

# Исследование проблем копирующего управления антропоморфным манипулятором

В.И. Петренко  
Кафедра организации и технологии защиты информации  
Северо-Кавказский федеральный университет  
Ставрополь, Россия  
e-mail: vip.petrenko@gmail.com

М.М. Гурчинский  
Кафедра прикладной математики и компьютерной безопасности  
Северо-Кавказский федеральный университет  
Ставрополь, Россия  
e-mail: gurmikhail@yandex.ru

Ф.Б. Тебуева  
Кафедра прикладной математики и компьютерной безопасности  
Северо-Кавказский федеральный университет  
Ставрополь, Россия  
e-mail: fariza.teb@gmail.com

С.С. Рябцев  
Кафедра прикладной математики и компьютерной безопасности  
Северо-Кавказский федеральный университет  
Ставрополь, Россия  
e-mail: nalfartorn@yandex.ru

## Аннотация

В данной статье рассматриваются проблемы копирующего управления антропоморфными манипуляторами (АМ).

Целью работы является исследование проблем точности выполнения рабочих операций при копирующем управлении. В статье рассмотрена схема системы копирующего управления, выделены проблемы, наиболее характерные для данного способа управления.

Произведены дискретизация и восстановление примеров сигналов, описывающих зависимость угла поворота сочленения манипулятора от времени. К восстановленному сигналу применены способы сглаживания в реальном времени на основе вычисления скорости и ускорения изменения сигнала, а также сглаживание методом кусочно-линейной интерполяции с задержкой на один отсчёт дискретного времени. Для восстановленных сигналов со сглаживанием и без сглаживания произведена оценка среднего квадрата отклонения от исходного сигнала.

**Ключевые слова** – копирующее управление, антропоморфный манипулятор, экзоскелет, энкодер, дискретизация сигнала, интерполяция сигнала

---

Труды Седьмой всероссийской научной конференции "Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений", 28-30 мая, Уфа-Ставрополь, Ханты-Мансийск, Россия, 2019

## 1. Введение

В настоящее время актуальной является задача обеспечения точного воспроизведения действий оператора при дистанционном копирующем управлении робототехническими средствами, поскольку существует необходимость замены человека при выполнении работ в сложных условиях, представляющих опасность для жизни и здоровья. При этом большое внимание уделяется манипуляторам с антропоморфной кинематической структурой, поскольку они позволяют наиболее точно воспроизводить движения руки оператора.

Целью данной работы является исследование проблем точности выполнения технологических операций при копирующем управлении.

В данном исследовании рассматривается влияние дискретизации управляющего сигнала на точность выполнения операций антропоморфным манипулятором при копирующем управлении. Объектом исследования является система копирующего управления, в которой применяются:

- метод решения прямой задачи кинематики с помощью представления Денавита-Хартенберга [1] для регистрации положений сочленений антропоморфного манипулятора;
- метод решения задачи динамики путём прогнозирования движений руки оператора для формирования законов движения узлов антропоморфного манипулятора [2];

Согласно результатам исследования, опубликованным в работе [3], одной из проблем, характерных для систем дистанционного управления роботами, является наличие задержки, приводящей к повышению временных затрат на выполнение рабочих задач,

увеличению числа допускаемых ошибок, а также к снижению уровня доверия системе в целом.

Таким образом, одним из главных требований к системе копирующего управления является воспроизведение манипулятором углов поворота сочленений задающего устройства с достаточной точностью и минимальной временной задержкой.

Данное требование является наиболее критичным для медицинских приложений, таких как микрохирургия [4]. В работе [5] произведено исследование влияния параметров задающих устройств хирургических роботизированных систем на точность и эффективность выполнения целевых задач. Точность управления также имеет большое значение для космических роботов [6] и роботов-спасателей.

При использовании цифровых систем неизбежно возникают потери точности, обусловленные цифро-аналоговым преобразованием управляющих сигналов (дискретизация сигнала по времени и квантование по уровню).

Существующие в настоящее время датчики углов поворота копирующих устройств (энкодеры) имеют разрядность 12 и более бит. Применение энкодеров такой разрядности позволяет определять угол поворота с точностью не менее 0,05 градусов при допустимых значениях угла поворота в диапазоне от 0 до 180 градусов. Подобные показатели точности являются достаточными для решения задач копирующего управления антропоморфным манипулятором, поэтому погрешностью энкодеров в рамках данного исследования можно пренебречь.

Восстановление аналогового сигнала из последовательности дискретных отсчётов может быть с высокой точностью произведено с использованием теоремы Котельникова. Однако применение данной теоремы в области копирующего управления ограничено тем, что для восстановления значения уровня сигнала в текущий момент времени необходимо наличие сведений не только о предшествующих, но и о последующих отсчётах, что противоречит требованию обеспечения минимальной задержки и принципам функционирования систем реального времени в целом.

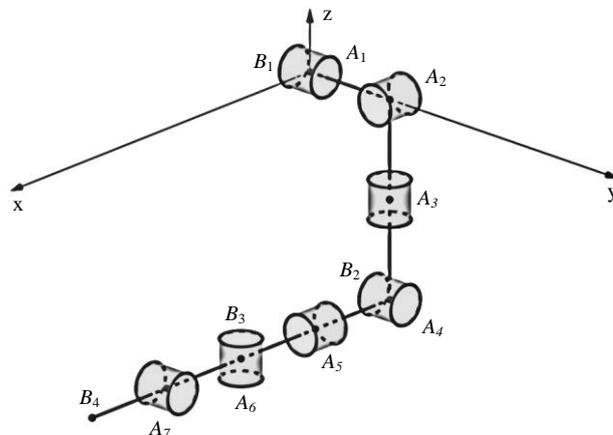
## 2. Методы

### 2.1. Постановка задачи

На рис. 1 представлена кинематическая схема рассматриваемого в рамках данной статьи антропоморфного манипулятора. Манипулятор имеет 7 вращательных степеней подвижности  $A_1 - A_7$ . Обозначения  $B_1, B_2, B_3$  соответствуют плечевому, локтевому и лучезапястному узлам,  $B_4$  – рабочее окончание. Подобная кинематическая схема используется в антропоморфных роботах серий AR-600 [7], SAR-400 [8], FEDOR. Существуют и другие модели манипуляторов, основанных на данной схеме [9], [10].

Задающее устройство, с помощью которого осуществляется копирующее управление антропоморфным манипулятором, представляет собой

экзоскелет верхних конечностей, имеющий кинематическую схему, аналогичную кинематической схеме манипулятора. Примером подобных устройств является задающее устройство копирующего манипулятора [11].



**Рисунок 1. Кинематическая схема манипулятора антропоморфного робота с 7 степенями подвижности**

Система копирующего управления антропоморфным манипулятором (рис. 2), кроме задающего устройства и манипулятора, содержит также ЭВМ, управляющий модуль антропоморфного манипулятора, устройство видеоконтроля (видеокамеру), устройство отображения видеоряда (монитор), а также канал связи, посредством которого осуществляется передача команд управляющему модулю и видеоряда, формируемого устройством видеоконтроля, на ЭВМ оператора.

ЭВМ выполняет следующие функции:

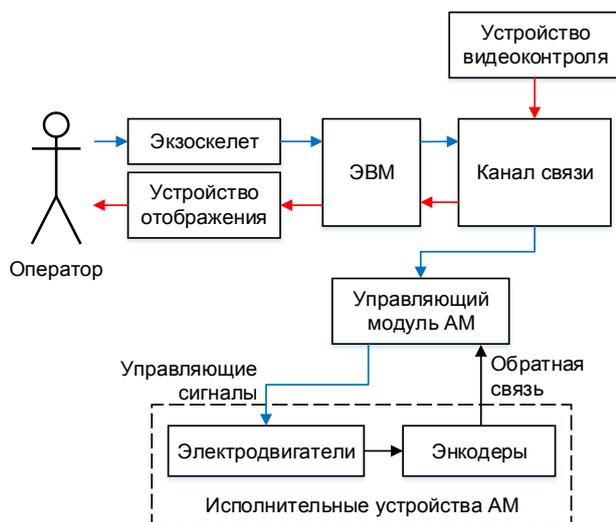
- получение и обработка данных об углах поворота сочленений задающего устройства;
- формирование и передача команд управляющему модулю манипулятора;
- приём и декодирование видеопотока, поступающего от устройства видеоконтроля.

Каждая команда для управляющего модуля антропоморфного манипулятора представляет собой вектор  $\theta$  углов поворота сочленений, соответствующих семи степеням подвижности манипулятора:

$$\theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7\}. \quad (1)$$

Если в задающем устройстве и манипуляторе используются одинаковые датчики углов поворота (энкодеры), углы  $\theta_i, i = 1..7$  могут быть представлены непосредственно в коде, используемом энкодерами, для снижения задержек и вычислительных затрат, обусловленных преобразованием данных в промежуточный формат.

На основе принимаемых команд управляющий модуль формирует сигналы для электродвигателей, отслеживая угол поворота каждого сочленения посредством энкодеров, сопряжённых с электродвигателями.



**Рисунок 2. Схема системы копирующего управления антропоморфным манипулятором**

Полная задержка в системе копирующего управления АМ образована задержками, возникающими на следующих этапах функционирования системы:

- получение и обработка данных о положении руки оператора;
- формирование команд для управляющего модуля АМ;
- формирование пакетов данных, соответствующих используемому протоколу информационного обмена;
- передача команд по каналу связи;
- приём и обработка команд управляющим модулем АМ, формирование управляющих сигналов для электродвигателей исполнительных устройств;
- изменение пространственного положения компонентов механической системы АМ согласно поступившим командам;
- захват изображения и кодирование видеопотока устройством видеоконтроля;
- передача видеопотока по каналу связи;
- приём и декодирование видеопотока;
- вывод изображения на устройство отображения (монитор).

Наиболее специфическими из перечисленных задержек для копирующего управления антропоморфным манипулятором являются:

- получение и обработка данных о положении руки оператора;
- формирование команд для управляющего модуля АМ.

Отсутствие в системе копирующего управления механизмов снижения уровня ошибки дискретизации может привести к появлению нежелательных вибраций,

связанных с резким переходом пространственной конфигурации манипулятора из состояния, соответствующего  $(k-1)$ -му отсчёту дискретного времени, в текущее состояние, соответствующее  $k$ -му отсчёту. Повышение частоты дискретизации позволяет минимизировать данный эффект, однако также повышает требования к пропускной способности канала связи. Таким образом, актуальной научной задачей является исследование способов снижения уровня ошибки дискретизации сигналов в системе копирующего управления. Для решения данной задачи следует:

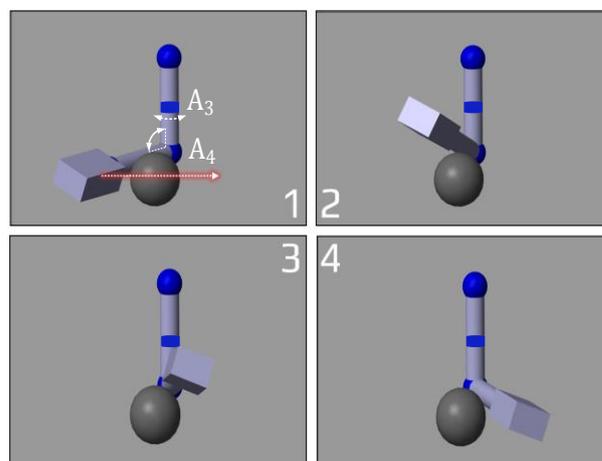
- произвести дискретизацию сигнала, описывающего зависимость угла поворота сочленения манипулятора от времени при выполнении рабочих задач;
- произвести восстановление сигнала несколькими возможными способами;
- оценить результирующую величину ошибки для различных способов восстановления.

## 2.2. Метод проведения исследования

В рамках исследования предполагается проведение оценки зависимости уровня ошибки дискретизации сигнала, описывающего значение угла поворота сочленения задающего устройства во времени, от частоты дискретизации для следующих случаев:

- восстановления сигнала без сглаживания;
- восстановление сигнала со сглаживанием, не требующим введения дополнительной задержки (т.е. в режиме, близком к реальному времени);
- восстановление сигнала со сглаживанием, основанным на задержанном исполнении поступающих команд.

Сигналы для исследования получены на основе имитации процесса перемещения манипулятора в пространстве при обходе препятствия в рабочей зоне (рис. 3). Время от начала до завершения процесса составило  $T = 1$  с.



**Рисунок 3. Перемещение манипулятора в пространстве при обходе препятствия**

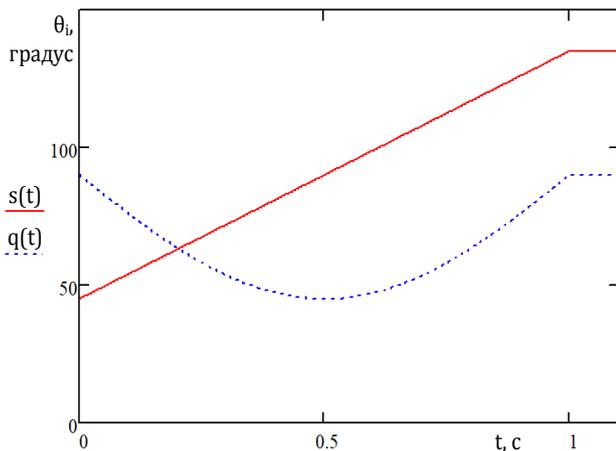
При перемещении манипулятора происходит изменение углов поворота сочленений А3 и А4. Зависимость угла поворота сочленения А3 от времени аппроксимирована функцией

$$s(t) = \begin{cases} 45, & t < 0, \\ 45 + 90t, & 0 \leq t < 1, \\ 135, & t \geq 1. \end{cases} \quad (2)$$

Зависимость угла поворота сочленения А4 от времени аппроксимирована функцией

$$q(t) = \begin{cases} 90, & t < 0, \\ 90 - 45\sin(\pi t), & 0 \leq t < 1, \\ 90, & t \geq 1. \end{cases} \quad (3)$$

Графики данных функций представлены на рис. 4.

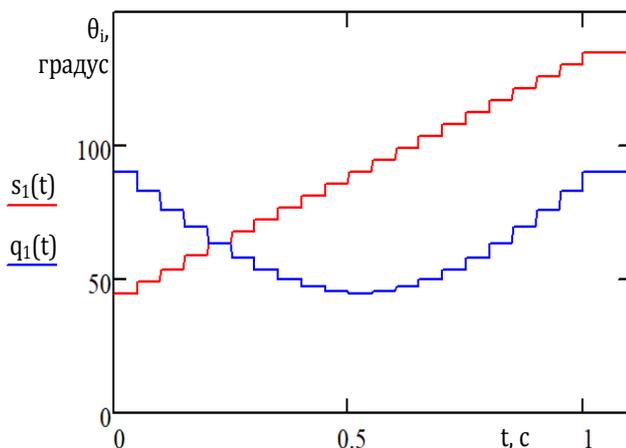


**Рисунок 4. Графики зависимостей углов поворота сочленений А3 и А4 от времени**

Для получения функции, соответствующей произвольному сигналу  $z(t)$ , восстановленному после дискретизации по времени с частотой  $f$  Гц, может быть использована формула:

$$z_1(t, f) = z\left(\frac{[tf]}{f}\right). \quad (4)$$

Графики восстановленных функций  $s(t)$  и  $q(t)$  при  $f = 20$  Гц представлены на рис. 5.



**Рисунок 5. Сигналы  $s_1(t)$  и  $q_1(t)$ , полученные после дискретизации и восстановления сигналов  $s(t)$  и  $q(t)$**

Критериями выбора способов сглаживания сигнала в целях устранения ступенчатости являются низкая

вычислительная сложность алгоритма и минимальное увеличение задержки отклика манипулятора. В качестве способов сглаживания выбраны:

–вычисление значения угла на следующем отсчёте на основе предположения о постоянном значении скорости изменения угла;

–вычисление значения угла на следующем отсчёте на основе предположения об изменении угла с постоянным ускорением;

–кусочно-линейная интерполяция зависимости угла поворота сочленения от времени.

Первый способ сглаживания основан на вычислении средней скорости  $v(t)$  изменения угла поворота сочленения  $\theta_i$  между предыдущим отсчётом  $(t - \frac{1}{f})$  и текущим отсчётом  $t$ :

$$v(t) = (\theta_i(t) - \theta_i(t - \frac{1}{f}))f. \quad (5)$$

Угол продолжает изменяться со скоростью  $v$  до поступления нового значения  $\theta_i$  в момент времени  $(t + \frac{1}{f})$ , после чего процесс повторяется.

Пример сглаживания сигналов  $s_1(t)$  и  $q_1(t)$  данным способом представлен на рис. 6.

Второй способ сглаживания основан на вычислении в соответствии с (5) средних скоростей изменения угла между двумя предшествующими отсчётами ( $v_2$ ), а также между предыдущим и текущим отсчётами ( $v_2$ ):

$$v_1 = v(t - \frac{1}{f}), \quad (6)$$

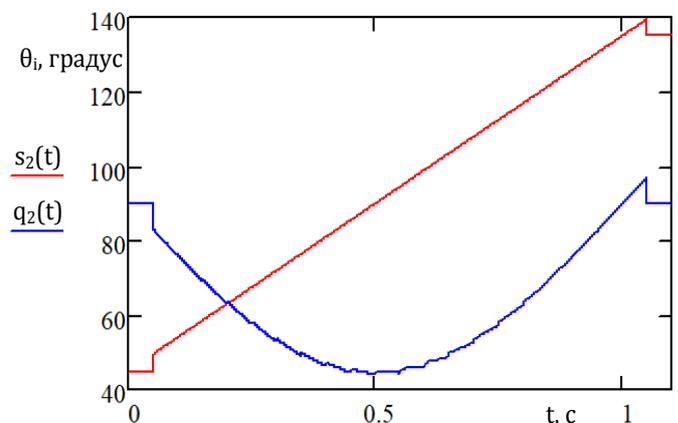
$$v_2 = v(t). \quad (7)$$

Значения  $v_1$  и  $v_2$  используются для вычисления предполагаемой средней скорости  $v_3$  изменения угла поворота сочленения  $\theta_i$  между текущим и следующим отсчётами с учётом среднего ускорения  $a$ :

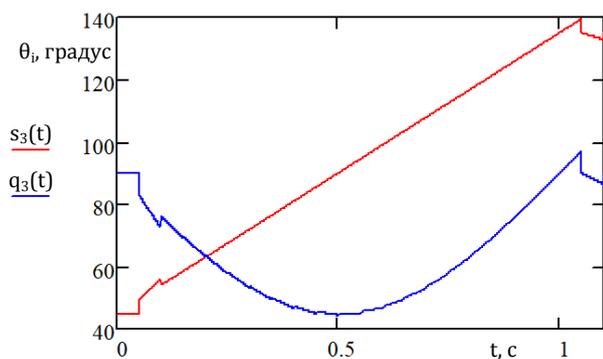
$$a = (v_2 - v_1)f \quad (8)$$

$$v_3 = v_2 + \frac{a}{2f} = v_2 + \frac{v_2 - v_1}{2}. \quad (9)$$

Пример сглаживания сигналов  $s_1(t)$  и  $q_1(t)$  данным способом представлен на рис. 7.

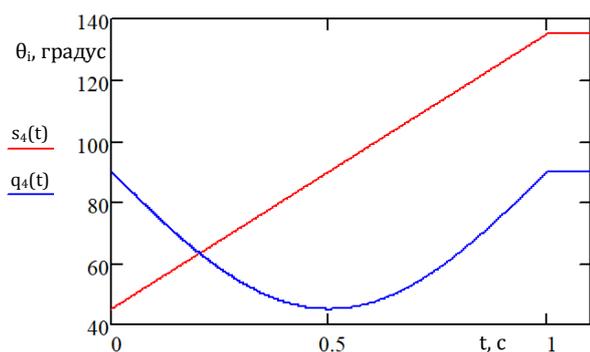


**Рисунок 6. Сигналы  $s_2(t)$  и  $q_2(t)$ , полученные из сигналов  $s_1(t)$  и  $q_1(t)$  в результате сглаживания на основе вычисления средней скорости**



**Рисунок 7.** Сигналы  $s_3(t)$  и  $q_3(t)$ , полученные из сигналов  $s_1(t)$  и  $q_1(t)$  в результате сглаживания на основе вычисления ускорения

В отличие от рассмотренных способов, сглаживание сигналов методом кусочно-линейной интерполяции вносит дополнительную временную задержку, величина которой составляет  $\frac{1}{f}$ . Выполнение команды перевода угла  $\theta_i$  в состоянии  $\theta_i(t)$  осуществляется после прихода следующей команды в момент времени  $(t + \frac{1}{f})$ . При этом изменение угла поворота происходит со скоростью  $v(t + \frac{1}{f})$ , вычисляемой в соответствии с (5). Пример сглаживания сигналов  $s_1(t)$  и  $q_1(t)$  методом кусочно-линейной интерполяции представлен на рис. 8.



**Рисунок 8.** Сигналы  $s_4(t)$  и  $q_4(t)$ , полученные из сигналов  $s_1(t)$  и  $q_1(t)$  в результате сглаживания методом кусочно-линейной интерполяции

Оценка ошибки, возникающей в результате дискретизации и восстановления сигнала, производится путём нахождения среднеквадратического отклонения  $\sigma_z$  результирующего сигнала  $z_1(t)$  от исходного сигнала  $z(t)$ :

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (z(t) - z_1(t))^2 dt}. \quad (10)$$

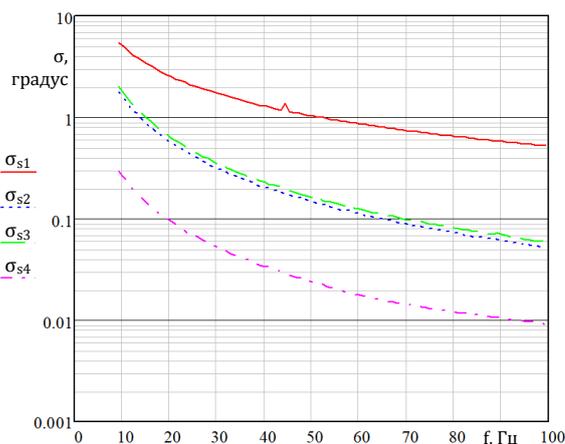
### 3. Результаты

На рис. 9, 10 приведены графики зависимости среднеквадратической величины ошибки от частоты дискретизации для рассматриваемых во 2 секции сигналов.

Наилучшими показателями (минимальным среднеквадратическим отклонением от исходного сигнала) обладает способ сглаживания

восстановленного сигнала методом кусочно-линейной интерполяции на основе средней скорости изменения сигнала между текущим и следующим отсчётом. Однако недостатком данного подхода является увеличение задержки управления антропоморфным манипулятором на время, равное одному шагу дискретизации.

Способы сглаживания сигнала, основанные на использовании средних значений скорости и ускорения между предшествующими отсчётами, позволяют избежать внесения дополнительной задержки, однако значительно искажают траекторию движения манипулятора при низкой частоте дискретизации. С повышением частоты дискретизации эффективность данных способов значительно возрастает.

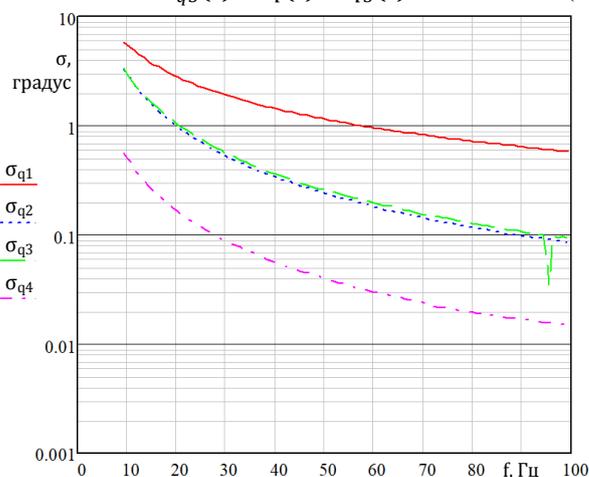


**Рисунок 9.** Зависимость среднеквадратической величины ошибки от частоты дискретизации для рассмотренных способов восстановления сигнала  $s(t)$

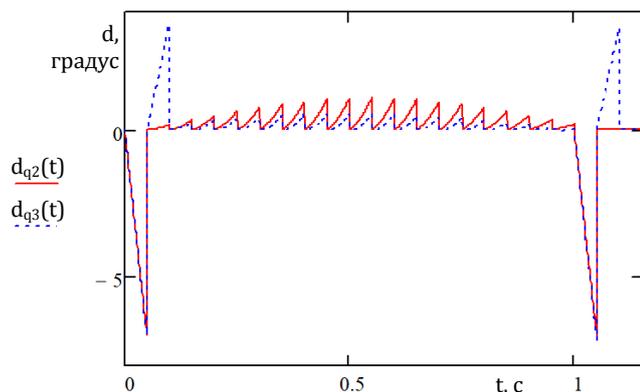
При использовании способа сглаживания сигнала на основе скорости среднеквадратическая величина ошибки оказывается несколько ниже, чем для способа сглаживания на основе ускорения. На рис. 11 представлены графики отклонения восстановленного сглаженного сигнала от исходного при  $f = 20$  Гц:

$$d_{q2}(t) = q(t) - q_2(t), \quad (11)$$

$$d_{q3}(t) = q(t) - q_3(t). \quad (12)$$

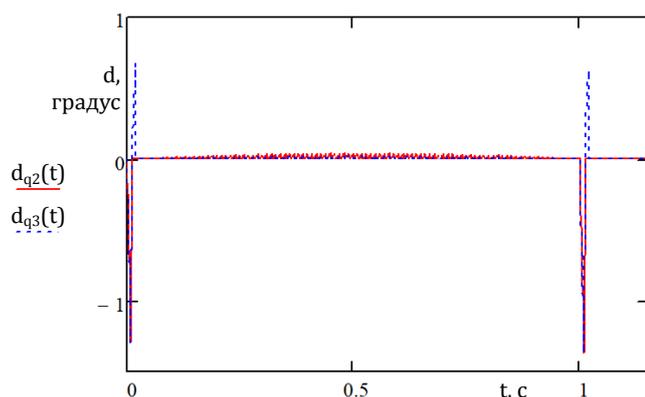


**Рисунок 10. Зависимость среднеквадратической величины ошибки от частоты дискретизации для рассмотренных способов восстановления сигнала  $q(t)$**



**Рисунок 11. Отклонения, возникающие при сглаживании сигнала  $q_1(t)$  способами на основе вычисления скорости и ускорения при  $f = 20$  Гц**

В начале и конце процесса перемещения манипулятора на графиках присутствуют выбросы, обусловленные быстрым изменением значений скорости и ускорения в точках излома  $t = 0$  и  $t = 1$  аппроксимирующей функции (3). При этом сигнал  $q_2(t)$ , полученный в результате сглаживания сигнала  $q_1(t)$  на основе ускорения, имеет более длительные выбросы, чем обуславливается большее значение среднеквадратической величины ошибки. Однако при относительно небольших изменениях скорости и ускорения между соседними отсчётами способ сглаживания сигнала на основе ускорения более эффективен, чем способ, основанный на скорости. Кроме того, амплитуда и абсолютная длительность выбросов снижаются при увеличении частоты дискретизации (рис. 12).



**Рисунок 12. Отклонения, возникающие при сглаживании сигнала  $q_1(t)$  способами на основе скорости и ускорения при  $f = 100$  Гц**

Короткие выбросы могут быть подавлены программными или аппаратными фильтрами, либо сглажены инерцией механической системы манипулятора.

## 4. Обсуждения

В данной работе рассмотрены проблемы влияния дискретизации сигнала, описывающего процесс изменения во времени углов поворота сочленений задающего устройства, на точность выполнения операций антропоморфным манипулятором при копирующем управлении.

Сигнал, восстанавливаемый управляющим модулем антропоморфного манипулятора из дискретной последовательности значений углов, носит ступенчатый характер, что может привести к появлению паразитных вибраций манипулятора при подаче сигнала такого вида на электроприводы в необработанном виде.

Основное внимание в рамках данной работы уделено способам сглаживания сигнала, основанным на экстраполяции значений сигнала на временном интервале между текущим и следующим отсчётом дискретного времени с учётом известной скорости и ускорения изменения сигнала между предыдущими и текущим отсчётами. Несмотря на то, что способ сглаживания сигнала методом кусочно-линейной интерполяции позволяет достичь меньшего рассогласования между сигналом до дискретизации и результирующим сигналом, его применение приводит к увеличению задержки при управлении манипулятором.

Перспективным направлением исследований в рассматриваемой области является разработка методов прогнозирования значения сигнала на следующем отсчёте дискретного времени с использованием нейронных сетей, предварительно обученных на реальных образцах сигналов, возникающих в системе копирующего управления в процессе выполнения целевых задач с помощью антропоморфного манипулятора. Достижимая точность прогнозирования тем выше, чем больший объём данных будет использован при обучении нейронной сети. Поскольку прогнозирование должно производиться в режиме реального времени, дополнительного изучения требует вопрос производительности подобных решений, а также требований к вычислительным ресурсам системы.

В дальнейшем планируется проведение исследований, связанных с тематикой данной работы, на реальных роботах и манипуляторах.

## 5. Заключение

В данной работе рассмотрены проблемы копирующего управления антропоморфными манипуляторами, вызванные дискретизацией сигнала, описывающего процесс изменения во времени углов поворота сочленений задающего устройства. Рассмотрена схема системы копирующего управления, выделены проблемы, наиболее характерные для данного типа управления. Произведены дискретизация и восстановление примеров сигналов, возникающих при выполнении рабочих задач. К восстановленному сигналу применены способы сглаживания в реальном времени на основе скорости и ускорения изменения сигнала, а также сглаживание методом кусочно-линейной интерполяции с задержкой на один отсчёт

дискретного времени. Для восстановленных сигналов со сглаживанием и без сглаживания произведена оценка среднеквадратического отклонения от исходного сигнала. В результате проведённого исследования можно сделать вывод о том, что наилучшими показателями (минимальным значением отклонения) обладает способ сглаживания сигнала методом кусочно-линейной интерполяции. При необходимости обеспечения минимальной задержки управления целесообразно использовать способы сглаживания на основе предположения об изменении угла с постоянной скоростью или постоянным ускорением. При этом способ сглаживания на основе вычисления средней скорости обеспечивает несколько меньшие выбросы уровня ошибки при резком изменении скорости, а способ, основанный на ускорении, позволяет обеспечить меньший средний уровень ошибки при плавном изменении скорости.

### Acknowledgments (благодарности)

Исследование проводилось в рамках реализации научно-исследовательского проекта по разработке программно - аппаратной системы управления на основе решения обратной задачи динамики и кинематики в рамках FCNIR 2014-2020 (уникальный идентификатор RFMEFI57517X0166) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Авторы выражают благодарность И. М. Кутлубаеву, оказавшему содействие в проведении экспериментов.

### Список используемых источников

- 1 F. V. Tebueva, V. I. Petrenko, V. O. Antonov, and M. M. Gurchinsky, "The Method for Determining the Relative Positions of the Operator's Arm for Master-Slave Teleoperation of Anthropomorphic Manipulator," *Int. Rev. Mech. Eng.*, vol. 12, no. 8, p. 694, Aug. 2018.
- 2 V. I. Petrenko, F. V. Tebueva, M. M. Gurchinsky, V. O. Antonov, and J. A. Shutova, "Solution of the dynamics inverse problem with the copying control of an anthropomorphic manipulator based on the predictive estimate of the operator's hand movement using the updated Brown method," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 450, p. 042013, Nov. 2018.
- 3 A. Khasawneh, H. Rogers, J. Bertrand, K. C. Madathil, and A. Gramopadhye, "Human adaptation to latency in teleoperated multi-robot human-agent search and rescue teams," *Autom. Constr.*, vol. 99, pp. 265–277, Mar. 2019.
- 4 Y. M. Baek et al., "Highly precise master-slave robot system for super micro surgery," in *2010 3rd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, 2010, pp. 740–745.
- 5 Y. Kamei et al., "Study on master manipulator design parameters for robotic microsurgery," in *2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, 2012, pp. 847–852.
- 6 I. M. Kutlubayev, A. A. Bogdanov, N. V. Novoseltsev, M. V. Krasnobaev, and O. A. Saprykin, "Control system of the anthropomorphous robot for work on the low-altitude earth orbit," *Int. J. Pharm. Technol.*, vol. 8, no. 3, pp. 18193–18199, 2016.
- 7 "НПО Андроидная Техника | AR — Серия 600." [Online]. Available: <http://v2.npo-at.com/2018/05/ar-seria-600/>. [Accessed: 06-Mar-2019].
- 8 "НПО Андроидная Техника | SAR — 401." [Online]. Available: <http://v2.npo-at.com/2018/05/sar-401/>. [Accessed: 06-Mar-2019].
- 9 А. А. Богданов, Кутлубаев, И. Мухаметович, А. Ф. Пермяков, and В. Б. Сычков, "Антропоморфный манипулятор," RU 146 552 U1.
- 10 А. А. Богданов, И. Г. Жиденко, Д. В. Кияткин, Кутлубаев, И. Мухаметович, and А. Ф. Пермяков, "Копирующий манипулятор," RU 135 956 U1.
- 11 А. П. Батрашкин, А. А. Богданов, М. Р. Иксанов, Кутлубаев, И. Мухаметович, and А. Ф. Пермяков, "Задающее устройство копирующего манипулятора," RU 169 864 U1.