

§ 3 БАЗЫ ЗНАНИЙ, ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ, ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ, СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Николаева А.В., Бархатова И.А., Ульянов С.В.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АВТОНОМНЫМ РОБОТОМ МАНИПУЛЯТОРОМ

Аннотация: . В статье рассматриваются проблемы проектирования интеллектуальных систем управления с применением технологий мягких вычислений на примере сложного объекта управления — избыточного робота манипулятора с семью степенями свободы. Известно, что эффективность применяемого инструментария для решения конкретной задачи в проблемно-ориентированной области зависит от соответствия уровня интеллектуальности вычислительного инструментария уровню сложности решаемой задачи. Выбор адекватного и эффективного инструментария применения для конкретной проблемно-ориентированной области вызывает определенные трудности (или интуитивное противоречие) у студентов, инженеров-исследований и разработчиков новых высоких наукоемких информационных технологий. В данной работе описаны эффективные методы и применение мягких вычислений. Обсуждается методика применения некоторых прикладных моделей интеллектуальных вычислений, рассмотрено их совместное применение в задачах интеллектуального управления. Основным преимуществом применения и внедрения интегрированных интеллектуальных систем управления является возможность получения гарантированного результата: достижения цели управления с максимальным качеством управления на верхнем уровне и минимальным расходом полезного ресурса системы «объект управления — регулятор» на нижнем (исполнительском) уровне иерархической системы автоматического управления.

Ключевые слова: интеллектуальная система управления, система автоматического управления, генетический алгоритм, технологии мягких вычислений, база знаний, нечеткий регулятор, непредвиденная ситуация управления, объект управления, декомпозиция управления, закон управления

Введение

В данной статье в качестве объекта управления (ОУ) выступают манипуляторы с из-

быточным числом степеней свободы. Избыточные манипуляторы имеют большее число степеней свободы, чем это необходимо для выполнения задачи, т.е. большее, чем размерность рабочего пространства.

Избыточность степеней свободы позволяет структуре манипулятора адаптироваться в условиях недостаточной информации о внешней (возможно изменяющейся) среде, в условиях изменения параметров самого манипулятора (например, связанных со старением или выходом из строя отдельных узлов). Кроме того, избыточные степени свободы позволяют задать поведение робота манипулятора, нацеленное на решение поставленной задачи с минимальным расходом полезного ресурса.

В настоящее время различные фирмы производят промышленных роботов (Таблица 1) для манипулирования, сварки, покраски, упаковки, шлифовки, полировки и т.д. с большим спектром применения и по точности, и по характеру выполняемых операций. Основными массовыми потребителями в области промышленной робототехники являются автомобильная и электронная промышленность.

Задачи управления для избыточных роботов манипуляторов (позиционирования устройства захвата, построения траектории, решение обратной задачи динамики и др.), с увеличением сложности ОУ, повышением требований к работоспособности в критических ситуациях и в условиях неблагоприятной внешней среды, все чаще решаются с применением технологий интеллектуальных вычислений: генетических алгоритмов [1, 2], нейронных и нечетких нейронных сетей [3, 4], с использованием аппарата нечеткой логики [5, 6].

В данной статье рассматривается применение технологий мягких вычислений [7] для построения робастной интеллектуальной системы управления для решения задачи точного позиционирования избыточных роботов манипуляторов с тремя и семью степенями свободы. Примеры промышленного применения роботов с 7-ю степенями свободы приведены на рис. 1 и рис. 2.

Таблица 1. Модели манипуляторов различных производителей

Производитель	Модели	Число степеней свободы
RobotWorx	Motoman Robots, Fanuc Robots (ArcMate 100i), Kuka Robots (KR 3)	6
Elumotion Ltd	Elumotion Elu2-Arm (рис. 1)	7
Robotics research	K-1207i, K-707i, K-807i, K-1207i, K-1607iHP, K-1807iHP	7
Kraft Telerobotics	Predator (рис. 2), Grips, Raptor, Viper	6
Hydro-Lek Ltd	HLK-40500 R 7	7
Engineering Services	MRR-Scara	4
	MRR-Articulate	6
	MRR-Gantry	3, 4, 5, 6
ECA	ARM 5E	5
	ARM 7H	7
Barrett Technology	WAM Arm	4,7

- 1. Shoulder flexion – extension**
- 2. Shoulder adduction-
abduction**
- 3. Humeral -rotation**
- 4. Elbow flexion - extension**
- 5. Wrist pronation - supination**
- 6. Wrist adduction - abduction**
- 7. Wrist flexion extension**

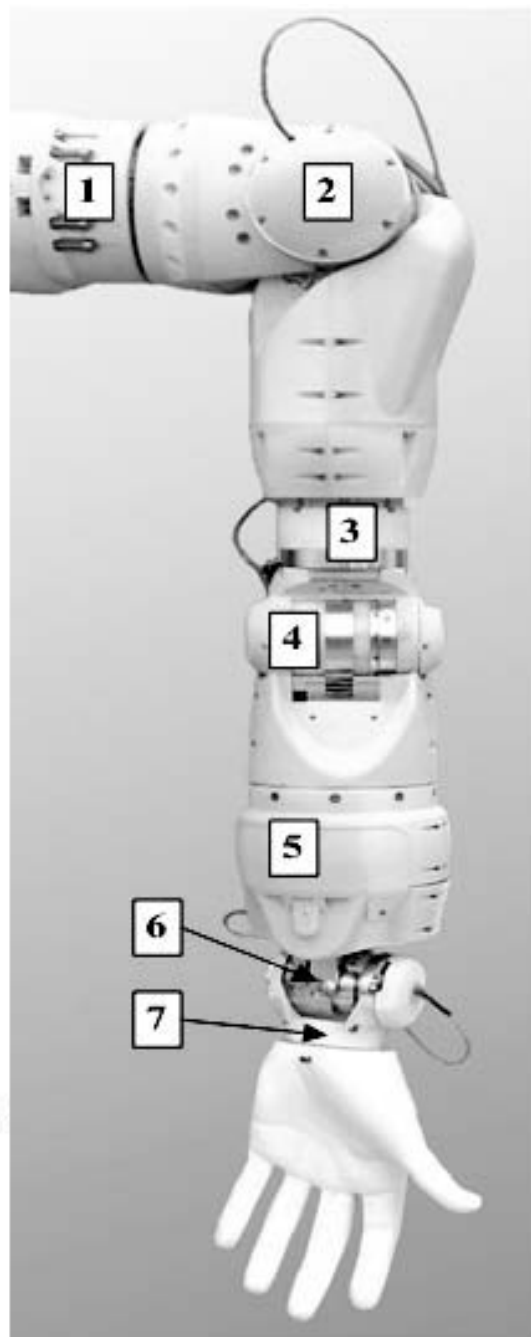
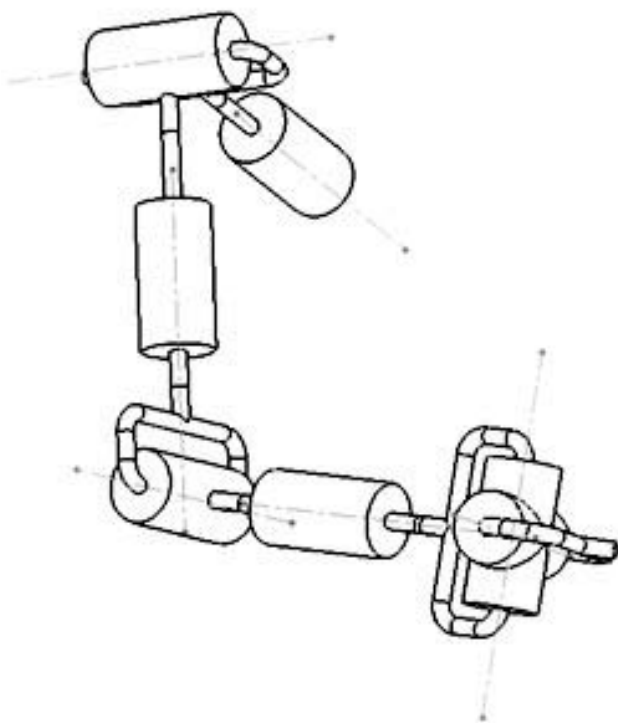


Рис. 1. Робот манипулятор Elu2-Arm (Elumotion ltd) и его схематичное отображение



Рис. 2. Робот манипулятор Predator (Kraft Telerobotics) на борту подводного телеуправляемого аппарата Hercules

1. Построение системы управления манипулятором с семью степенями свободы

Традиционная система управления представляет собой совокупность одного или нескольких ОУ и управляющей системы. В общем случае, система управления состоит из звена регулирования, ОУ, а также измерительной системы (ИС) в цепи обратной связи. Для обеспечения заданных динамических показателей в системах управления находят применение различные типы регуляторов. Широкое распространение получили пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД-) регуляторы. Интегральная составляющая регулятора позволяет устранить в системе статическую ошибку, а дифференциальная составляющая — улучшить динамические показатели, форсируя переходный процесс.

1.1. Системы управления с постоянными параметрами регулятора

В общем случае необходимо найти коэффициенты ПИД-регулятора при которых обеспечивается желаемый характер движения звеньев робота манипулятора.

Для определения коэффициентов $K_{Pi}, K_{Di}, K_{Ii}, i = \overline{1,7}$ аналитическими методами,

необходимы первоначальные знания о системе управления и характере поведения ОУ [8, 9], т.е. корректное определение коэффициентов ПИД-регулятора возможно с привлечением эксперта.

Включение в систему управления элементов интеллектуальных вычислений может позволить описать требования к системе управления в терминах качественных критериев.

Так, определение параметров управления возможно с использованием генетического алгоритма (ГА), для чего необходимо лишь корректно определить функцию пригодности (*fitness-функцию*) ГА, например следующим образом: $fitness = (PTS = 1) \cap (I_T \rightarrow 0)$, где *PTS* (*Position Task Solution*) — решение задачи позиционирования манипулятором с тремя степенями свободы, а I_T — быстродействие системы управления.

Исходя из заданной функции пригодности, выбор коэффициентов $K_{Pi}, K_{Di}, K_{Ii}, i = \overline{1,7}$ определяется исходя из обеспечения гарантированного решения задачи позиционирования с максимальным быстродействием.

Интеллектуальная надстройка в виде звена ГА без разрушения нижнего исполнительного уровня позволяет оперироваться качественными критериями системы.

Структурная схема системы управления на ГА приведена на рис. 3, где Q' — воздействующий (задающий) сигнал, Q — измеренная регулируемая величина, $s(t)$ — ограничение управляющего воздействия, $K = [K_{Pi} \ K_{Di} \ K_{Ii}; \dots; K_{P7} \ K_{D7} \ K_{I7}]$ — матрица коэффициентов ПИД-регулятора, $d(t)$ — задержка в ИС, $m(t)$ — внешнее воздействие среды.

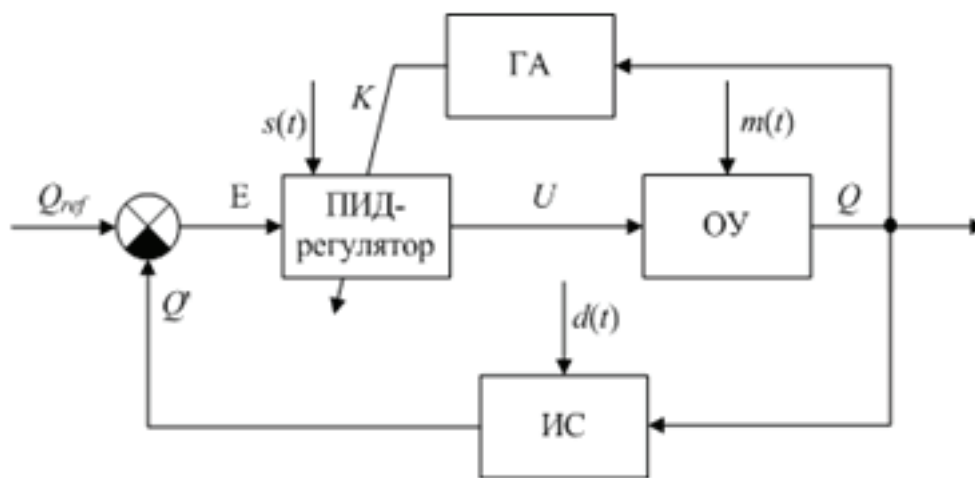


Рис. 3. Структурная схема системы управления на ГА

Выбор коэффициентов ПИД-регулятора в системе управления на основе ГА осуществляется один раз для одного или ряда случаев (штатные ситуации управления) и в процессе работы остаются неизменными. В результате, система управления на основе ГА справляется с задачей точного позиционирования манипулятора в штатных ситуациях. Однако система управления на основе ГА не обеспечивает гарантированного управления в непредвиденных ситуациях управления, что будет продемонстрировано ниже.

Применение системы управления на основе ГА ограничено требованием наличия описания постоянных условий внешней среды и известных структур управляющего звена и ОУ.

Расширение применимости системы управления возможно с помощью увеличения интеллектуальности системы управления — использования динамической настройки коэффициентов ПИД-регулятора, что возможно с включением элементов технологии мягких вычислений.

1.2. Проектирование интеллектуальной системы управления с применением Оптимизатора Баз знаний на основе мягких вычислений

Основным элементов интеллектуальной системы управления (ИСУ) с применение технологий мягких вычислений [7] является нечеткий регулятор (НР), управляющий коэффициентами усиления ПИД-регулятора. НР осуществляет управление за счет интегрированной в него базы знаний (БЗ), включающей данные о виде и параметрах функций принадлежности входных и выходных нечетких переменных, а также набор нечетких продукционных правил.

Создание БЗ производится с помощью интеллектуального инструментария Оптимизатор Баз Знаний (ОБЗ) на основе мягких вычислений [10] в следующей последовательности:

- создание обучающего сигнала — определение типовой ситуации управления (например, штатная ситуация) формирование таблицы коэффициентов ПИД-регулятора и ошибок управления с помощью ГА;
- формирование модели нечеткого вывода — определение типа нечеткой модели, интерпретации нечетких операций, числа входных и выходных переменных;
- создание лингвистических переменных для входных значений;
- создание базы правил;
- настройка базы правил;
- оптимизация левых и правых частей правил БЗ.

В зависимости от сложности системы и ОУ, ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях может содержать один или несколько НР.

В случае простого ОУ, возможно реализовать один НР соответственно с единственной БЗ (рис. 4).

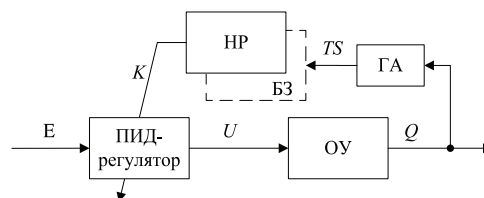


Рис. 4. ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР

Однако с увеличением сложности ОУ, увеличивается время создания БЗ, повышаются требования к вычислительным ресурсам процессора, на котором создается БЗ и объему памяти системы, в которой размещается БЗ.

При возникновении ситуаций, когда сложность реализации единой БЗ высока, создаются несколько БЗ, которые размещаются в разных НР (рис. 5). Разделение управления несколько снижает качество системы, однако создание нескольких НР нередко является единственным способом организации интеллектуального управления сложным ОУ.

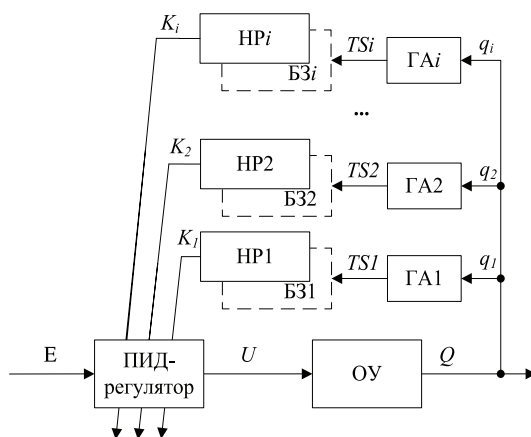


Рис. 5. ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением

Рассмотрим более подробно процесс создания БЗ для ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях для робота манипулятора с семью степенями свободы.

В связи со сложностью рассматриваемого объекта управления — робота манипулятора с семью степенями свободы — реализация единой БЗ невозможна, поэтому изначально организуем разделенное управление звеньями (один НР управляет одним звеном, как показано на рис. 6)

На рис. 6 используются следующие обозначения: Q_{ref} — воздействующий (задающий) сигнал, Q' — измеренная регулируемая величина, $E = [\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \dots \ \varepsilon_7]$ — ошибка управления, K — матрица пропорциональных, дифференциальных и интегральные коэффициенты ПИД-регулятора $K_{Pi}, K_{Di}, K_{Ii}, i = \overline{1,3}$ — , где i — номер соответствующего звена робота манипулятора, $s(t)$ — ограничение управляющего воздействия, $U = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_7]$ — управляющее воздействие, $d(t)$ — задержка в измерительной системе (ИС), $TS_i, i = \overline{1,3}$ — обучающий сигнал соответствующего НР, $m(t)$ — внешнее воздействие среды, $Q = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_7]$ — регулируемая величина [11].

Для исследования качества рассмотренных систем управления, в среде *MatLab/Simulink* было моделирование систем управления манипулятором с семью степенями свободы.

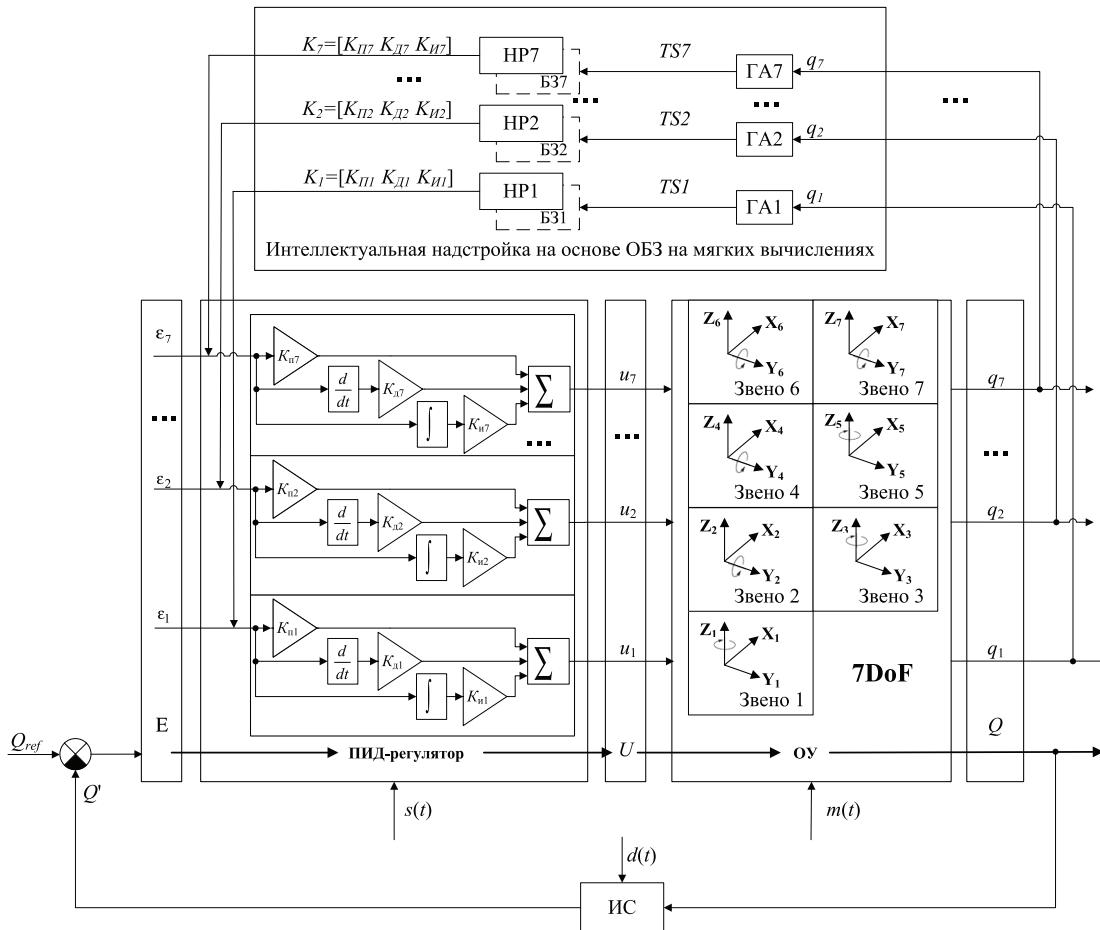


Рис. 6. ИСУ роботом манипулятором с семью степенями свободы на ОБЗ на мягких вычислениях

1.3. Модель объекта управления

В предположении, что звенья робота манипулятора могут вращаться в диапазоне (-70 +70) градусов и конфигурации степеней свободы соответствуют представлению на рис. 6, была построена формализованная модель манипулятора с семью степенями свободы.

Создание модели реального ОУ позволило ускорить идентификацию модели ОУ, получение приемлемых параметров управления для разных типов систем управления и с различным уровнем интеллектуальности.

Для демонстрации преимуществ и недостатков рассматриваемых типов систем управления в применении к манипулятору с семью степенями свободы в данной работе была проведена серия экспериментов для *MatLab/Simulink*-моделей.

Рассмотрим порядок и этапы проведения экспериментов.

1.4. Порядок проведения и оценки испытаний

В предположении, что звенья робота манипулятора могут вращаться в диапазоне ± 70 градусов и конфигурации степеней свободы соответствуют представлению на рис. 6, была построена формализованная модель манипулятора с семью степенями свободы, что позволило ускорить идентификацию модели ОУ, получение приемлемых параметров управления для разных типов систем управления и с различным уровнем интеллектуальности.

Для *MatLab/Simulink*-моделей проведена серия экспериментов, состоящая из двух этапов: работа в штатных и работа в непредвиденных (нештатных) ситуациях управления.

В качестве штатных ситуаций управления выступают тринадцать экспериментов в соответствии с группой точек рабочего пространства, определенных как тестовых.

Нештатные ситуации разделяются на внешние (принудительное изменение положений звеньев, изменение начальных условий или одновременно и принудительное изменение положений звеньев и изменение начальных условий) и внутренние (уменьшение или увеличение ограничений управляющих воздействий, внесение шумов в каналы управления или систему измерения). Каждая из непредвиденных ситуаций тестируется на тринадцати точках тестового пространства; таким образом, проводится 39 экспериментов для внешних и 52 эксперимента для внутренних непредвиденных ситуаций управления.

Для оценки и сравнения результатов испытаний введена система критериев качества, учитывающая методы оценки переходных процессов теории автоматического управления [9]. Данные методы были адаптированы для конкретного ОУ (робота манипулятора с семью степенями свободы) в следующем виде:

1. Решение задачи позиционирования в штатных ситуациях управления *PTSkcs* (*Position Task Solution in known control situations*).

Задача позиционирования считается решенной, если по завершении заданного числа итераций $I_{max} = 300$ выполняется условие:

$$\begin{cases} PTS = 1, & \text{if } |q_{1ref} - q_1| + |q_{2ref} - q_2| + \dots + |q_{7ref} - q_7| \leq 2 \text{ deg} \\ PTS = 0, & \text{else} \end{cases}$$

где $q_{1ref}, q_{2ref}, \dots, q_{7ref}$ — желаемые положения звеньев, q_1, q_2, \dots, q_7 — текущие положения звеньев.

$$PTS_{\text{выполнение}} \equiv \frac{\sum_{i=1}^N PTS}{N}.$$

где N — число экспериментов.

2. Решение задачи позиционирования во внешних непредвиденных ситуациях управления *PTS_{ACCs1}* (*Position Task Solution in the above considered control situations*).

3. Решение задачи позиционирования во внутренних непредвиденных ситуациях управления PTS_{ACCS2} .

4. Быстродействие I_T

Количество итераций от начала воздействия в течение которых осуществляется позиционирование каждого из звеньев с допустимой ошибкой $2\Delta < 1 \text{ deg}$:

$$I_T = I \left| \left(|q_{1ref} - q_1| < 1 \text{ deg} \right) \cap \left(|q_{2ref} - q_2| < 1 \text{ deg} \right) \cap \dots \cap \left(|q_{7ref} - q_7| < 1 \text{ deg} \right) \right| ,$$

$$I_{T \text{ выполнение}} \equiv 1 - \frac{\sum_{i=1}^N I_T}{NI_{\max}}$$

4. Относительное значение перерегулирования σ

Отношение максимального отклонения текущего положения звена от установившегося значения к установившемуся значению

$$\sigma = \max \left[\max \left| \frac{q_{1ref} - q_1}{q_{1ref}} \right| \quad \max \left| \frac{q_{2ref} - q_2}{q_{2ref}} \right| \quad \dots \quad \max \left| \frac{q_{7ref} - q_7}{q_{7ref}} \right| \right] ,$$

$$\sigma \text{ выполнение} \equiv 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \sigma}{N}$$

5. Относительная ошибка позиционирования звеньев по завершении заданного числа итераций ε

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon = \left| \frac{q_{1ref} - q_1}{q_{1ref}} \right|, \text{ if } \left(|q_{1ref} - q_1| > |q_{2ref} - q_2| \right) \cap \left(|q_{1ref} - q_1| > |q_{3ref} - q_3| \right) \cap \dots \cap \left(|q_{1ref} - q_1| > |q_{7ref} - q_7| \right) \\ \varepsilon = \left| \frac{q_{2ref} - q_2}{q_{2ref}} \right|, \text{ if } \left(|q_{2ref} - q_2| > |q_{1ref} - q_1| \right) \cap \left(|q_{2ref} - q_2| > |q_{3ref} - q_3| \right) \cap \dots \cap \left(|q_{2ref} - q_2| > |q_{7ref} - q_7| \right) \\ \dots \\ \varepsilon = \left| \frac{q_{7ref} - q_7}{q_{7ref}} \right|, \text{ if } \left(|q_{7ref} - q_7| > |q_{1ref} - q_1| \right) \cap \left(|q_{7ref} - q_7| > |q_{2ref} - q_2| \right) \cap \dots \cap \left(|q_{7ref} - q_7| > |q_{6ref} - q_6| \right) \end{array} \right.$$

$$\varepsilon \text{ выполнение} \equiv 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon}{N}$$

6. Время одной итерации t

Реальное время выполнения одной итерации I выбранного типа системы управления:

$$t_{\text{выполнение}} \equiv 1 - \frac{t}{t_{\text{const}}}, t < t_{\text{const}}.$$

7. Сложность реализации управления P

Оценка изменения коэффициентов управления:

$$P_{\text{выполнение}} \equiv 1 - \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \int_{i=1}^N \left(\frac{dK}{dt} \right)^2 dt}}{\max(K)}.$$

8. Общая оценка управления FCB (*Full Control Behavior*)

$$FCB \equiv w_1 \cdot P[\text{PTS}_{\text{KCS}}] + w_2 \cdot P[\text{PTS}_{\text{ACCS1}}] + w_3 \cdot P[\text{PTS}_{\text{ACCS2}}] + w_4 \cdot P[I_T] + w_5 \cdot P[\sigma] + w_6 \cdot P[\varepsilon] + w_7 \cdot P[t] + w_8 \cdot P,$$

где $w = [0.1 \ 0.2 \ 0.2 \ 0.2 \ 0.05 \ 0.1 \ 0.1 \ 0.05]$ — весовые коэффициенты.

1.5. Качество систем управления с постоянными коэффициентами ПИД-регулятора

Как уже было сказано, задача управления сводится к нахождению коэффициентов ПИД-регулятора $K_{Pi}, K_{D}, K_{Ii}, i = \overline{1, 7}$, при которых обеспечивается желаемый характер движения манипулятора.

Рассматриваются два типа систем автоматического управления (САУ) с постоянными коэффициентами: система управления на ПИД-регуляторе и с использованием ГА.

Сравнение работы систем управления манипулятором с семью степенями свободы на основе ПИД-регулятора и с использованием ГА в соответствии с введенной системой критериев качества приведены в Таблице 2, а также на рис. 7.

Из результатов сравнения двух типов систем управления (на основе ПИД-регулятора и с использованием ГА) видно, что:

1) при использовании системы управления на ПИД-регуляторе задача позиционирования не решена ни в одном эксперименте в штатных ситуациях и внешних непредвиденных ситуациях управления, незначительные положительные результаты (3 эксперимента из 52) получены для внутренних непредвиденных ситуаций управления;

Таблица 2. Сравнение работы систем управления с постоянными коэффициентами

Критерии качества	Качество управления	САУ на основе ПИД-регулятора	САУ с использованием ГА
1	Решение в штатных ситуациях управления	0,000	0,615

2	Решение в непредвиденных ситуациях: внешние возмущающие воздействия	0,000	0,256
3	Решение в непредвиденных ситуациях: изменения параметров ОУ	0,058	0,308
4	Быстродействие	0,000	0,008
5	Относительное значение перерегулирования	0,892	0,956
6	Относительная ошибка позиционирования звеньев	0,379	0,657
7	Время одной итерации	0,998	0,998
8	Сложность реализации управления	1,000	1,000
9	Общее управление	0,244	0,439

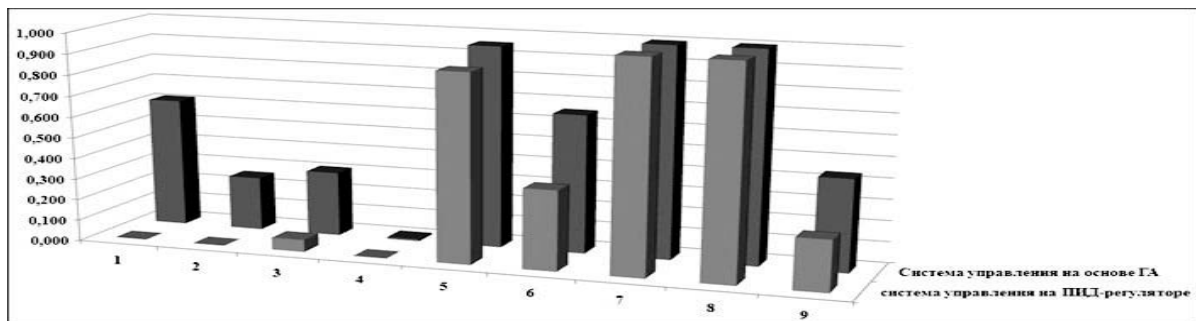


Рис. 7. Сравнение результатов работы систем управления на основе ПИД-регулятора и с использованием ГА при тестировании MatLab/Simulink моделей

2) некоторое улучшение достигается при использовании системы управления на основе ГА: решение задачи позиционирования в штатных ситуациях управления достигается в большинстве экспериментов, однако в непредвиденных ситуациях управления (как внешних, так и внутренних) — решение достигнуто менее, чем в трети экспериментов;

3) и система управления на основе ПИД-регулятора, и с использованием ГА имеют низкое быстродействие;

4) при использовании системы управления на ГА значительно улучшаются показатели относительных значений перерегулирования и ошибок позиционирования по сравнению с системой управления на ПИД-регуляторе;

5) при использовании системы управления на ГА общая оценка управления по сравнению с системой управления на ПИД-регуляторе улучшается в 1,8 раз.

На рис. 8 продемонстрирована работа манипулятора при использовании систем управления на ПИД-регуляторе и с использованием ГА в условиях третьей внешней непредвиденной ситуации управления (изменено начальное положение и в разные моменты времени звенья принудительно перемещаются). В выбранном для демонстрации

эксперименте система управления на ГА решает задачу управления, в отличие от системы управления на ПИД-регуляторе.

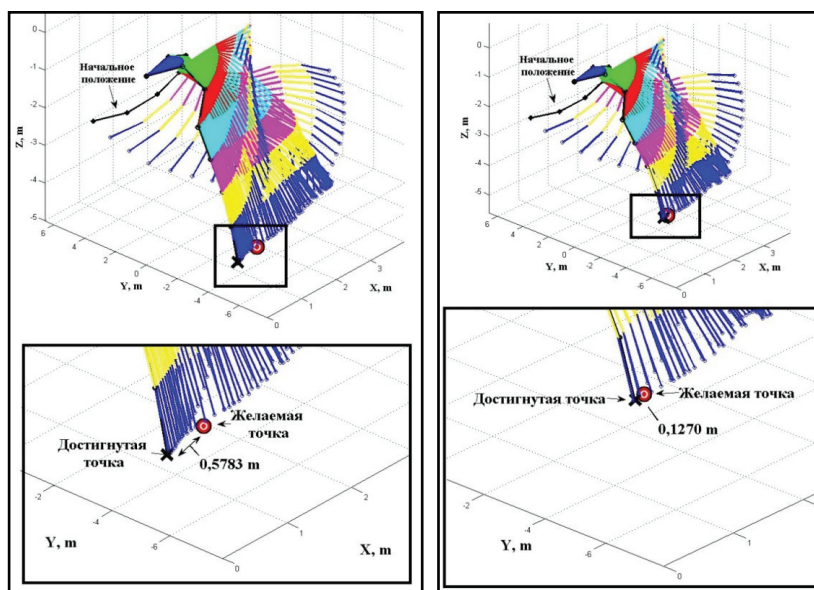


Рис. 8. Движение робота манипулятора в условиях внешней непредвиденной ситуации: под управлением ПИД-регулятора (слева); системы управления с использованием ГА (справа)

Несмотря на то, что система управления на ГА значительно улучшает оценки критериев качества по сравнению с системой управления на ПИД-регуляторе, в целом обеспечиваемое системой управления на ГА качество управления довольно низкое.

В процессе управления коэффициенты ПИД-регулятора для рассмотренных структур не изменяются. Данное обстоятельство, с одной стороны, облегчает проектирование системы управления, а с другой, лишает систему управления возможности перестроения и адаптации.

Поэтому в качестве следующей ступени развития систем управления рассматриваем структуру с динамической адаптацией коэффициентов ПИД-регулятора, реализованной на основе технологий мягких вычислений.

1.6. Качество систем управления с применением технологий мягких вычислений

Тестирование полученных БЗ1–БЗ7 соответственно НР1–НР7 проводится в составе ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях.

Результаты испытаний ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях в соответствии с введенной системой критериев качества в сравнении с системами управления с постоянными коэффициентами (на основе ПИД-регулятора и с использованием ГА), приведены в Таблице 3 и на рис. 9

Таблица 3. Сравнение результатов работы систем управления с постоянными коэффициентами и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях.

Качество управления	ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях	САУ с использованием ГА	САУ на основе ПИД-регулятора
Решение в штатных ситуациях управления	0,923	0,615	0,000
Решение в непредвиденных ситуациях: внешние возмущающие воздействия	0,744	0,256	0,000
Решение в непредвиденных ситуациях: изменения параметров ОУ	0,923	0,308	0,058
Быстродействие	0,092	0,008	0,000
Относительное значение перерегулирования	0,969	0,956	0,892
Относительная ошибка позиционирования звеньев	0,911	0,657	0,379
Время одной итерации	0,973	0,998	0,998
Сложность реализации управления	0,946	1,000	1,000
Общее управление	0,728	0,439	0,244

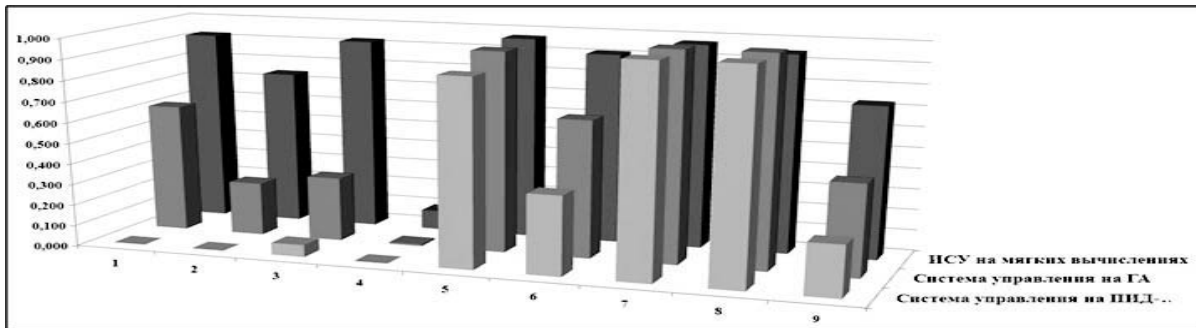


Рис. 9. Сравнение результатов работы ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях и систем управления с постоянными коэффициентами при тестировании MatLab/Simulink моделей

Из результатов сравнения систем управления (ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях, системы управления на основе ПИД-регулятора и с использованием ГА) видно, что при использовании ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях:

- повысился процент решения задачи позиционирования в штатных ситуациях (решение положительное в 12 из 13 экспериментах) по сравнению с системами управления с постоянными коэффициентами (на основе ПИД-регулятора и с использованием ГА);
- значительно повысился процент решения задачи позиционирования в непредвиденных ситуациях управления по сравнению с системами управления с постоянными коэффициентами: для внешних непредвиденных ситуаций в 2,9 раз и в 3 раза для внутренних непредвиденных ситуаций (в сравнении с

системой управления на основе ГА);

- значительно увеличилось быстродействие: более чем в 10 раз по сравнению с системой управления на основе ГА; однако по-прежнему, быстродействие достаточно низкое;
- улучшились показатели относительного значения перерегулирования и относительной ошибки позиционирования звеньев по сравнению с системами управления с постоянными коэффициентами, но несколько ухудшились оценки времени одной итерации и сложности реализации управления;
- общая оценка управления улучшена в 1,7 раз по сравнению с системой управления с использованием ГА и в 3 раза по сравнению с системой управления на основе ПИД-регулятора.

На рис. 10 продемонстрирована работа манипулятора при использовании системы управления на основе ГА и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях в условиях первой внешней непредвиденной ситуации управления (в разные моменты времени звенья принудительно перемещаются).

На рис. 11 продемонстрирована работа манипулятора при использовании системы управления на основе ГА и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях в условиях четвертой внутренней непредвиденной ситуации управления (внесение погрешностей в систему измерения).

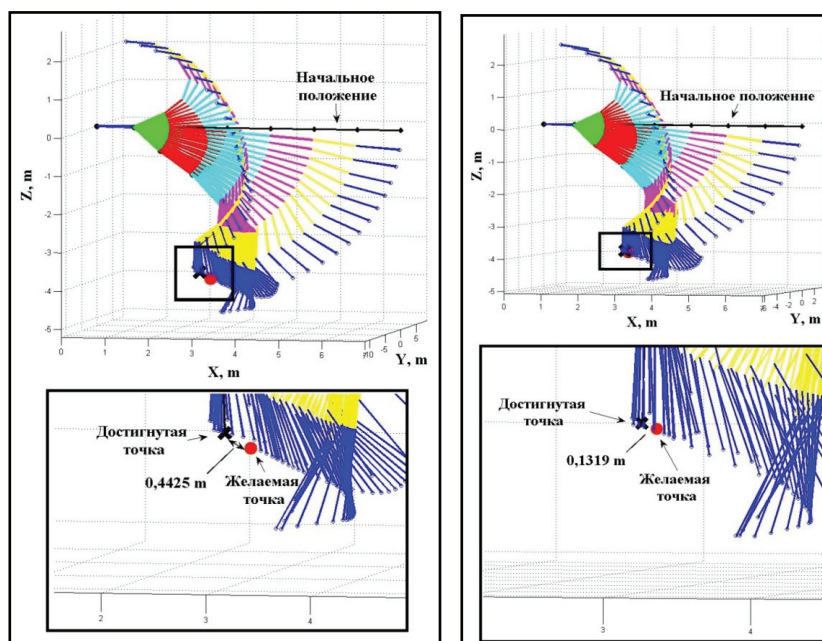


Рис. 10. Движение робота манипулятора в условиях внешней непредвиденной ситуации: результат работы системы управления на основе ГА (слева); ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях (справа)

На рис. 12 для рассматриваемой ситуации управления приведено сравнение фазовых портретов при использовании системы управления на основе ГА и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях.

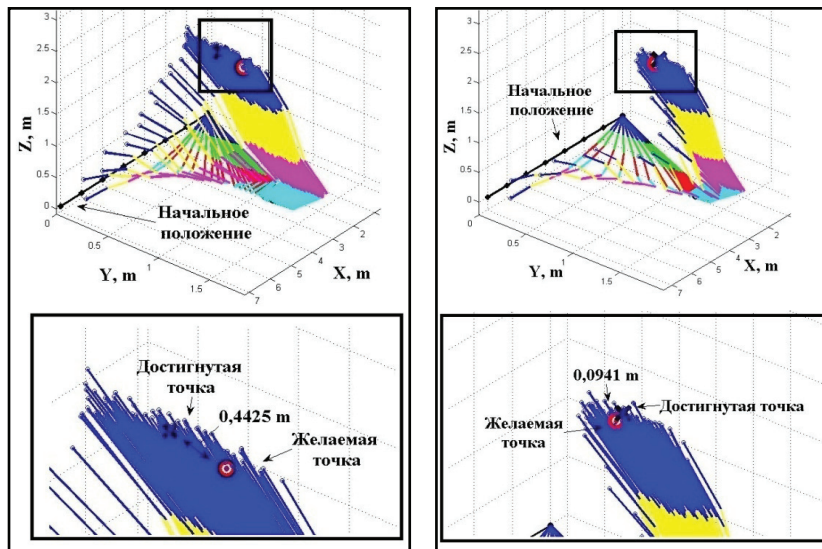


Рис. 11. Движение робота манипулятора в условиях внутренней непредвиденной ситуации: результат работы системы управления на основе ГА (слева); ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях (справа)

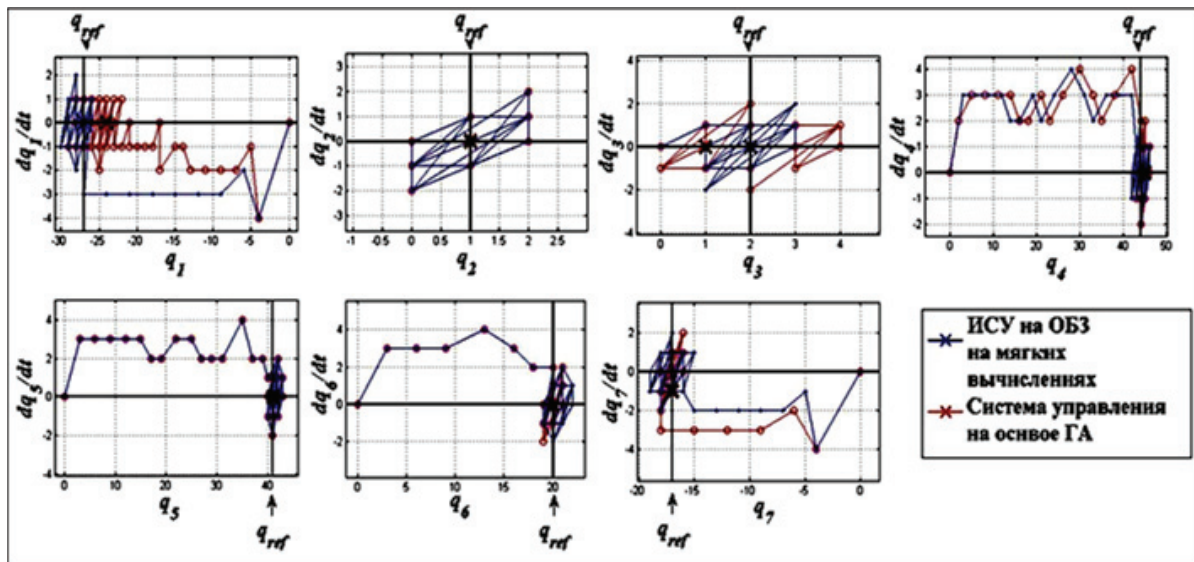


Рис. 12. Изменение положений звеньев робота манипулятора в условиях внутренней непредвиденной ситуации: сравнение работы системы управления на основе ГА и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях

ИСУ роботом манипулятором с семью степенями свободы на ОБЗ на мягких вычислениях значительно улучшает качество управления по сравнению с системами управления с постоянными коэффициентами (на основе ПИД-регулятора и с использованием ГА), однако показатель быстродействия остается на достаточно низком уровне.

Ввиду того, что ОУ сложен, ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях была организована с разделением управления: каждому звену манипулятора соответствует один независимый

НР. Однако декомпозиция управления ведет к рассогласованию работы и некоторому снижению качества управления.

Организовать координационное управление без значительного увеличения сложности системы возможно путем введения дополнительных обобщающих звеньев, реализация которых возможна с использованием технологий квантовых вычислений.

На примере сложного ОУ — работа манипулятора с семью степенями свободы — были рассмотрены принципы проектирования систем управления:

- классических — на основе ПИД-регулятора;
- с применением ГА;
- с применением технологий мягких вычислений.

На уровне моделирования (с использованием пакета MatLab/Simulink), было продемонстрировано, что

- система управления с постоянными коэффициентами на основе ПИД-регулятора при управлении сложным ОУ не способна решить задачу точного позиционирования даже в штатных ситуациях управления;
- система управления с постоянными коэффициентами с использованием ГА решает задачу точного позиционирования в штатных ситуациях управления, однако плохо справляется в условиях непредвиденных ситуаций управления;
- ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях в большинстве случаев справляется с решением задачи позиционирования как в штатных, так и непредвиденных ситуациях управления, в отличие от систем управления с постоянными коэффициентами, при этом улучшая оценки по основным показателям критериев качества.

Далее рассмотрим более простой, часто применяемый как в промышленности, так и в обучении ОУ — робот манипулятор с тремя степенями свободы.

Системы управления роботом манипулятором с тремя степенями свободы будут рассмотрены как на уровне моделирования, так и на физическом уровне.

Для демонстрации работы систем управления был разработан макет робота манипулятора с тремя степенями свободы.

2. Построение системы управления манипулятором с тремя степенями свободы

2.1. Описание макета робота манипулятора с тремя степенями свободы

На рис. 13 представлен макет, используемый для тестирования систем управления — манипулятор с тремя степенями свободы.

В качестве ИС (рис. 13, акселерометры) в макете используются три платы с установленными на них акселерометрами с тремя степенями свободы ADXL335.

Ядром системы является микроконтроллер UPD78F1166 (рис. 13, плата управления) компании *Renesas*. Информация о текущих положениях звеньев и характеристиках качества управления выводится на дисплей и последовательный (*UART*) интерфейс.

Поддерживается как режим автоматического, так и режим ручного управления (возможность перемещения каждого из трех звеньев и устройства захвата манипулятора с помощью кнопок ручного управления).

В робототехнике, как правило, строится математическая модель робота манипулятора, проводится моделирование ОУ, идентификация параметров математической модели, и затем сравнение результатов моделирования на математической модели ОУ и реальном физическом роботе манипуляторе [8, 9].

В отличие от традиционного подхода, в данной случае поведение звеньев макета робота манипулятора было формализовано таблицами соответствий «ширина управляющего импульса сервопривода — угол перемещения», что позволило описать поведение макета в среде *MatLab/Simulink*, т.е. была создана модель реального ОУ без привлечения математической модели манипулятора.

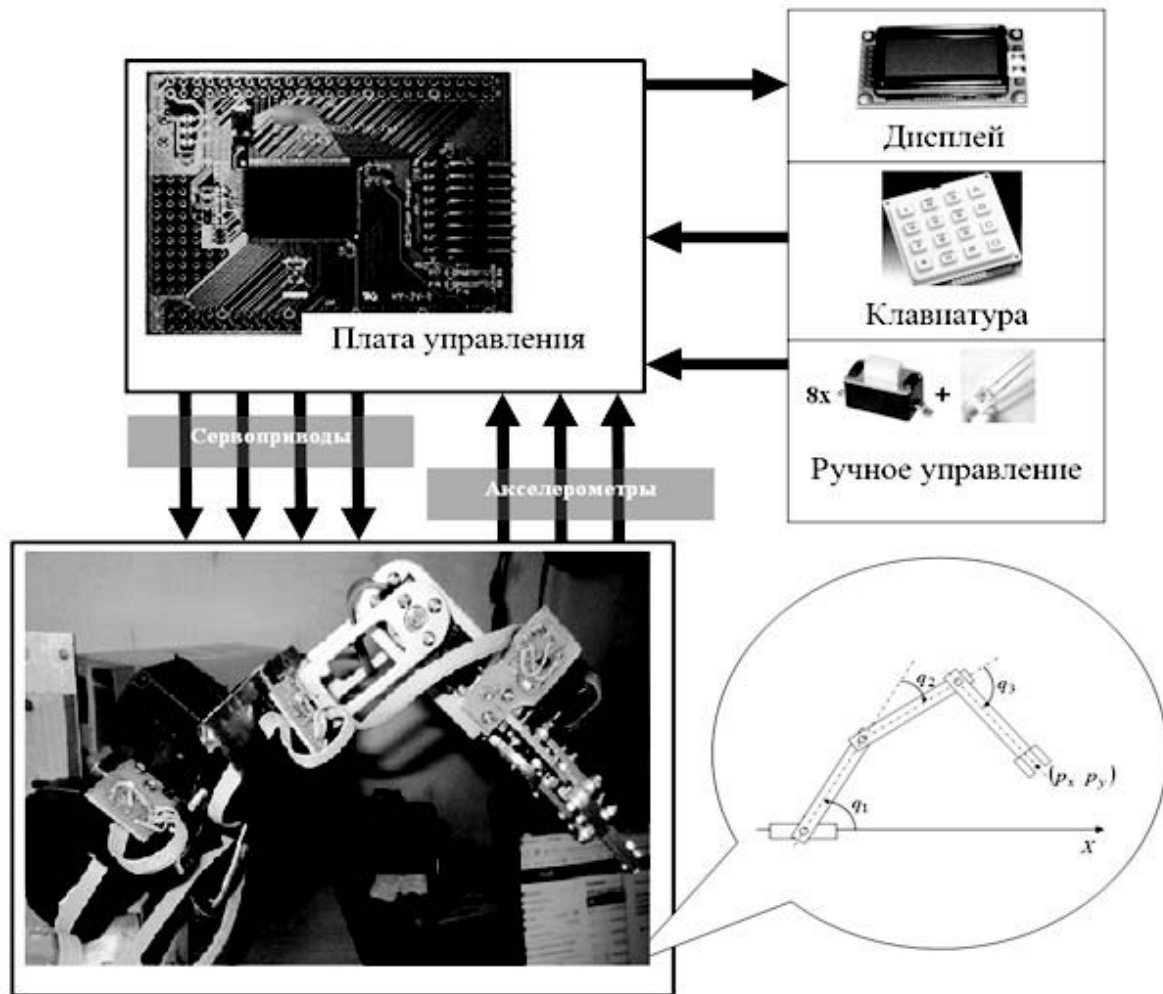


Рис. 13. Макет робота

Создание модели реального ОУ позволило ускорить идентификацию модели ОУ и получение приемлемых параметров управления.

2.2. Постановка задачи управления

Для пояснения работы ПИД-регулятора, в применении к роботу манипулятору с тремя степенями свободы, рассмотрим прямую цепь контура управления.

На рис. 14: $E = [\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \varepsilon_3]$ — ошибка управления, $K_{Pi}, K_{Di}, K_{Ii}, i = \overline{1,3}$ — пропорциональные, дифференциальные и интегральные коэффициенты ПИД-регулятора, i — номер соответствующего звена робота манипулятора, $U = [u_1 \ u_2 \ u_3]$ — управляющее воздействие, $Q = [q_1 \ q_2 \ q_3]$ — регулируемая величина [11].

Задача управления сводится к нахождению коэффициентов ПИД-регулятора $K_{Pi}, K_{Di}, K_{Ii}, i = \overline{1,3}$, при которых обеспечивается желаемый характер движения.

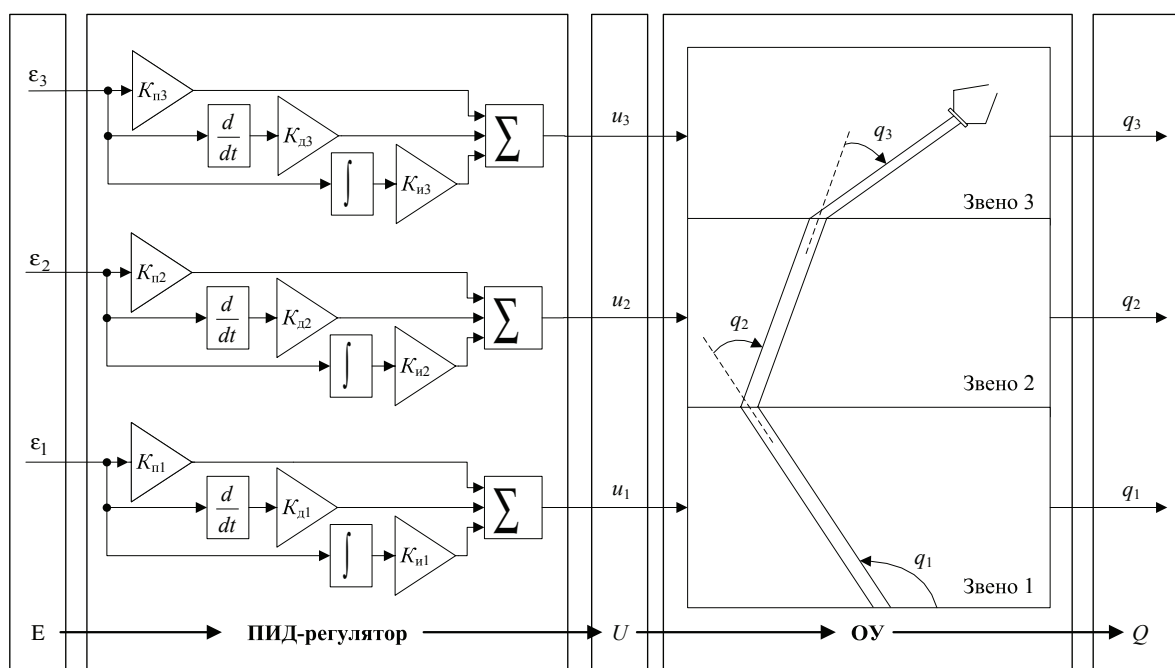


Рис. 14. Прямая цепь системы управления с ПИД-регулятором

2.3. Порядок проведения испытаний

Для каждого из рассмотренных типов систем управления (управления на основе ГА, ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением) проводится серия экспериментов, которая оценивается по введенным выше критериям качества.

Серия экспериментов состоит из двух этапов:

- работа в штатных ситуациях управления,
- работа в непредвиденных ситуациях управления.

В качестве штатных ситуаций управления выступают десять экспериментов в соответствии с группой точек рабочего пространства, определенных как тестовых (рис. 15).

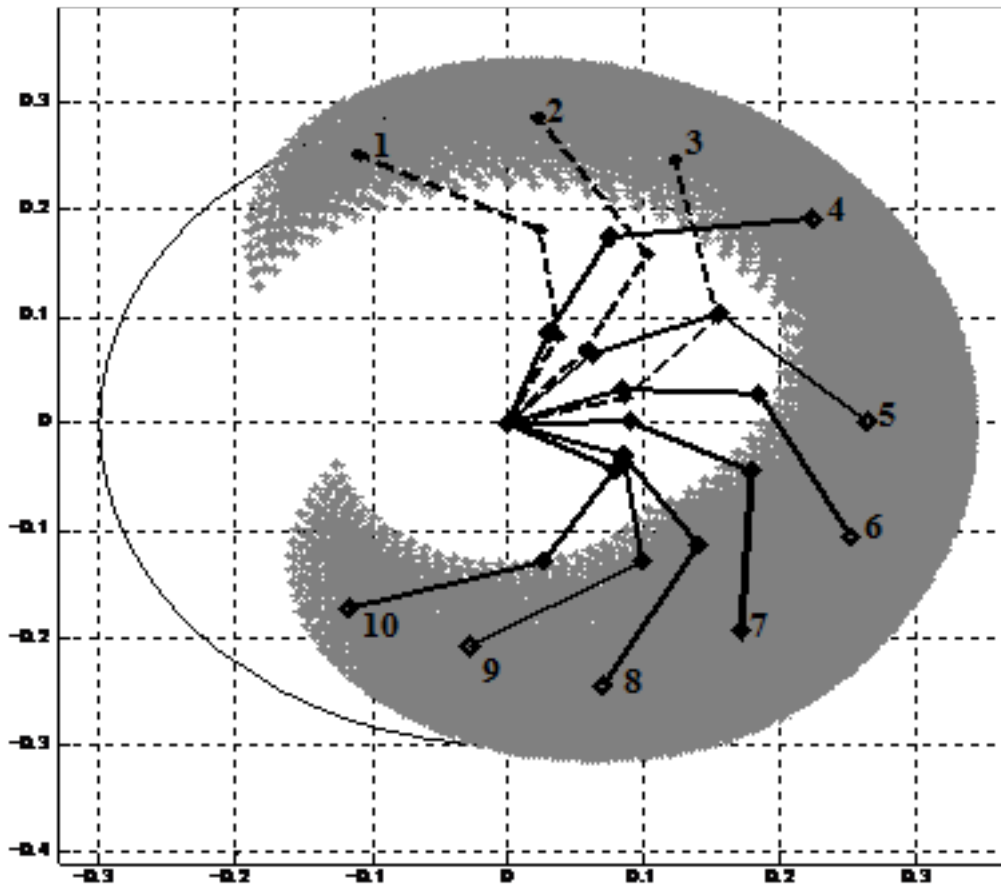


Рис. 15. Тестовое пространство

За начальное положение манипулятора принимается конфигурация: $q_1 = 60$ град;
 $q_2 = 0$ град; $q_3 = 0$ град.

В качестве нештатных ситуаций управления выступают три случая:

- 1) на 11-ой итерации положение второго звена принудительно изменяется до значения $q_2 = 45$ град;
- 2) изменены начальные условия: $q_1 = 60$ град; $q_2 = 45$ град; $q_3 = -43$ град;
- 3) изменены начальные условия: $q_1 = 60$ град; $q_2 = 45$ град; $q_3 = -43$ град и на 11-ой итерации положение второго звена принудительно изменяется до значения $q_2 = 45$ град.

Каждая из трех непредвиденных ситуаций тестируется на десяти точках тестового пространства. Таким образом, проводится 30 экспериментов для непредвиденных ситуаций управления.

Рассмотрим особенности проектирования ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях для работа манипулятора с тремя степенями свободы.

2.4. Проектирование интеллектуальной системы управления с применением Оптимизатора Баз Знаний на основе мягких вычислений

Как было сказано ранее, основным элементом ИСУ с применением технологий мягких вычислений является НР с заложенной БЗ, управляющий коэффициентами усиления ПИД-регулятора.

Для рассматриваемого ОУ — работа манипулятора с тремя степенями свободы возможна реализация ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях как с одним НР, так и с разделенным управлением.

Рассмотрим более подробно процесс создания БЗ для ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР.

1. Создание ОС. Первоначально необходимо определить типовую ситуацию управления. В качестве типовых ситуаций управления можно рассматривать штатные ситуации управления.

Для создания обучающего сигнала (ОС) были использованы три эксперимента (из штатных), для каждого из которых были созданы ОС1, ОС2 и ОС3, для чего с помощью *MatLab/Simulink* моделей были воспроизведены ситуации управления, в которых параметры ПИД-регулятора определялись с помощью ГА.

Рассматриваемые ОС1–ОС3 представляют собою таблицы, где столбцы 1–9 являются входными значениями $[err_{p1}, err_{d1}, err_{i1}, err_{p2}, err_{d2}, err_{i2}, err_{p3}, err_{d3}, err_{i3}]$ — векторы входных переменных пропорциональных, дифференциальных и интегральных ошибок первого, второго и третьего звеньев манипулятора, а столбцы 10–18 являются выходными значениями $[K_{p1}, K_{d1}, K_{i1}, K_{p2}, K_{d2}, K_{i2}, K_{p3}, K_{d3}, K_{i3}]$ — векторы выходных переменных (определенных ГА) пропорциональных, дифференциальных и интегральных коэффициентов ПИД-регулятора первого, второго и третьего звеньев манипулятора соответственно.

Итоговый ОС, используемый для получения БЗ состоит из последовательно соединенных ОС1, ОС2 и ОС3.

2. Формирование модели нечеткого вывода.

Конкретизируется:

тип нечеткой модели: Сугено 0 (нулевого порядка);

интерпретация нечетких операций — нечеткая конъюнкция как произведение;

число входных и выходных переменных: 9 и 9.

3. Создание лингвистических переменных для входных значений.

С помощью ГА в составе ОБЗ определяются оптимальное число и форма функций принадлежности.

При создании БЗ первоначально было задано создание пяти функций принадлежности для каждой из девяти входных переменных, т.е. вектор $[n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7, n_8, n_9] = [5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5]$, что привело бы к созданию $n_1 \times n_2 \times n_3 \times n_4 \times n_5 \times n_6 \times n_7 \times n_8 \times n_9 = 1953125$ нечетких правил.

После работы ГА вектор $[n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7, n_8, n_9]$ принял значение $[4, 4, 4, 4, 3, 4, 4, 3, 3]$, а максимальное число нечетких правил составило 110592.

4. Создание базы правил.

Благодаря использованию алгоритма отбора правил (прохождение заданного порога активации), из 110592 правил были отобраны 33 наиболее робастных.

5. Настройка базы правил. Оптимизация левых и правых частей правил БЗ.

Используется традиционный метод обратного распространения ошибки.

В данном разделе приводилась зависимость максимального числа нечетких правил от количества функций принадлежности для входных переменных n_i ; максимальное число нечетких правил для созданной ранее БЗ при трех-четырех функциях принадлежности составляло 110592 правил.

Предположим меньшее количество функций принадлежности — для каждой входной переменной равное трем. Тогда зависимость максимального числа нечетких правил от числа степеней свободы манипулятора имеет вид, приведенный на рис. 16.

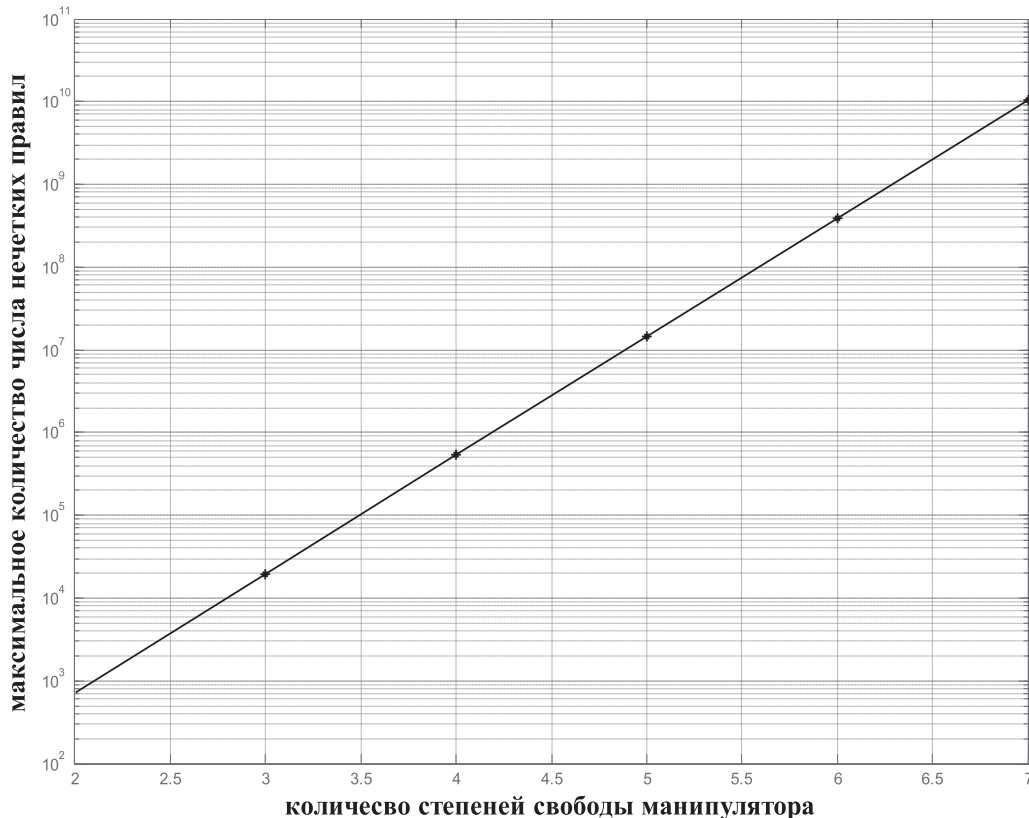


Рис. 16. Зависимость максимального числа нечетких правил от числа степеней свободы манипулятора

При необходимости введения дополнительных звеньев, расширения функций уже существующих или добавления прочих устройств, требующих координационного управления, каждая степень свободы будет увеличивать максимальное число нечетких правил

более чем на полтора порядка. Это приводит к увеличению сложности создания БЗ, и, как следствие, увеличению времени создания БЗ, повышению требований к вычислительным ресурсам процессора, на котором создаются БЗ и объему памяти системы, в которой размещается БЗ.

При возникновении ситуаций, когда сложность реализации единой БЗ высока, необходимо разделение БЗ на несколько, соответственно использовать не один НР, а несколько НР.

Рассмотрим разделение управления, при котором один НР управляет одним звеном манипулятора.

Необходимо создать три БЗ для соответственно трех НР. Число входных и выходных переменных для каждой из баз снизится в три раза, и как следствие снизится максимальное число нечетких правил.

Рассмотрим процесс создания БЗ.

1. Создание обучающего сигнала.

Созданы три ОС для трех БЗ (соответственно трех звеньев) Каждый из ОС в свою очередь, состоит из двух ОС (соответственно двух типовых экспериментов).

Конечные ОС для создания трех независимых БЗ (соответственно ОС1, ОС2 и ОС3) содержат в левых столбцах вектор входных переменных пропорциональных, дифференциальных и интегральных ошибок ($[errP1, errD1, errI1]$, $[errP2, errD2, errI2]$ и $[errP3, errD3, errI3]$ соответственно для первого, второго и третьего звеньев манипулятора); в правом столбцах — вектор выходных переменных (определенных ГА) пропорциональных, дифференциальных и интегральных коэффициентов ПИД-регулятора ($[KP1, KD1, KI1]$, $[KP2, KD2, KI2]$ и $[KP3, KD3, KI3]$ соответственно для первого, второго и третьего звеньев манипулятора).

2. Формирование модели нечеткого вывода.

Для каждой из трех БЗ

- тип нечеткой модели: Сугено 0;
- интерпретация нечетких операций: нечеткая конъюнкция как произведение;
- число входных и выходных переменных: 3 и 3.

3. Создание лингвистических переменных для входных значений.

С помощью ГА1 в составе ОБЗ определяются оптимальное число и форма функций принадлежности.

При создании БЗ1, БЗ2 и БЗ3 и оптимизации ГА1, число функций принадлежности составило [3 3 5], [5 5 9] и [7 7 8], максимальное число нечетких правил соответственно 45, 225 и 392 соответственно.

4. Создание базы правил.

Для БЗ1 из 45 правил отобрано 18, для БЗ2 из 225 правил — 26, для БЗ3 из 392 правил — 48.

Напомним, что при создании БЗ для ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР, максимальное число нечетких правил составляло 110592, из которых было отобрано 33 наиболее робастных.

В рассматриваемом случае с разделенным управлением, максимальное число правил (для БЗ3) составляет 392, что существенно снижает время отбора наиболее робастных правил.

Однако, в целом количество отобранных правил ($18+26+48 = 92$ — суммарное количество отобранных правил БЗ1, БЗ2 и БЗ3) более чем в 2 раза превышает количество отобранных правил при использовании ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР.

Следовательно, размещение конечных БЗ при использовании ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением потребует большего объема памяти конечного устройства, в котором размещается система.

5. Настройка базы правил. Оптимизация левых и правых частей правил БЗ.

Используется традиционный метод обратного распространения ошибки.

2.5. Моделирование и эксперимент: оценка качества управления

Сравнение критериев качества управления для системы управления на основе ГА, ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением для *MatLab/Simulink* моделей и макета робота манипулятора приведено соответственно на рис. 17 и 18.

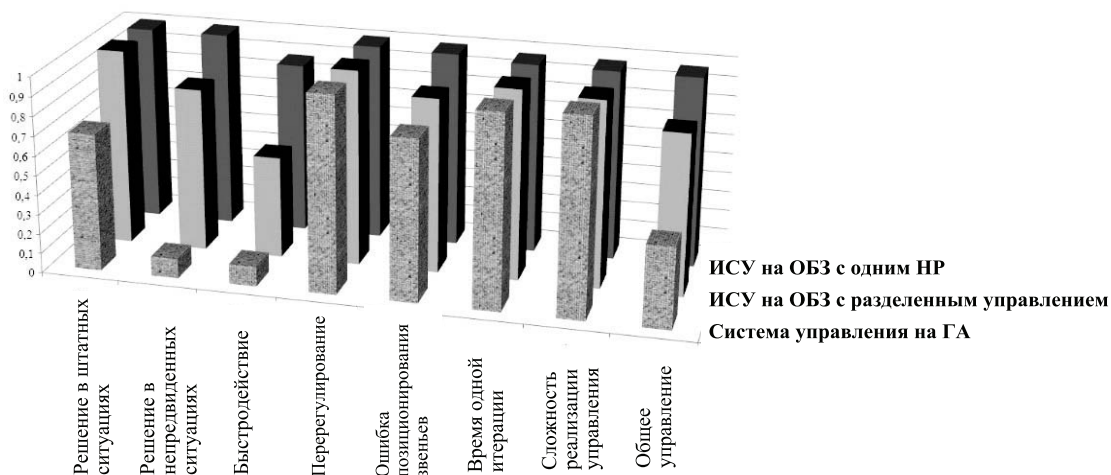


Рис. 17. Сравнение результатов работы системы управления на основе ГА, ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением при тестировании *MatLab/Simulink* моделей

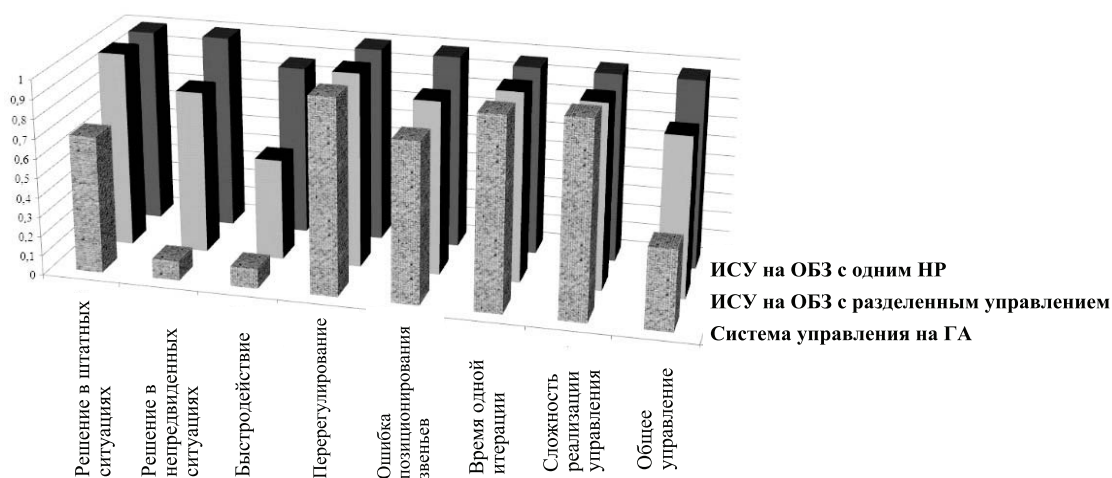


Рис. 18. Сравнение результатов работы системы управления на основе ГА, ISU на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР и ISU на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением при физическом тестировании Модуля Манипулятора.

Из результатов сравнения трех типов систем управления видно, что использование системы управления на ГА решает задачу точного позиционирования в половине из предложенных случаев. Однако система управления на основе ГА не обеспечивает гарантированного управления в условиях непредвиденных ситуациях управления (что демонстрируется на рис. 19 — в качестве непредвиденной выступает ситуация, одновременно включающая внешнее воздействие и внутренние изменения регулирующего звена), в целом качество управления достаточно низкое.

В системе управления на основе ГА коэффициенты ПИД-регулятора не изменяются, что, с одной стороны, облегчает проектирование системы управления, а с другой, лишает систему управления возможности перестроения и адаптации.

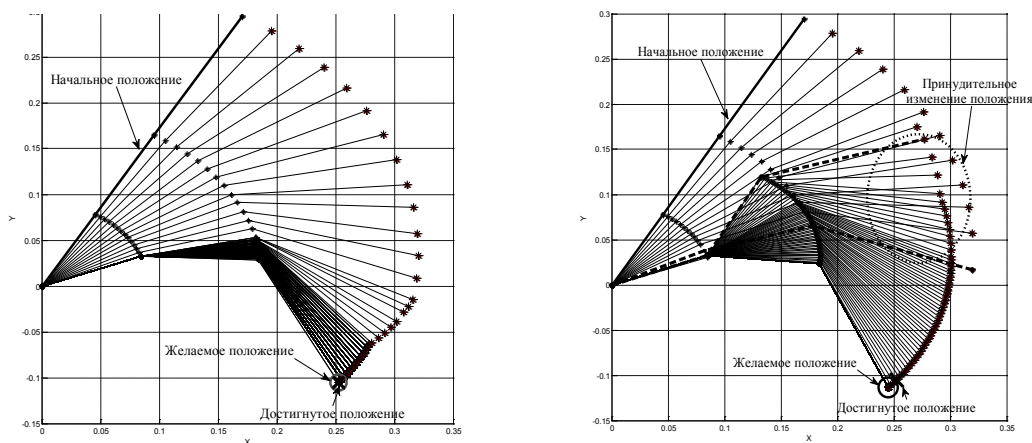


Рис. 19. Работа системы управления на основе ГА: в штатной ситуации управления (слева); в непредвиденной ситуации управления (справа)

Из рис. 20 и 19 видно, что оба из двух предложенных вариантов реализации ИСУ на ОБЗ с применением технологий мягких вычислений в отличие от системы управления на основе ГА, справляются с задачей точного позиционирования. Причем структура ИСУ с использованием единой БЗ обеспечивает решение за меньшее количество итераций, чем структура ИСУ с разделенным управлением.

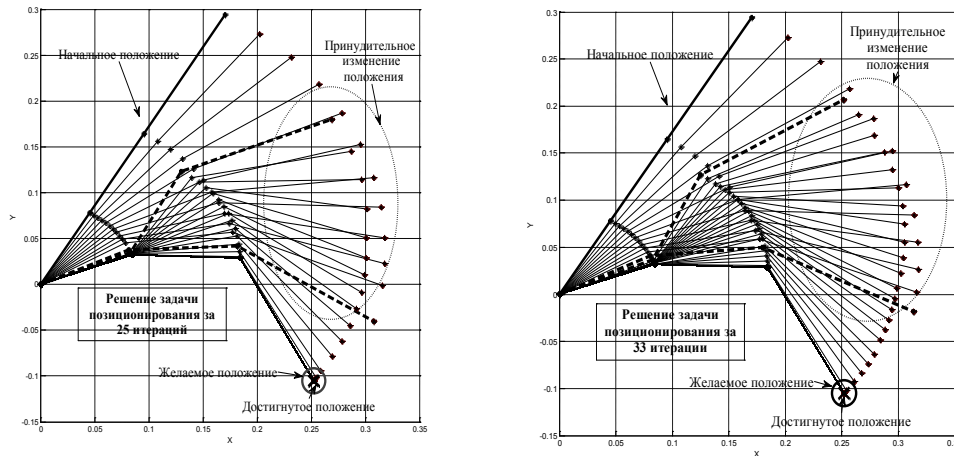


Рис. 20. Работа ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР в непредвиденной ситуации управления (слева); работа ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с тремя НР (справа)

Использование ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР позволяет получить максимальные оценки критериев качества «Решение задачи позиционирования в штатных ситуациях управления» и «Решение задачи позиционирования в непредвиденных ситуациях управления», а также добиться улучшения всех показателей, кроме как по критериям «Время одной итерации» и «Сложность реализации управления», т.к. динамическая настройка коэффициентов требует дополнительных вычислений.

ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР позволяет собрать в единую БЗ информацию о взаимном поведении одновременно трех звеньев робота манипулятора, однако высокая сложность реализуемой БЗ требует значительных вычислительных ресурсов для создания и размещения.

Разделение управляющего звена на три независимых НР (одна БЗ управляет одним звеном) позволяет за счет некоторого снижения качества управления значительно упростить процессы создания, оптимизации и размещения БЗ.

Из результатов сравнения видно, что при использовании ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением (с тремя НР) все показатели качества несколько ухудшаются, что происходит в результате рассогласования работы разделенных независимых БЗ.

2.6. Формирование законов управления

Рассмотрим законы управления, формируемые рассмотренными типами систем

управления: системой управления на основе ГА, ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением (рис. 21).

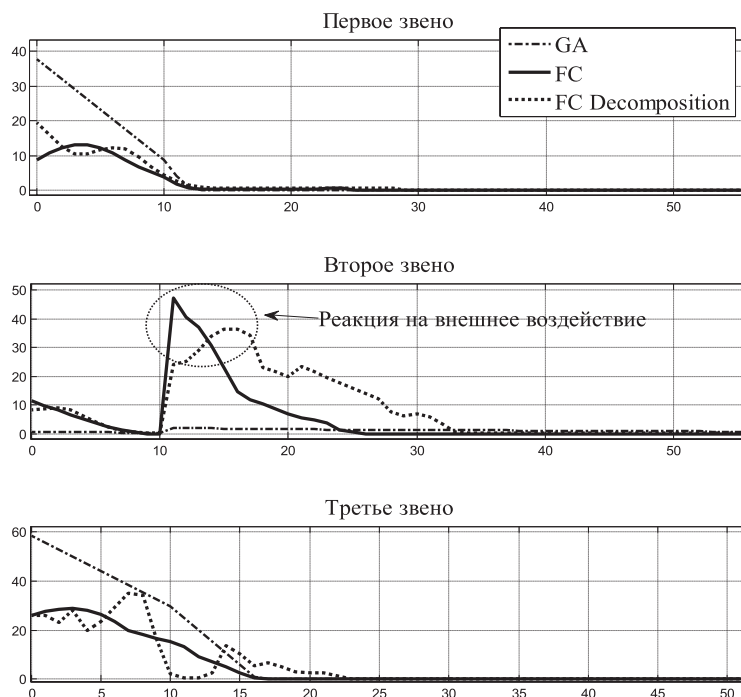


Рис. 21. Законы управления, формируемые системой управления на ГА, ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением

На рис. 21 используются следующие обозначения законов управления: «GA» — формируемый системой управления на основе ГА, «FC» — формируемый ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР, «FC Decomposition» — формируемый ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением.

Из рис. 21 видно, что законы управления, формируемые системой управления на основе ГА для первого и третьего звеньев имеют заведомо большую амплитуду по сравнению с аналогичными законами управления, формируемыми ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях, однако для второго звена в законе управления, формируемом системой управления на основе ГА, не отражается реакция на внешнее воздействие, в результате чего задача точного позиционирования не решается. Законы управления, формируемые ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением, по сравнению с ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР, при сравнимой амплитуде, имеют большее перерегулирование.

Таким образом, минимальный расход полезного ресурса при формировании законов управления обеспечивается при использовании ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР.

Заключение

Для управления роботами манипуляторами различной сложности были рассмотрены:

- системы управления с постоянными коэффициентами ПИД-регулятора;
- системы управления с подстраиваемыми в зависимости от ситуации управления коэффициентами ПИД-регулятора.

Было показано, что:

- системы управления с постоянными коэффициентами на основе ГА привлекательны ввиду простоты реализации, однако вследствие постоянства параметров управления, решение задачи точного позиционирования возможно только для штатных ситуаций;
- единая БЗ ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР содержит наиболее полную информацию о поведении всех звеньев, что позволяет ИСУ работать как в штатных, так и непредвиденных ситуациях управления. Однако создание единой БЗ — сложный и длительный процесс, требующий значительных вычислительных ресурсов. Так, реализация единой БЗ для сложного ОУ — работа манипулятора с семью степенями свободы — не представляется возможной;
- декомпозиция управления в структуре ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением, за счет незначительного снижения качества управления вследствие рассогласования поведения звеньев в результате независимости создания и функционирования БЗ, позволяет значительно упростить процессы создания и размещения БЗ.

Библиография :

1. Khoogar, A. R. Obstacle Avoidance for Redundant Manipulators Using a Genetic Algorithm / A. R. Khoogar [et al.], Southeastcon '91 Conference, Williamsburg, VA, 7–10 Apr., 1991 — Vol. 1. — P. 317—320.
2. Secara, C. Iterative genetic algorithm based strategy for obstacles avoidance of a redundant manipulator / C. Secara, L. Vladareanu // Wseas Transaction on Mathematics. — 2010. — Vol. 9, № P. 211—221.
3. Yu, W. Neural PID Control of Robot Manipulators With Application to an Upper Limb Exoskeleton / W. Yu, J. Rosen // Cybernetics, IEEE Transactions. — 2013. — Vol. 43, № 2. P. 673—684.
4. Jasour, A. M. Path Tracking and Obstacle Avoidance for Redundant Robotic Arms Using Fuzzy NMPC / A. M. Jasour, M. Farrokhi, American Control Conference, Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA, 10–12 June, 2009. — P. 1353—1358
5. Meza, J. L. Fuzzy Self-Tuning PID Semiglobal Regulator for Robot Manipulators / J. L. Meza [et al.] // Industrial Electronics, IEEE Transactions. — 2012. — Vol. 59, № P. 2709—2717.
6. Salas, F. G. Variable Gains PD Tracking Control of Robot Manipulators: Stability Analysis and Simulations / F. G. Salas, V. Santibanez, M. A. Llama, World Automation Congress (WAC), Puerto Vallarta, Mexico, 24–28 June, 2012. P. 1—6
7. Ульянов, С. В. Интеллектуальное робастное управление: технологии мягких вычислений / С. В. Ульянов [и др.]. — М. : ВНИИгеосистем, 2011. — 408 с.
8. UPanda, R. C. Introduction to PID Controllers — Theory, Tuning and Application to Frontier Areas / R. C. Panda. — Rijeka, Croatia : InTech, 2012. — 258 p

9. Михайлов, В. С. Теория управления / В. С. Михайлов. — К : Выща школа, 1988. — 312 с.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011619257. Оптимизатор робастных баз знаний для проектирования интел-лектуальных систем управления на мягких вычислениях: заявка №2011617532 от 11.10.2011 РФ / С. В. Ульянов, Л. В. Литвинцева, А. А. Мишин, С. В. Сорокин (РФ) — Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 1.12.2011 г. (РФ).
11. Филлипс, Ч. Системы управления с обратной связью / Ч. Филлипс, Р. Харбор. — М. : Лаборатория базовых знаний, 2001. — 616 с.

References:

1. Khoogar, A. R. Obstacle Avoidance for Redundant Manipulators Using a Genetic Algorithm / A. R. Khoogar [et al.], Southeastcon '91 Conference, Williamsburg, VA, 7–10 Apr., 1991 — Vol. 1. — P. 317—320.
2. Secara, C. Iterative genetic algorithm based strategy for obstacles avoidance of a redundant manipulator / C. Secara, L. Vladareanu // Wseas Transaction on Mathematics. — 2010. — Vol. 9, № P. 211—221.
3. Yu, W. Neural PID Control of Robot Manipulators With Application to an Upper Limb Exoskeleton / W. Yu, J. Rosen // Cybernetics, IEEE Transactions. — 2013. — Vol. 43, № 2. P. 673—684
4. Jasour, A. M. Path Tracking and Obstacle Avoidance for Redundant Robotic Arms Using Fuzzy NMPC / A. M. Jasour, M. Farrokhi, American Control Conference, Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA, 10–12 June, 2009. — P. 1353—1358.
5. Meza, J. L. Fuzzy Self-Tuning PID Semiglobal Regulator for Robot Manipulators / J. L. Meza [et al.] // Industrial Electronics, IEEE Transactions. — 2012. — Vol. 59, № P. 2709—2717.
6. Salas, F. G. Variable Gains PD Tracking Control of Robot Manipulators: Stability Analysis and Simulations / F. G. Salas, V. Santibanez, M. A. Llama, World Automation Congress (WAC), Puerto Vallarta, Mexico, 24–28 June, 2012. P. 1—6
7. Ul'yanov, S. V. Intel'kual'noe robastnoe upravlenie: tekhnologii myagkikh vychislenii / S. V. Ul'yanov [i dr.]. — М. : VNIIGeosistem, 2011. — 408 с.
8. Panda, R. C. Introduction to PID Controllers – Theory, Tuning and Application to Frontier Areas / R. C. Panda. — Rijeka, Croatia : InTech, 2012. — 258 p.
9. Mikhailov, V. S. Teoriya upravleniya / V. S. Mikhailov. — К : Vyshcha shkola, 1988. — 312 с.
10. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM №2011619257. Optimizator robastnykh baz znaniy dlya proektirovaniya intel-lektual'nykh sistem upravleniya na myagkikh vychisleniyakh: zayavka №2011617532 ot 11.10.2011 RF / S. V. Ul'yanov, L. V. Litvintseva, A. A. Mishin, S. V. Sorokin (RF) — Zaregistrovano v Reestre programm dlya EVM 1.12.2011 g. (RF).
11. Fillips, Ch. Sistemy upravleniya s obratnoi svyaz'yu / Ch. Fillips, R. Kharbor. — М. : Laboratoriya bazovykh znaniy, 2001. — 616 с.