляет собой массив значений переходных характеристик, полученных при вариации переменных параметров объекта управления. Для успешного обучения ИНС при формировании выборки рекомендуется варьировать независимые параметры модели объекта методом Монте-Карло, предварительно определив диапазон их возможных изменений на основе априорной информации.

Примеры идентификации и настройки линейных систем с использованием ИНС.

Для исследования эффективности предлагаемой методики идентификации и настройки использовалась МС постоянного тока с жесткой связью двигателя и рабочего органа [12], структура которой приведена на рис. 3, где I и Ω – ток якоря и скорость двигателя; J – момент инерции двигателя; C – конструктивный параметр двигателя; T_a , R_a и L_a – постоянная времени, сопротивление и индуктивность якорной цепи; $K_{сп} = 7,5$ и $T_{сп} = 0,01$ с – коэффициент передачи и постоянная времени силового преобразователя.

Пренебрегая малой постоянной времени $T_{сп}$, получаем матричную модель объекта управления в координатах состояния $\mathbf{x} = [I \ \Omega]$:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -R_a/L_a & -C/L_a \\ C/J & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} K_{сп}/L_a \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{C} = [0 \ 1].$$

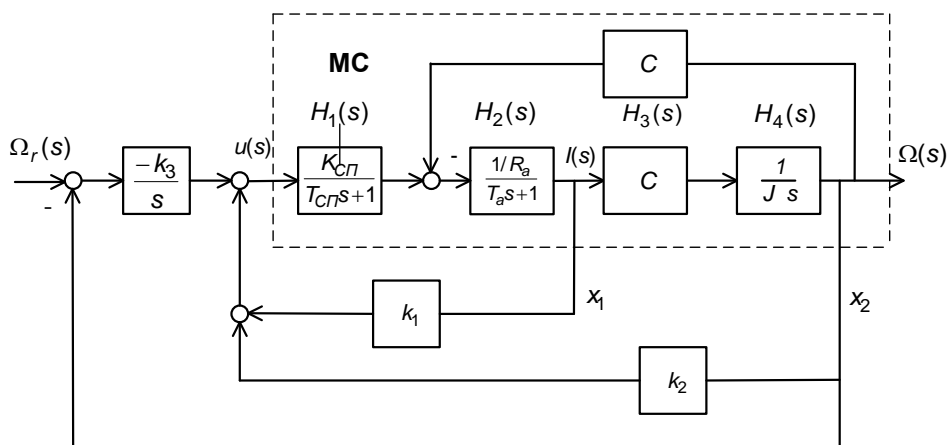


Рис. 3. Структурная схема системы управления мехатронным объектом с РС

В качестве переменных параметров МС, определяемых при идентификации посредством радиальной ИНС, были приняты J и R_a .

На основе линейной модели МС как объекта управления (рис. 3) были найдены все составляющие функции чувствительности по координатам состояния относительно варьируемых параметров (табл. 1), после чего получены соответствующие точки чувствительности на структурной схеме и построена модель чувствительности (рис. 4).

В качестве первого примера в соответствии с предложенной методикой была проведена оптимизация структуры радиальной ИНС, предназначенной для идентификации МС1 (см. рис. 3) с базовыми значениями параметров $J = 0,01$ кг·м², $R_a = 1,6$ Ом, $L_a = 70,4$ мГн, $C = 2,17$ Вб при одинаковом уровне помех в каналах измерения координат состояния: $\sigma_n^2(x_1) = \sigma_n^2(x_2) = 10$ мВт.

Согласно разработанному алгоритму формирования оптимальной структуры ИНС (шаг 1), был определен вид матрицы выхода \tilde{C} для каждого канала измерения координат состояния и их сочетания: $[0 \ 1]$, $[1 \ 0]$ и $[0 \ 1; \ 1 \ 0]$.

Затем (шаг 2) была составлена и реализована в среде *Simulink* модель чувствительно-

сти координат состояния МС $x_1 = I(s)$ и $x_2 = \Omega(s)$ к изменению параметров J и R_a , структура которой приведена на рис. 4.

С использованием полученной модели (шаг 3) были вычислены функции чувствительности объекта управления $U_\Omega(J)$, $U_\Omega(R_a)$ и $U_I(J)$, $U_I(R_a)$, а также интегральные оценки мощности информационных сигналов $Sx_i(J)$ и $Sx_i(R_a)$ для каналов измерения координат x_1 и x_2 (табл. 2).

Затем (шаг 4) при одинаковой мощности помех в каналах измерения координат $Sn(x_1) = Sn(x_2) = 10$ мВт по формуле (4) были вычислены значения критериев оптимальности $F_i\{J\}$ и $F_i\{R_a\}$ при $i = 1, 2$ (табл. 2).

Максимальные значения $F_i\{J\}$ и $F_i\{R_a\}$ дает координата состояния $x_2 = \Omega$, что соответствует оптимальной матрице $\tilde{C} = [0 \ 1]$ (шаг 5), объединения каналов измерения (шаг 6) в данном случае не требуется.

Обучающая выборка ИНС (шаг 7) была сформирована путем вариации параметров МС1 J и R_a в пределах $\pm 50\%$ от номинальных значений методом Монте-Карло. Выборка представляет собой массивы из 150 переходных характеристик для каждой из координат состояния объекта, выбранных для обучения сети, с шагом дискретизации по времени $T_0 = 0,01$ с.

Таблица 1. Определение функций чувствительности мехатронной системы

Функция чувствительности	$U_I(J)$	$U_I(R_a)$	$U_\Omega(J)$	$U_\Omega(R_a)$
$x_i(s)$	$x_1 = I(s)$	$x_1 = I(s)$	$x_2 = \Omega(s)$	$x_2 = \Omega(s)$
q_j	$q_1 = J$	$q_2 = R_a$	$q_1 = J$	$q_2 = R_a$
$B_{ij}(s)$	$\frac{H_2 H_3^2 H_4}{1 + H_2 H_3^2 H_4}$	$\frac{1}{1 + H_2 H_3^2 H_4}$	$\frac{1}{1 + H_2 H_3^2 H_4}$	$\frac{1}{1 + H_2 H_3^2 H_4}$
$C_j(s)$	-1	$-\frac{R_a}{L_a s + R_a}$	-1	$-\frac{R_a}{L_a s + R_a}$

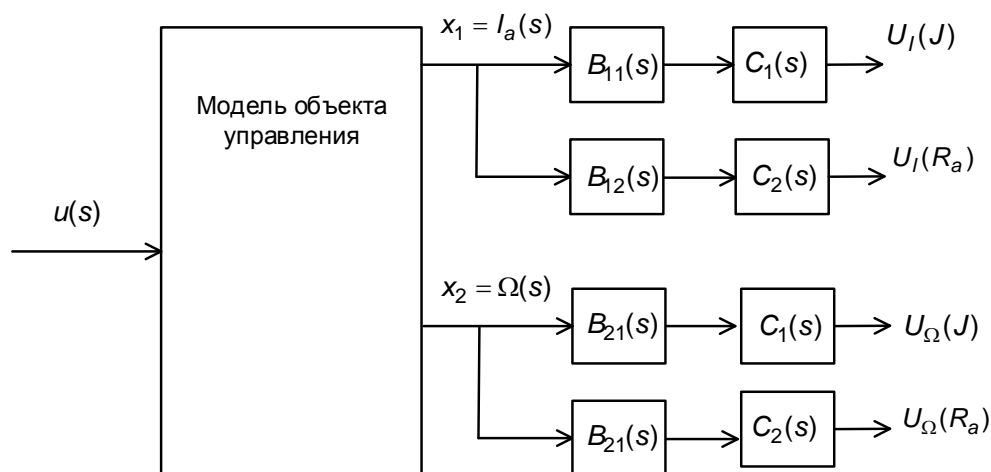


Рис. 4. Модель чувствительности мехатронной системы

Таблица 2. Значения мощности функций чувствительности, мощности помех, отношений сигнал-шум и погрешностей идентификации параметров МС

\tilde{C}	$S_{x_i}(J)$ $\times 10^{-3}$	$S_{x_i}(R_a)$ $\times 10^{-3}$	$S_{n(x_i)}$ $\times 10^{-3}$	$F_i(J)$	$F_i(R)$	$\hat{\sigma}(J)$ $\times 10^{-2}$	$\hat{\sigma}(R_a)$ $\times 10^{-2}$
Пример 1: МС1							
[1 0]	40,64	2,82	10	4,064	0,282	2,581	71,88
[0 1]	279,40	22,09	10	27,94	2,209	1,808	5,385
[1 0; 0 1]	40,64; 279,4	2,82; 22,09	10; 10	4,064; 27,94	0,282; 2,209	2,689	8,547
Пример 2: МС2							
[1 0]	168,1	106,4	10	16,81	10,64	1,195	1,889
[0 1]	51,1	42,8	10	5,11	4,28	16,56	20,944
[1 0; 0 1]	168,1; 51,1	106,4; 42,8	10; 10	16,81; 5,11	10,64; 4,28	1,635	1,938
Пример 3: МС3, опыт 1							
[1 0]	82,3	25,27	150	0,5487	0,1685	17,93	25,86
[0 1]	108,8	44,77	25	4,352	1,7908	1,955	4,496
[1 0; 0 1]	82,3; 108,8	25,27; 44,77	150; 25	0,548; 4,352	0,168; 1,791	14,05	9,963
Пример 3: МС3, опыт 2							
[1 0]	82,3	25,27	25	3,292	1,011	5,815	2,785
[0 1]	108,8	44,77	150	0,7253	0,2985	18,32	21,55
[1 0; 0 1]	82,3; 108,8	25,27; 44,77	25; 150	3,292; 0,725	1,011; 0,298	9,888	13,31

В целях проверки адекватности результатов оптимизации для каждого сочетания каналов измерения координат состояния МС1 были сформированы соответствующие варианты радиальной ИНС (шаг 8). При обучении ИНС использовалась функция *newrb* комплекса *MatLab* (P, T, GOAL, SPREAD, где P – обучающая выборка; T – массив значений параметров объекта; GOAL = 10^{-5} – допустимая среднеквадратичная ошибка; SPREAD = 0,5 – дисперсия радиальных базисных функций).

Качество идентификации при помощи сформированных вариантов ИНС определялось с использованием тестовой выборки, по структуре аналогичной обучающей. В данном случае на сигналы координат состояния были наложены помехи случайного характера с указанной в табл. 2 дисперсией. Среднеквадратичские значения относительных погрешностей идентификации параметров мехатронной системы J и R_a , $\hat{\sigma}(J)$ и $\hat{\sigma}(R_a)$ соответственно, полученные на тестовой выборке, приведены в табл. 2.

Полученные при помощи различных структур ИНС варианты распределения оценок переменных параметров МС1 в относительных единицах, а также регрессионные модели этих распределений приведены на рис. 5, где графики а соответствуют матрице $\tilde{C} = [1 \ 0]$, графики б – матрице $\tilde{C} = [0 \ 1]$, графики в – матрице $\tilde{C} = [0 \ 1; 1 \ 0]$.

В качестве второго примера в соответствии с предложенной методикой была проведена оптимизация структуры радиальной ИНС для идентификации МС2 (см. рис. 3) с базовыми значениями параметров $J = 0,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $R_a = 1,6 \text{ Ом}$, $L_a = 70,4 \text{ мГн}$, $C = 3,17 \text{ Вб}$ при одинаковом уровне помех в каналах измерения.

Анализ приведенных в табл. 2 данных показывает, что для рассмотренных примеров максимальные значения критериев оптимальности $F_i\{J\}$ и $F_i\{R_a\}$ соответствуют минимальным значениям погрешностей идентификации соответствующих параметров.

Сочетание каналов измерения во всех рассмотренных случаях статистически значимого эффекта не дает, поскольку для каждой системы одна и та же координата ($x_2 = \Omega$ для МС1, $x_1 = I$ для МС2) обеспечивает максимальный уровень сигнала при идентификации как момента инерции J , так и сопротивления якорной цепи R_a .

В качестве третьего примера в соответствии с предложенной методикой была проведена оптимизация структуры радиальной ИНС для идентификации МС3 (см. рис. 3) с базовыми значениями параметров $J = 0,06 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $R_a = 1,6 \text{ Ом}$, $L_a = 70,4 \text{ мГн}$, $C = 2,17 \text{ Вб}$ при различном уровне помех в каналах измерения σ_n^2 : 150 мВт и 25 мВт.

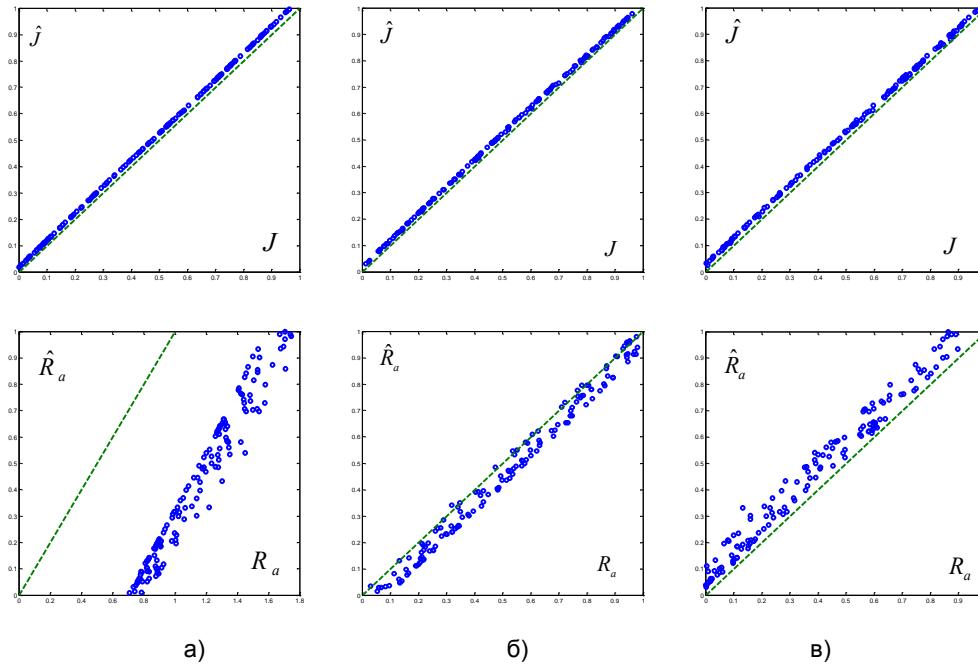


Рис. 5. Распределения оценок параметров МС1 при одинаковом уровне помех

Как показывает анализ полученных данных, при близких значениях мощности информационных сигналов $Sx_i(J)$ и $Sx_i(R_a)$ оптимальный выбор координаты состояния при проведении идентификации параметров МС3 определяется уровнем помех в каналах измерения (см. табл. 2).

В качестве четвертого примера рассмотрим задачу идентификации двухканального объекта управления, структурная схема которого приведена на рис. 6, где $ko_1 = 1,0$ и $ko_2 = 1,0$ – коэффициенты передачи, $T_1 = 0,15$ с и $T_2 = 0,25$ с – постоянные времени, $k_f = 0,02$ – коэффициент обратной связи.

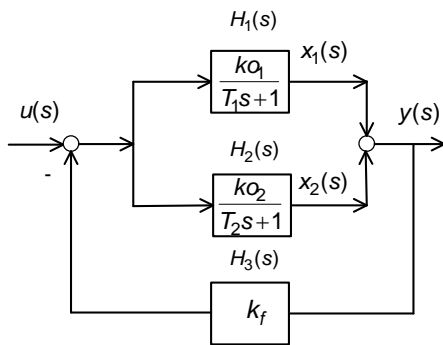


Рис. 6. Структурная схема двухканального объекта управления

Векторно-матричная модель данного двухканального объекта в координатах $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2]$ имеет вид:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{1+k_f ko_1}{T_1} & -\frac{k_f ko_1}{T_1} \\ -\frac{k_f ko_2}{T_2} & -\frac{1+k_f ko_2}{T_2} \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{ko_1}{T_1} \\ \frac{ko_2}{T_2} \end{bmatrix}; \mathbf{C} = [1 \ 1].$$

Для рассматриваемого двухканального объекта были определены функции чувствительности координат состояния x_2 и x_1 относительно параметров $q_1 = T_1$ и $q_2 = T_2$, которые приведены в табл. 3, структура модели чувствительности аналогична приведенной на рис. 4.

По аналогии с предыдущими примерами, для двухканального объекта были вычислены значения критериев оптимальности $F_i\{T_1\}$ и $F_i\{T_2\}$ при одинаковой мощности помех в каналах измерения координат состояния, сформированы обучающие выборки и получены варианты радиальной ИНС, вычислены оценки погрешностей идентификации параметров (табл. 4).

Как показывает анализ приведенных в табл. 4 данных, максимальное значение критерия $F_i\{T_1\}$ дает координата x_1 , а максимальное значение $F_i\{T_2\}$ – координата x_2 . В этих условиях минимальное значение погрешностей идентификации при помощи единой ИНС обоих параметров объекта ($q_1 = T_1$ и $q_2 = T_2$) достигается при использовании двух координат x_1 и x_2 , что соответствует матрице $\tilde{\mathbf{C}} = [0 \ 1; 1 \ 0]$.

Пример настройки мехатронной системы предложенным методом был реализован в форме программы в среде *MatLab*, включающей в себя процедуры идентификации параметров объекта с использованием ИНС и синтеза РС методом модального управления. Полученные параметры РС передаются в среду *Simulink*, где осуществляется моделирование системы и анализ качества управления.

Таблица 3. Определение функций чувствительности двухканального объекта

Функции чувствительности	$U_{x1}(T_1)$	$U_{x1}(T_2)$	$U_{x2}(T_1)$	$U_{x2}(T_2)$
$x_i(s)$	x_1	x_1	x_2	x_2
q_j	$q_1 = T_1$	$q_2 = T_2$	$q_1 = T_1$	$q_2 = T_2$
$B_{ij}(s)$	$\frac{1 + H_2 H_3}{1 + H_1 H_3 + H_2 H_3}$	$-\frac{H_2 H_3}{1 + H_1 H_3 + H_2 H_3}$	$-\frac{H_1 H_3}{1 + H_1 H_3 + H_2 H_3}$	$\frac{1 + H_1 H_3}{1 + H_1 H_3 + H_2 H_3}$
$C_j(s)$	$-\frac{T_1 s}{T_1 s + 1}$	$-\frac{T_2 s}{T_2 s + 1}$	$-\frac{T_1 s}{T_1 s + 1}$	$-\frac{T_2 s}{T_2 s + 1}$

Таблица 4. Значения энергии функции чувствительности, отношения сигнал-шум и погрешности идентификации двухканального объекта управления

\tilde{C}	$S_{x1}(T_1), \times 10^{-5}$	$S_{x1}(T_2), \times 10^{-5}$	$S_n(x_i), \times 10^{-5}$	$F_1(T_1), \times 10^{-2}$	$F_1(T_2), \times 10^{-2}$	$\hat{\sigma}(T_1), \times 10^{-2}$	$\hat{\sigma}(T_2), \times 10^{-2}$
Пример 4							
[0 1]	18,39	0,674	50	36,78	1,348	1,847	30,622
[1 0]	0,301	28,42	50	0,601	56,84	28,539	1,847
[0 1; 1 0]	18,39; 0,301	0,674; 28,42	50; 50	36,78; 0,601	1,348; 56,84	0,802	1,849

Синтез астатической системы управления проводился для объекта, структура которого приведена на рис. 3, базовые значения параметров соответствуют варианту МС3. С использованием характеристического полинома Бесселя $D(s) = s^3 + 2,43 \Omega_0 s^2 + 2,47 \Omega_0^2 s + \Omega_0^3$ при величине $\Omega_0 = 55$ рад/с в результате получены следующие значения параметров РС: $K = [-1,0412 \ -1,6499 \ -43,181]$.

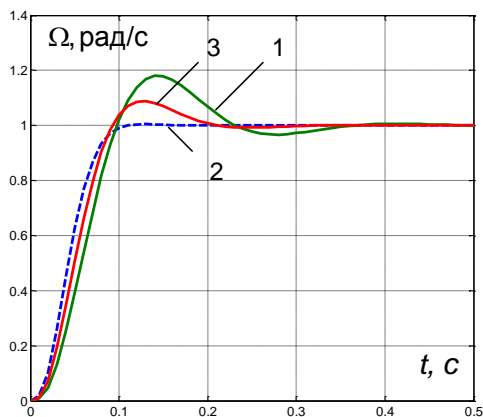
Моделирование процесса настройки астатической системы с РС проводилось в условиях действия в каналах измерения помех с дисперсией $\sigma_n^2(x_1) = 150$ мВт и $\sigma_n^2(x_2) = 25$ мВт при отклонении параметров объекта в пределах $\pm 100\%$ от базовых значений: $J = 0,12$ кг·м² и $R_a = 0,95$ Ом.

В результате идентификации параметров по каналу измерения $x_1 = I$, искаженному интенсивной помехой, были получены следующие

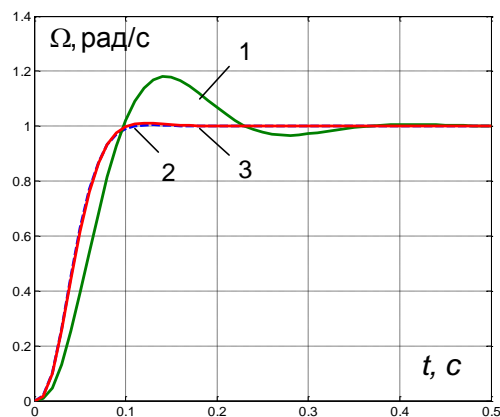
оценки параметров объекта: $J = 0,104$ кг·м² и $R_a = 0,35$ Ом, при этом процедура модального синтеза дает значения коэффициентов РС $K = [-1,2085 \ -3,062 \ -74,625]$.

В результате идентификации по каналу измерения $x_2 = \Omega$, что соответствует оптимальной структуре ИНС, были получены более точные оценки параметров объекта: $J = 0,114$ кг·м² и $R_a = 1,06$ Ом, при этом процедура модального синтеза дает значения коэффициентов РС $K = [-1,1124 \ -3,3892 \ -81,910]$.

Полученные в результате моделирования процессов идентификации и настройки переходные характеристики приведены на рис. 7,а для канала $x_1 = I$ и на рис. 7,б для канала $x_2 = \Omega$, где кривые 1 соответствуют отклонению параметров объекта от базовых значений, кривые 2 – эталонной модели системы, кривые 3 – результатам настройки.



а)



б)

Рис. 7. Переходные характеристики мехатронной системы с РС

Отклонение параметров объекта от расчетных значений приводит к существенному ухудшению качества управления в системе с РС. После идентификации параметров при помощи ИНС и расчета новых параметров РС, несмотря на влияние помех, характеристики системы приближаются к эталонным. При этом использование канала измерения с максимальным отношением сигнал-шум позволяет обеспечить наиболее высокую точность идентификации параметров и качество настройки системы управления.

В заключение следует отметить, что при больших отклонениях определяемых параметров объекта от их номинальных значений интеграл функции чувствительности (3) уже неадекватно отражает мощность информационного сигнала на входе ИНС. Тогда в качестве оценки эффективности координаты x_i при идентификации, может быть, целесообразно использовать сумму квадратов разности векторов переходных характеристик объекта при номинальном и при максимальном значении параметра q_j . Однако это приведет к повышению трудоемкости вычислений по сравнению с предложенной методикой.

Выводы. Таким образом, разработанная методика выбора оптимального состава каналов измерения, дающих максимальное отношение сигнал-шум, с использованием функций чувствительности координат к изменению параметров объекта и формирования соответствующей структуры ИНС позволяет повысить точность идентификации и настройки систем с регуляторами состояния в условиях действия помех.

Предложенный метод настройки линейных систем, основанный на идентификации параметров с использованием радиальной ИНС и последующем расчете регулятора состояния модальным методом, позволяет получить заданное качество управления в условиях параметрической неопределенности объекта.

Список литературы

1. **Анисимов А.А., Тарарыкин С.В.** Структурно-параметрический синтез, оптимизация и настройка систем управления технологическими объектами / ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2015. – 296 с.
2. **Анисимов А.А., Тарарыкин С.В.** Автоматическая настройка полиномиальных регуляторов электромеханических систем с использованием искусственной нейронной сети // МАУ. – 2008. – № 8. – С. 13–18.
3. **Тарарыкин С.В.** Структурно-параметрический синтез и цифровая реализация регуляторов мехатронных систем / ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2019. – 216 с.

4. **Еременко Ю.И., Полещенко Д.А., Глушенко А.И.** Анализ методов реализации схемы нейросетевого управления с самонастройкой // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2012. – № 6. – С. 50–55.

5. **Шамигулов П.В.** Расчет параметров настройки регуляторов систем автоматического регулирования // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 3. – С. 22–25.

6. **Осовский С.** Нейронные сети для обработки информации: пер. с польск. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.

7. **Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: пер. с польск. И.Д. Рудинского. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 452 с.

8. **Яхъяева Г.Э.** Нечеткие множества и нейронные сети. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 316 с.

9. **Кокотович П.В., Рутман Р.С.** Чувствительность систем автоматического управления // Автоматика и телемеханика. – 1965. – № 4. – С. 730–750.

10. **Кокотович П.В.** Метод точек чувствительности в исследовании и оптимизации линейных систем управления // Автоматика и телемеханика. – 1964. – № 1. – С. 1670–1676.

11. **Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М.** Чувствительность систем автоматического управления. – Л.: Энергия, 1969. – 208 с.

12. **Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г.** Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.

References

1. Anisimov, A.A., Tararykin, S.V. *Strukturno-parametricheskij sintez, optimizatsiya i nastroyka sistem upravleniya tekhnologicheskimi ob"ektami* [Structural-parametric synthesis, optimization and tuning of control systems for technological objects]. Ivanovo, 2015. 296 p.
2. Anisimov, A.A., Tararykin, S.V. *Avtomaticheskaya nastroyka polinomial'nykh regulyatorov elektromekhanicheskikh sistem s ispol'zovaniem iskusstvennoy neyronnoy seti* [Automatic tuning of polynomial regulators of electromechanical systems using an artificial neural network]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2008, no. 8, pp. 13–18.
3. Tararykin, S.V. *Strukturno-parametricheskij sintez i tsifrovaya realizatsiya regulyatorov mekhatronnykh sistem* [Structural-parametric synthesis and digital implementation of mechatronic system regulators]. Ivanovo, 2019. 216 p.
4. Eremenko, Yu.I., Poleshchenko, D.A., Glushchenko, A.I. *Analiz metodov realizatsii skhemy neyrosetovogo upravleniya s samonastroykoy* [Analysis of methods for implementing a neural network control scheme with self-tuning]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2012, no. 6, pp. 50–55.
5. Shamiгуlov, P.V. *Raschet parametrov nastroyki regulyatorov sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Calculation of tuning parameters of regulators of automatic control systems]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2010, no. 3, pp. 22–25.
6. Osovskiy, S. *Neyronnye seti dlya obrabotki informatsii* [Neural networks for information processing]. Moscow: Finansy i statistika, 2002. 344 p.

7. Rutkovskaya, D., Pilin'skiy, M., Rutkovskiy, L. *Neyronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy* [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2004. 452 p.

8. Yakh"yaeva, G.E. *Nechetkie mnozhestva i neyronnye seti* [Fuzzy sets and neural networks]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2016. 316 p.

9. Kokotovich, P.V., Rutman, R.S. *Chuvstvitel'nost' sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Sensitivity of automatic control systems]. *Avtomatika i telemekhanika*, 1965, no. 4, pp. 730–750.

10. Kokotovich, P.V. *Metod toчек chuvstvitel'nosti v issledovanii i optimizatsii lineynykh sistem upravleniya* [The method of sensitivity points in the research and optimization of linear control systems]. *Avtomatika i telemekhanika*, 1964, no. 1, pp. 1670–1676.

11. Rozenvasser, E.N., Yusupov, R.M. *Chuvstvitel'nost' sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Sensitivity of automatic control systems]. Leningrad: Energiya, 1969. 208 p.

12. Basharin, A.V., Novikov, V.A., Sokolovskiy, G.G. *Upravlenie elektroprivodami* [Control of electric drives]. Leningrad: Energoizdat, 1982. 392 p.