D. H. Imaev, S. V. Kvashnin, M. Yu. Shestopalov
Saint Petersburg Electrotechnical University

MODELING OF AUTOMATICALLY CONTROLLED NATURAL GAS COMPRESSION PROCESSES. PART 1. STATIONARY MODES

The issues of modeling of natural gas compression processes in stationary modes are discussed. Modeling is presented as a sequential disclosure of uncertainty regarding causal topology, block structures, and parameters of a controlled technological process and its environment. It is proposed to approximate the compressor characteristics by artificial neural networks. Using the example of parametric identification of a computer model of a compressor line, a conclusion is drawn on the advisability of combining graphical and numerical methods for analyzing stationary modes. The proximity of the model results to the archived data of a real gas pumping unit of the main gas pipeline allows us to conclude that the proposed methodology for modeling, identification and analysis of stationary modes of natural gas compression has prospects for further development and practical application.

Natural gas, compression, stationary mode, centrifugal compressor, automatic control, model, gas-dynamic characteristic, artificial neural network, computer simulation, identification

УДК 621.865.8; 681.511

Е. О. Мешковский, В. Я. Фролов, А. Д. Курмашев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Нелинейное взаимосвязанное управление электроприводами четырехколесного мобильного робота

Рассмотрена задача построения системы согласованного управления подсистемы электроприводов четырехколесного мобильного робота с двумя дифференциальными приводными блоками при движении вдоль заданной программной траектории. В процессе синтеза системы управления была учтена несимметричность расположения поворотных блоков, что дает возможность учитывать кинематические погрешности конструкции при выполнении траекторной стабилизации корпуса робота. Масштабируемая структура полученной системы управления позволяет контролировать траекторное движение и контурную скорость мобильных роботов с числом дифференциальных поворотных блоков больше двух при помощи простых модификаций. Модульное устройство системы управления расширяет сферу применения при помощи замены отдельных регуляторов в контурах управления и позволяет управлять электродвигателями любого типа. В конце статьи приведены результаты численных экспериментов на математической модели исследуемого колесного робота при управлении электродвигателями спроектированной системой.

Колесный робот, дифференциальный приводной блок, двигатель постоянного тока, взаимосвязанное управление, нелинейное регулирование, контурное движение

Мобильные роботы охватывают все больше областей применения [1], [2]. Основной их задачей, независимо от сферы деятельности, является перемещение вдоль заданной кривой (траектории). Для ее выполнения необходимо синтезировать такие системы управления, которые позволяют совершать перемещение с минимальными отклонениями от траектории при выполнении указанных технологических требований (обычно – контурная скорость, или скорость перемещения) [3]–[5]. Достичь поставленной задачи в многоприводной системе, примером которой может служить исследуемый мобильный робот, возможно при использовании принципа согласованного управления [6], [7]. В данной статье описывается построение системы согласованного управления электроприводами четырехколесного мобильного робота с двумя дифференциальными приводными блоками методами классической теории управления.

Тема управления движением колесных роботов довольно популярна в научной среде из-за их востребованности во многих сферах деятельно-

сти человека. Большая часть исследований посвящена колесным роботам с автомобильной компоновкой: задняя пара колес – приводная, передняя – поворотная. К нашей задаче такие решения не подходят из-за больших различий в конструкции и, как следствие, способах построения системы управления.

Схожи по способу управления колесные роботы с дифференциальной структурой. Во многих работах с конструкциями такого типа проводят анализ способов управления и построение систем стабилизации контурного движения для двух- (два приводных колеса) и трехколесных (два приводных и одно свободное (опорное) колесо) роботов. Рассмотрим примеры данной группы исследований.

Результаты исследований Иркутского государственного университета путей сообщения [8] предлагают использовать метод обратных задач динамики для построения управляющего воздействия для электродвигателей. Данный метод заключается в построении нелинейной динамической модели объекта управления и преобразовании ее к выражениям относительно управляющих переменных (напряжение обмотки). В [9] показан схожий способ, который применяется для построения модального ПИД-регулятора контура управления положения робота с выводом его коэффициентов. Обе работы демонстрируют результаты при помощи программного моделирования в среде MatLab Simulink.

В одной из работ зарубежных исследователей [10] демонстрируется применение пропорционально-дифференцирующего (ПД) регулятора стабилизации контурного движения. Особенностью данного исследования можно считать наличие нечеткого настройщика коэффициентов регулятора, который по информации о характере изменения ошибки рассчитывает коэффициенты и таким образом улучшает качество воспроизведения траектории.

В [11] можно увидеть подход, при котором используется нечеткий системный регулятор. Такой способ управления применяется для стабилизации линейной и угловой скоростей дифференциального колесного робота. На вход указанного регулятора поступает информация об отклонении от траектории и текущем угле положения корпуса в специально подготовленном виде.

В наше время очень часто применяют структуру системы управления, в которую внедрен нейросетевой регулятор – специально разработанная и обученная искусственная нейронная сеть, способная довольно гибко приспосабливаться к различным типам задач. Так, в [12] применяется нейронная сеть для задания скоростей электроприводов колесного робота с дифференциальным приводом при обходе препятствий.

Использование нейронной сети не ограничивается ее применением в качестве системного регулятора. Очень часто ее используют как настройщик основного регулирующего элемента. Примером может послужить [13], в которой внедрена эталонная модель объекта для организации адаптивного управления, но при этом параметры самой модели подвержены модификации со стороны нейросетевого «учителя». Такой подход применяют для компенсации внешних помех, которые возникают со стороны окружающей среды.

Приведенный краткий обзор существующих решений говорит о достаточной степени проработанности вопроса управления колесным роботами. Но, к сожалению, данные методы не подходят для решения задачи стабилизации контурного движения нашего объекта управления по ряду причин, среди которых – особенность конструкции (наличие двух дифференциальных приводных блоков, которые могут располагаться несимметрично относительно точки симметрии корпуса) и ограниченность ресурсов аппаратной части системы управления (в нашей задаче промышленный робот управляется при помощи промышленного логического контроллера (ПЛК), который характеризуется рядом особенностей), что делает невозможной или в высокой степени сложной реализацию ресурсоемких вычислений. По этой причине следует построить достаточно простую систему управления для выполнения поставленной задачи.

Корпус колесного робота, для которого решается задача синтеза системы управления, располагается на двух поворотных блоках, которые сконструированы по принципу дифференциального привода: поворотный блок состоит из двух колес, оси вращения которых располагаются на одной прямой; колеса вращаются за счет электродвигателей (в нашем случае, двигатель постоянного тока), соединенных через редукторы с валом колеса; поворотный блок способен вращаться вокруг точки крепления к корпусу за счет разности скоростей электроприводов. Положение поворотных блоков может быть несимметричным относительно центра корпуса.

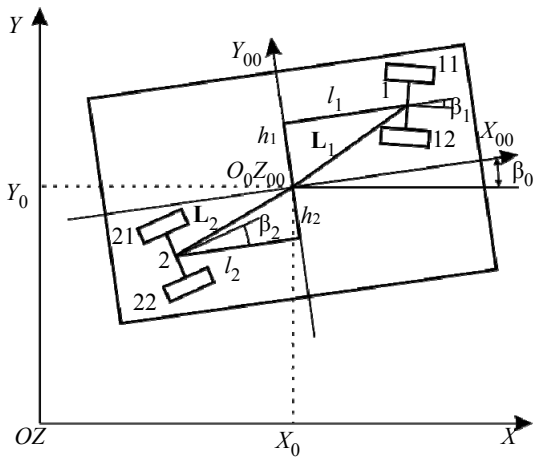

Рис. 1

Рис. 1 содержит вид сверху упрощенной схемы мобильного робота. На рисунке приняты следующие обозначения: *OXYZ* – глобальная неподвижная система координат (ось *OZ* направлена вверх, на читателя), $O_0X_{00}Y_{00}Z_{00}$ – локальная подвижная система координат, связанная с центром симметрии корпуса робота (ось O_0Z_{00} сонаправлена *OZ*); 1, 2 – точки крепления поворотных блоков к корпусу; 11, 12, 21, 22 – колеса робота; $\mathbf{L}_1 = [l_1, \quad h_1]^{\mathrm{T}}$, $\mathbf{L}_2 = [l_2, \quad h_2]^{\mathrm{T}}$ – векторы, соединяющие центр корпуса робота O_0 с точками крепления поворотных блоков 1 и 2, состоящие из проекций на оси системы координат (СК) $O_0X_{00}Y_{00}Z_{00}$; X_0, Y_{00} – координаты центра корпуса робота в неподвижной СК *OXYZ*; β_0 – угол поворота корпуса робота (между неподвижной *OXYZ* и подвижной $O_0X_{00}Y_{00}Z_{00}$ СК); β_1, β_2 – углы положения поворотного блока 1 и 2 в подвижной СК $O_0X_{00}Y_{00}Z_{00}$.

Необходимо стабилизировать движение центра симметрии корпуса вдоль заданной траектории с заданной контурной скоростью. Обратной связью будут данные с датчиков: скорости вращения электроприводов колес $\omega_{\text{дв11 т}}$, $\omega_{\text{дв12 т}}$, $\omega_{\text{дв21 т}}$, $\omega_{\text{дв22 т}}$ (номер в нижнем индексе указывает на номер колеса согласно рис. 1), углы положения поворотных блоков относительно корпуса $\beta_{1\,\text{т}}$, $\beta_{2\,\text{т}}$, скорость перемещения корпуса в пространстве $v_{0\,\text{т}}$, координаты центра корпуса $\mathbf{S}_{0\,\text{т}} = [X_{0\,\text{т}}, \quad Y_{0\,\text{т}}]^{\mathrm{T}}$ и угол положения корпуса $\beta_{0\,\text{т}}$ в глобальной системе *OXYZ*. Общую структуру синтезируемой системы управления можно увидеть на рис. 2. На рис. 2 обозначены: ЭД – электродвигатель; $\omega_{\text{дв11 з}}$, $\omega_{\text{дв12 з}}$, $\omega_{\text{дв21 з}}$, $\omega_{\text{дв22 з}}$ – заданные скорости вращения электроприводов колес (номер в индексе указывает на номер колеса согласно рис. 1); $U_{\text{ф11}}$, $U_{\text{ф12}}$, $U_{\text{ф21}}$, $U_{\text{ф22}}$ – напряжения фазы электродвигателя колеса (номер в нижнем индексе указывает на номер колеса согласно рис. 1).

Блок контроля траектории получает информацию о положении робота в пространстве. Произведя расчеты, он передает в подсистему управления электродвигателями векторы $\Delta\mathbf{L}_0 =$

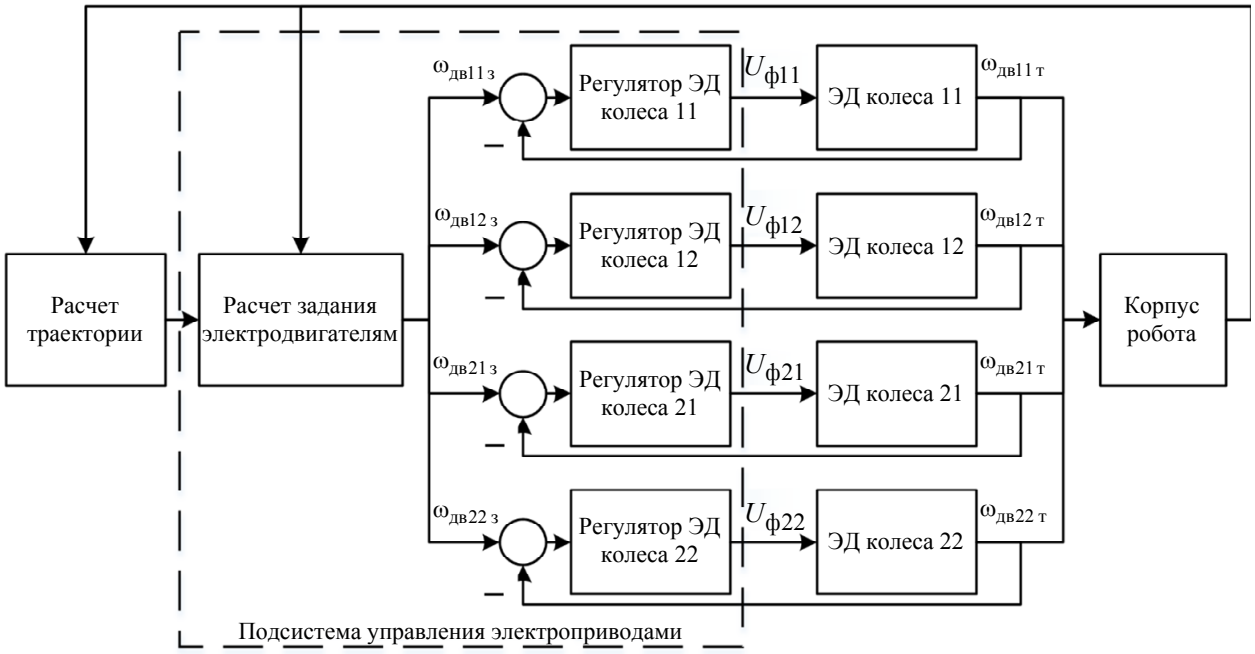

Рис. 2

$=\left[\Delta l_0,\ \ \Delta h_0\right]^{\mathrm{T}}$; $\Delta\mathbf{L}_1=\left[\Delta l_1,\ \ \Delta h_1\right]^{\mathrm{T}}$; $\Delta\mathbf{L}_2=$ $=\left[\Delta l_2,\ \ \Delta h_2\right]^{\mathrm{T}}$, состоящие из продольных и поперечных отклонений от траектории, задания углового положения $\beta_{0\,\text{з}}$, $\beta_{1\,\text{з}}$, $\beta_{2\,\text{з}}$ (нижний индекс обозначает принадлежность: 0 – центр симметрии корпуса; 1, 2 – точка крепления поворотных блоков 1 и 2) и заданную контурную скорость $\upsilon_{c\,\text{з}}$. Перечисленные величины изображены на рис. 3. На основе полученной информации блок расчета задания электродвигателям подсистемы управления электроприводами (системный регулятор) вычисляет задания для электроприводов колес. Регуляторы электродвигателей колес поддерживают заданную скорость электродвигателей. В данной статье рассматривается только подсистема управления электроприводами без блока контроля траектории.

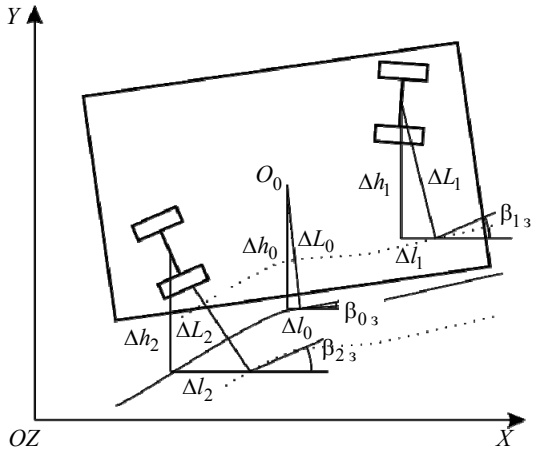

Рис. 3

Построение системы управления начнем с предположения о том, что для стабилизации положения центра корпуса вдоль заданной траектории достаточно, чтобы точки крепления поворотных блоков перемещались вдоль контура с минимальными отклонениями. В этой ситуации необходимо выполнять контроль угла положения корпуса $\beta_{0\,\text{з}}$, в целях дополнительной компенсации траекторной ошибки, и продольного отклонения центра симметрии Δl_0, для регулирования траекторной скоростью. Поперечное отклонение будет компенсироваться во внутренних блоках. Тогда, регуляторы внешнего контура управления можно записать в следующей форме:

$$\begin{cases}\omega_{0\,\text{к}}=K_{0\,\beta}\left(\beta_{0\,\text{з}}-\beta_{0\,\text{т}}\right);\\ v_{0\,\text{к}}=\begin{cases}\upsilon_{c\,\text{з}}\left(1-K_{0\,\Delta L}\dfrac{\Delta l_0}{\Delta l_{0\,\max}}\right) \text{ при } \left|\Delta l_0\right|<\Delta l_{0\,\max};\\ \upsilon_{c\,\text{з}}\left(1-K_{0\,\Delta L}\operatorname{sgn}\left(\Delta l_0\right)\right) \text{ иначе,}\end{cases}\end{cases} \quad (1)$$

где $\omega_{0\,\text{к}}$, $v_{0\,\text{к}}$ – задания угловой и продольной скоростей корпуса робота с учетом корректировки; $\Delta l_{0\,\max}$ – продольное отклонение центра симметрии корпуса робота, до значения которого действует линейная компенсация скорости (при превышении данного значения продольная ошибка компенсируется постоянной скоростью, определяемой коэффициентом $K_{0\,\Delta L}$); $\operatorname{sgn}\left(\Delta l_0\right)$ – знак продольной составляющей траекторной ошибки; $K_{0\,\beta}$ – коэффициент контура стабилизации угла положения корпуса робота в глобальной системе координат *OXYZ*; $K_{0\,\Delta L}$ – коэффициент контура стабилизации продольного положения корпуса робота в глобальной системе координат *OXYZ* (значение коэффициента должно располагаться в открытом промежутке (0, 1) и определяется, в большей степени, максимальными скоростями электроприводов). Таким образом, внешний контур регулирования состоит из линейного регулятора угла положения корпуса робота с коэффициентом $K_{0\,\beta}$ и нелинейного регулятора типа зона насыщения корректировки продольной ошибки с коэффициентом $K_{0\,\Delta L}$.

Задания углового положения приводных блоков $\beta_{1\,\text{з}}$ и $\beta_{2\,\text{з}}$, которые следует выполнить для стабилизации положения поворотного блока вдоль траектории, необходимо привести к корпусу робота, так как их значения поступают в глобальной системе координат *OXYZ*:

$$\begin{cases}\beta_{1\,\text{з}*}=\beta_{1\,\text{з}}-\beta_{0\,\text{з}};\\ \beta_{2\,\text{з}*}=\beta_{2\,\text{з}}-\beta_{0\,\text{з}},\end{cases} \quad (2)$$

где $\beta_{1\,\text{з}*}$, $\beta_{2\,\text{з}*}$ – преобразованные к корпусу задания углового положения приводных блоков 1 и 2.

Угловое положение поворотного блока будет компенсироваться изменением угловой скорости вращения относительно точки крепления при помощи линейного регулятора:

$$\begin{cases}\omega_{1\,\text{к}1}=K_{1\,\beta}\left(\beta_{1\,\text{з}*}-\beta_{1\,\text{т}}\right);\\ \omega_{2\,\text{к}1}=K_{2\,\beta}\left(\beta_{2\,\text{з}*}-\beta_{2\,\text{т}}\right),\end{cases} \quad (3)$$

где $\omega_{1\,\text{к}1}$, $\omega_{2\,\text{к}1}$ – задание угловых скоростей поворотного блока, компенсирующее угловое отклонение; $K_{1\,\beta}$, $K_{2\,\beta}$ – коэффициенты регулятора

стабилизации угла положения поворотного блока относительно корпуса робота.

Системы выражений (3) недостаточно для уменьшения траекторной ошибки. По этой причине необходимо ввести дополнительный регулятор, устраняющий поперечную ошибку Δh_1 и Δh_2 поворотных блоков (продольная составляющая ошибки устраняется во внешнем контуре в выражении (1)):

$$\begin{cases} \omega_{1\,к2} = \begin{cases} K_{1\,\Delta L}\dfrac{v_{0\,к}}{\Delta h_1}, \text{ при } |\Delta h_1| > \Delta h_{1\min}, \\ 0 \text{ иначе;} \end{cases} \\ \omega_{2\,к2} = \begin{cases} K_{2\,\Delta L}\dfrac{v_{0\,к}}{\Delta h_2}, \text{ при } |\Delta h_2| > \Delta h_{2\min}, \\ 0 \text{ иначе,} \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

где $\omega_{1\,к2}$, $\omega_{2\,к2}$ – задание угловых скоростей поворотного блока, компенсирующее поперечное отклонение; $\Delta h_{1\min}$, $\Delta h_{2\min}$ – минимальные поперечные отклонения центра поворотного блока, при которых работает регулирование; $K_{1\,\Delta L}$, $K_{2\,\Delta L}$ – коэффициенты регулятора контура стабилизации положения поворотного блока относительно траектории. Итоговая величина задания контура регулирования положения поворотного блока есть сумма выражений (3) и (4):

$$\begin{cases} \omega_{1\,з} = \omega_{1\,к1} + \omega_{1\,к2}; \\ \omega_{2\,з} = \omega_{2\,к1} + \omega_{2\,к2}. \end{cases} \quad (5)$$

Получаем контур регулирования положения поворотного блока, состоящий из линейного регулятора угла положения поворотного блока относительно корпуса робота (3) с коэффициентами $K_{1\,\beta}$, $K_{2\,\beta}$ и нелинейного регулятора типа зона нечувствительности корректировки поперечной ошибки (4) с коэффициентами $K_{1\,\Delta L}$, $K_{2\,\Delta L}$.

Последним этапом разработки системы согласованного управления электроприводами будет расчет заданий скоростей колес. Рассмотрим колесо 11 робота. В процессе перемещения робота вдоль траектории колесо совершает сложное движение [14, с. 155–158]. Переносное движение здесь – это перемещение корпуса робота, относительное – вращение поворотного блока относительно точки крепления. Тогда вектор скорости колеса 11 определяется как

$$\mathbf{v}_{11\,з} = \mathbf{v}_{0\,з} + \boldsymbol{\omega}_{0\,з} \times (\mathbf{L}_1 + \mathbf{L}_{11}) + \boldsymbol{\omega}_{1\,з} \times \mathbf{L}_{11} = \\ = \mathbf{v}_{1\,з} + (\boldsymbol{\omega}_{0\,з} + \boldsymbol{\omega}_{1\,з}) \times \mathbf{L}_{11}, \quad (6)$$

где $\mathbf{v}_{11\,з}$ – вектор задания линейной скорости колеса; $\boldsymbol{\omega}_{0\,з} = [0, \quad 0, \quad \omega_{0\,к}]^{\mathrm{T}}$ – вектор задания угловой скорости вращения корпуса из выражения (1); $\boldsymbol{\omega}_{1\,з} = [0, \quad 0, \quad \omega_{0\,з}]^{\mathrm{T}}$ – вектор задания угловой скорости вращения поворотного блока 1 из (5); $\mathbf{L}_1$ – вектор расстояния, соединяющий центр корпуса робота с точкой крепления поворотного блока 1; $\mathbf{L}_{11} = [0, \quad +l_{11}, \quad 0]^{\mathrm{T}}$ – вектор расстояния, соединяющий точку крепления поворотного блока 1 и колесо 11.

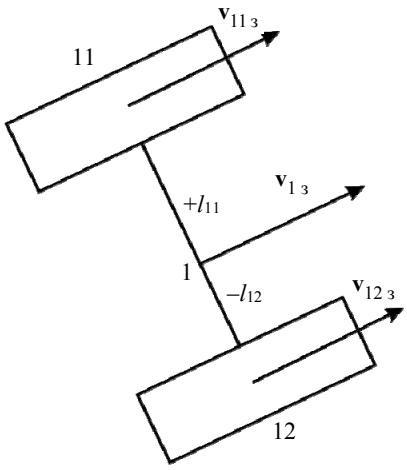

Рис. 4

Вектор скорости поворотного блока $\mathbf{v}_{1\,з}$ должен быть перпендикулярен оси крепления колес (рис. 4). Тогда линейные скорости поворотного блока и колес при проецировании на оси системы координат движения поворотного блока будут иметь только продольную проекцию. Исходя из этого, раскроем выражение (6) для всех колес и выпишем продольную составляющую линейной скорости. В итоге получим задания линейных скоростей колес:

$$\begin{cases} v_{11\,з} = v_{1\,з} - (\omega_{0\,к} + \omega_{1\,з})l_{11}; \\ v_{12\,з} = v_{1\,з} + (\omega_{0\,к} + \omega_{1\,з})l_{12}; \\ v_{21\,з} = v_{2\,з} - (\omega_{0\,к} + \omega_{2\,з})l_{21}; \\ v_{22\,з} = v_{2\,з} + (\omega_{0\,к} + \omega_{2\,з})l_{22}. \end{cases} \quad (7)$$

Задания для контуров управления скоростью электроприводов можно получить, приведя выражения в (7) к валу электродвигателя:

$$\begin{cases} \omega_{\text{дв}11\,\text{з}} = \dfrac{v_{11\,\text{з}}}{R_{11\,\text{к}} I_{11\,R}}; \\ \omega_{\text{дв}12\,\text{з}} = \dfrac{v_{12\,\text{з}}}{R_{12\,\text{к}} I_{12\,R}}; \\ \omega_{\text{дв}21\,\text{з}} = \dfrac{v_{21\,\text{з}}}{R_{21\,\text{к}} I_{21\,R}}; \\ \omega_{\text{дв}22\,\text{з}} = \dfrac{v_{22\,\text{з}}}{R_{22\,\text{к}} I_{22\,R}}, \end{cases} \quad (8)$$

где $R_{11\,\text{к}}$, $R_{12\,\text{к}}$, $R_{21\,\text{к}}$, $R_{22\,\text{к}}$ – радиусы колес 11, 12, 21 и 22 соответственно; $I_{11\,R}$, $I_{12\,R}$, $I_{21\,R}$, $I_{22\,R}$ – передаточные отношения редукторов электродвигателей 11, 12, 21 и 22.

Регуляторы внутренних контуров управления скоростью электродвигателей получают сигнал рассогласования скорости вращения электродвигателя и управляют преобразователем подаваемого на фазную обмотку напряжения. Для этой цели можно использовать типовой (пропорциональный (П), пропорционально-интегрирующий (ПИ), пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) и т. п.) или синтезированные любыми методами классической теории управления преобразователи.

Собрав воедино выражения (1)–(8), получаем нелинейный системный регулятор системы согласованного управления электроприводами исследуемого робота.

Графическое изображение блока расчета задания представлено на рис. 5 с целью уменьшения объема схемы обозначены: регулятором корпуса выражение (1), регулятором приводного блока (3)–(5), блоком расчета скоростей электродвигателей колес (7)–(8). Структура полученной системы дает возможность достаточно просто произвести преобразования для колесных роботов с числом поворотных блоков больше двух повторением выражений (2)–(8) необходимое количество раз.

Продемонстрируем результаты программной реализации полученной системы управления, проведя ряд численных экспериментов при помощи математической модели исследуемого мобильного робота, приведенной в [15]. Масса робота – 100 кг, заданная контурная скорость равна 1.0 м/с, регуляторы скорости электродвигателей выбраны ПИ-типа с настройкой на модульный (технический) оптимум [16]. Параметры контуров управления установлены в оптимальное значение. Будем изменять коэффициент регулятора поддержания угла положения корпуса робота $K_{0\,\beta}$. Заданная программная траектория представлена на рис. 6, где буквами *A*, *B*, *C*, *D* и *E* обозначены точки сопряжения траекторий.

Первая серия экспериментов проведена при условии симметричного расположения поворотных блоков ($\mathbf{L}_1 = [0.5, 0.0]^{\text{T}}$, $\mathbf{L}_2 = [-0.5, 0.0]^{\text{T}}$, м). Вторая серия экспериментов учитывает отклонения

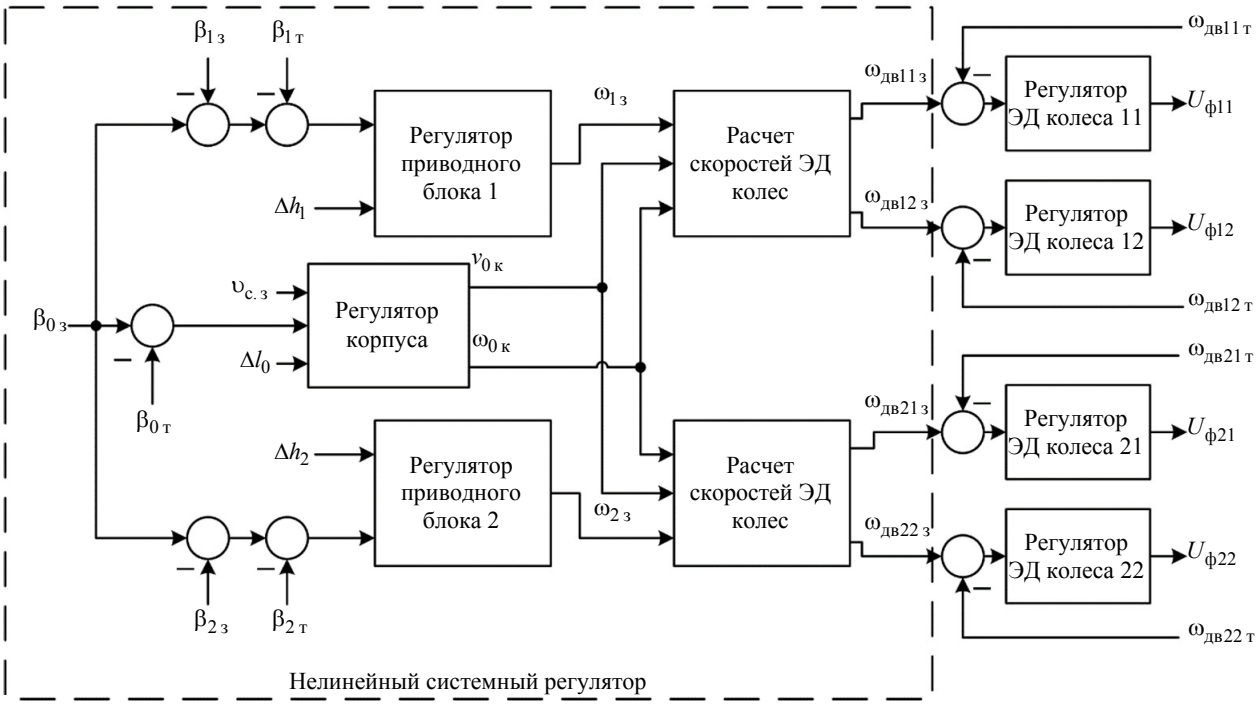

Рис. 5

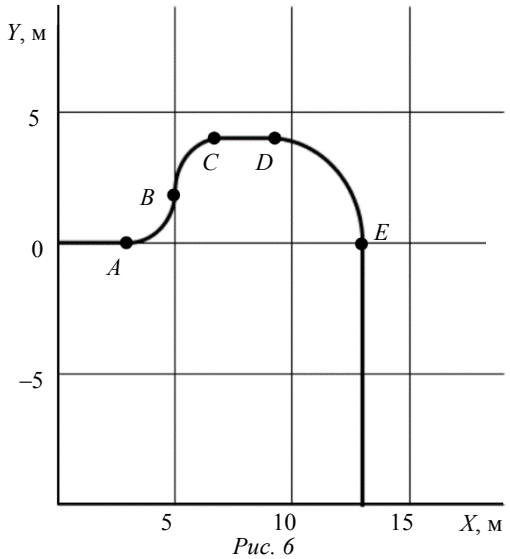

Рис. 6

от оси симметрии корпуса робота ($\boldsymbol{L}_1$ = [0.5, 0.2]^{т}, $\mathbf{L}_2 = [-0.5, -0.4]^{\text{т}}$, м). Результаты представлены на рис. 7–9 в виде графика поперечной ошибки центра корпуса робота Δh_0 (вертикальная ось) в зависимости от пройденного пути S (горизонтальная ось).

Рис. 7, *а*, 8, *а* и 9, *а* относятся к первой серии экспериментов, рис. 7, *б*, 8, *б* и 9, *б* – ко второй. Результаты представлены на рис. 7.

Графики на рис. 7 получены при $K_{0\beta}$ = 1.0, на рис. 8 – при $K_{0\beta}$ = 3.0, на рис. 9 – при $K_{0\beta}$ = 15.0.

По результатам численных экспериментов можно заметить, что увеличение коэффициента регулятора поддержания угла положения корпуса робота

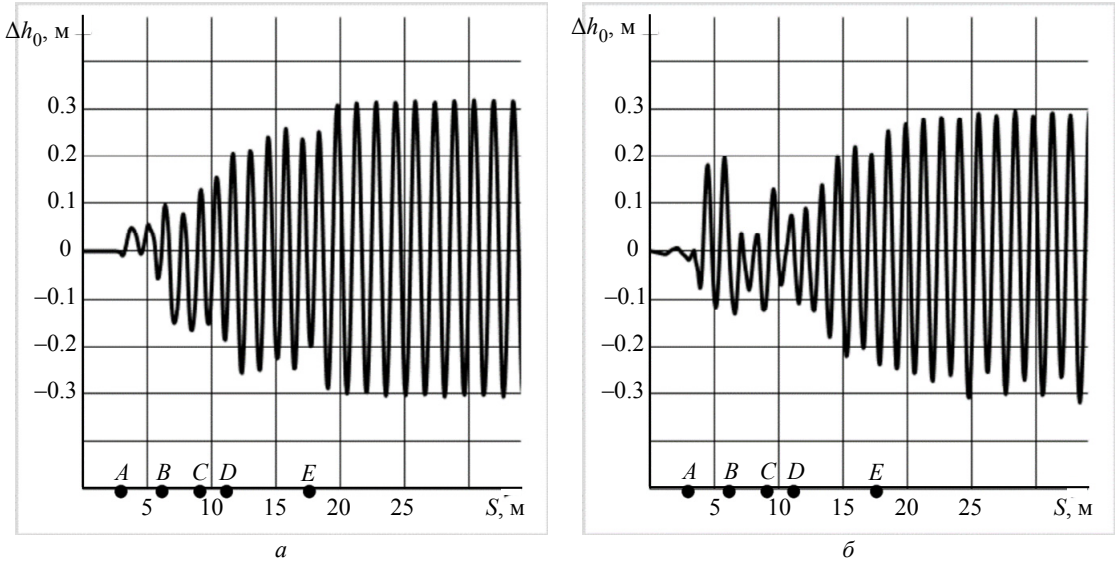

Рис. 7

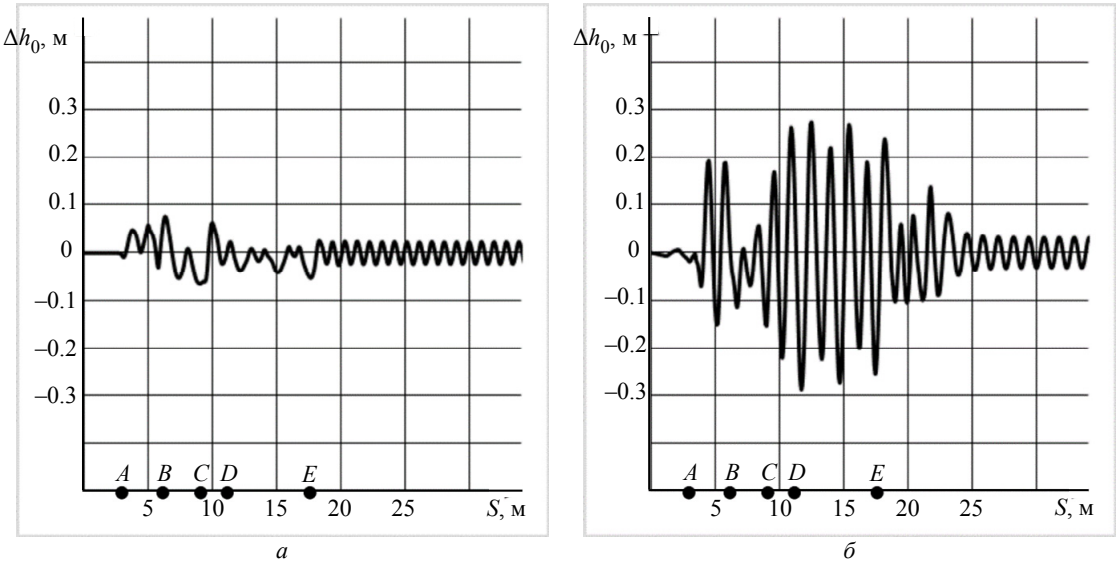

Рис. 8

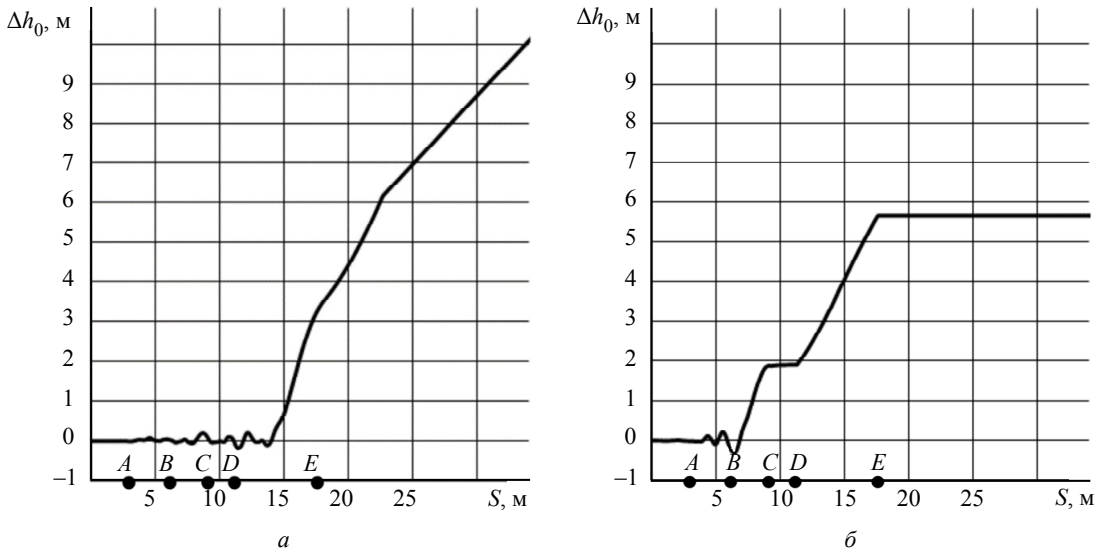

Рис. 9

$K_{0\beta}$ уменьшает поперечное отклонение центра корпуса робота от траектории. При больших значениях $K_{0\beta}$ мобильный робот сходит с траектории.

В результате проведенного исследования была синтезирована система согласованного управления электроприводами рассматриваемого колесного робота. Строение системы управления позволяет стабилизировать движение роботов с количеством приводных блоков больше 2. Полученная форма системы управления дает возможность управлять любыми типами двигателей, а также производить замену отдельных регуляторов в контурах стабилизации траекторного движения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корчак В. Ю., Лапшов В. С., Рубцов И. В. Перспективы развития наземных робототехнических комплексов военного и специального назначения // Изв. Юж. фед. ун-та. Техн. науки. 2015. № 10 (171). С. 83–95.

2. Скворцов Е. А., Скворцова Е. Г. Тенденции развития сельскохозяйственной робототехники за рубежом // Аграрный вестн. Урала. 2016. № 1 (143). С. 37–43.

3. Алюшин Ю. А., Вержанский П. М., Калинкин М. Н. Управление движением навигационного робота мощностью приводов ведущих колес // Горный информ.-аналит. бюл. (науч.-техн. журн.). 2013. № 1. С. 154–162.

4. Зенкевич С. Л., Назарова А. В. Система управления мобильного колесного робота // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Н. Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2006. № 3. С. 31–51.

5. Капитанюк Ю. А., Капитонов А. А., Чепинский С. А. Разработка системы траекторного управления мобильным роботом с роликонесущими колесами // Науч.-техн. вестн. информ. технологий, механики и оптики. 2014. № 2 (90). С. 65–71.

6. Беляева Н. И., Курмашев А. Д. Синтез структуры системы программного управления двухкоординатной электромеханической системой // Докл. Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 1–2 (25). С. 241–244.

7. Шаповалов А. А., Курмашев А. Д. Контурная система согласованного управления промышленным роботом // Докл. Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 1–2 (25). С. 245–250.

8. Антошкин С. Б., Баканов М. В., Сизых В. Н. Система управления автономного робота на основе метода обратных задач динамики // Совр. технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. № 2 (62). С. 15–23.

9. Сизых В. Н., Баканов М. В. Модальное управление мобильным роботом при дифференциальном отклонении колесной пары // Информ. технологии и матем. моделирование в управлении сложными системами. 2019. № 1 (2). С. 62–71.

10. Adaptive Fuzzy-PD tracking controller for optimal visual-servoing of wheeled mobile robots / O. Saleem, H. Hassan, A. Khan, U. Javaid // Control Engineering and Applied Informatics. 2017. Vol. 3, № 9. P. 58–68.

11. Falsafi M. H., Alipour K., Tarvirdizadeh B. Fuzzy motion control for wheeled mobile robots in real-time // J. of Computational and Applied Research in Mechanical Engineering. 2019. Vol. 2, № 8. P. 133–144.

12. Звонарев И. С., Караваев Ю. Л. Управление многозвенным колесным мобильным роботом с применением искусственных нейронных сетей // Выставка инноваций – 2018 (весенняя сессия). Сб. материалов XXV Республ. выставки-сессии студ. инновационных проектов. Ижевск: Изд-во ИжГТУ им. М. Т. Калашникова, 2018. С. 42–46.

13. Robust stabilization of a wheeled mobile robot using model predictive control based on neurodynamics optimization / H. Xiao, Z. Li, C. Yang, L. Zhang, P. Yuan, L. Ding, T. Wang // IEEE Trans. on Industrial Electronics. 2017. Vol. 1, № 64. P. 505–516.

14. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики: учеб. для втузов. 10-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1986.

15. Мешковский Е. О., Курмашев А. Д. Построение математической модели четырехколесного мобильного робота с двумя дифференциальными приводными блоками // Инновации и инвестиции. 2020. № 2. С. 113–118.

16. Кояин Н. В., Мальцева О. П., Удут Л. С. Оптимизация контуров регулирования систем электропривода по типовым методикам // Изв. Томского политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2005. № 7. С. 120–125.

E. O. Meshkovskiy, V. Ya. Frolov, A. D. Kurmashev
Saint Petersburg polytechnic university of Peter the Great

NONLINEAR INTERCONNECTED CONTROL OF ELECTRIC DRIVES OF FOUR-WHEEL MOBILE ROBOT

The task of constructing an interconnected control system for the electric drive subsystem of a four-wheel mobile robot with two differential drive units when moving along a given program path is considered. During the synthesis of the control system, the asymmetry of the location of the rotary blocks was taken into account. The scalable structure of the resulting control system allows to control the trajectory movement and contour speed of mobile robots with more than two differential rotary blocks. The modular structure of the control system expands the scope of application by replacing individual regulators in the control loops and controlling electric motors of any type. At the end of the article, the results of numerical experiments on the mathematical model of the wheeled robot under study are given.

Wheel robot, differential drive unit, DC motor, interconnected control, non-linear regulation, contour movement

УДК 519.812.3

П. Л. Любкин
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Разработка метода доопределения матриц парных сравнений кратных предпочтений на основе показателя согласованности

Экспертные оценки – методология, включающая в себя различные методы, позволяющие решать комплексные и плохо формализуемые задачи. Одним из наиболее распространенных и перспективных методов является метод анализа иерархий, разработанный Т. Саати. Несмотря на все его достоинства (независимость от области применения, использование парных сравнений для упрощения работы эксперта, использование человеческого опыта, удобную шкалу оценок и проверку на противоречивость мнения эксперта), метод анализа иерархий обладает рядом недостатков, к которым относится отсутствие возможности работы с неполной экспертной информацией. Для модификации метода был рассмотрен алгоритм доопределения матриц, основанный на максимизации показателя согласованности. В качестве данного показателя вместо предлагаемого Саати показателя кардинальной согласованности был предложен показатель, основанный на поиске нетранзитивности среди троек предпочтений. На основании максимизации предложенного показателя согласованности был предложен метод доопределения матриц парных сравнений кратных предпочтений, содержащих неполную экспертную информацию. Также был проведен опрос экспертов для составления матриц парных сравнений, среди которых рандомизированным методом были созданы лакуны, доопределенные впоследствии. Было проведено сравнение показателей согласованности исходных и доопределенных матриц парных сравнений.

Экспертные оценки, метод анализа иерархий, матрицы парных сравнений, показатель согласованности, доопределение матриц, кратные предпочтения

Во многих областях человеческой деятельности существуют задачи, решить которые с помощью строгих математических методов с высокой степенью надежности невозможно. В некоторых