

Анализ и оценка временных задержек при управлении робототехническими средствами

Ф.Б. Тебуева

Институт информационных технологий и телекоммуникаций
Северо-Кавказский федеральный университет
Ставрополь, Россия
e-mail: fariza.teb@gmail.com

М.Ю. Кабиняков

Институт информационных технологий и телекоммуникаций
Северо-Кавказский федеральный университет
Ставрополь, Россия
e-mail: micssys@gmail.com

Н.Ю. Свистунов

Институт информационных технологий и телекоммуникаций
Северо-Кавказский федеральный университет
Ставрополь, Россия
e-mail: svistunov4@gmail.com

Н.Ю. Унтевский

Институт информационных технологий и телекоммуникаций
Северо-Кавказский федеральный университет
Ставрополь, Россия
e-mail: untewsky@yandex.ru

Аннотация¹

Данная работа посвящена проблеме задержек, возникающих в контуре «человек-робототехническое средство (РТС)». В рамках статьи рассмотрены основные классы робототехнических систем с точки зрения влияния временных задержек на процесс управления, определено ограничение полной задержки в системе копирующего управления, позволяющее обеспечить возможность работы неподготовленного оператора. Проведена оценка задержек, возникающих в контурах прямой и обратной связи. Получены аналитические выражения, связывающие частоты сбора, а также задержки передачи данных. Результаты работы могут быть использованы при проектировании систем управления РТС, не требующих длительного обучения операторов.

Ключевые слова: робототехническое средство; система управления; копирующее управление; прямая связь; обратная связь; задержки; передача данных.

1. Введение

Одной из проблем управления робототехническими средствами являются задержки, возникающие в контуре «человек-робототехническое средство».

Существующие основные типы РТС приведены в табл. 1 [1]. Поскольку роль человека в управлении автоматическими РТС минимальна, проблема задержек управления для данного типа РТС не является актуальной.

Интерактивные РТС предполагают принятие человеком стратегических решений. При этом выполнение поставленных задач происходит в автоматическом режиме. Влияние задержек управления для систем данного типа в большинстве случаев не является критичным (кроме автоматизированных систем, где часть работы выполняется в режиме ручного управления).

Несмотря на перспективность применения автоматических и интерактивных РТС, при работе в сложных динамически изменяющихся условиях средства искусственного интеллекта пока не способны заменить человека. Поэтому в подобных случаях целесообразно применять биотехнические РТС, в которых человек (оператор) управляет РТС и включен в контур обратной связи [2]. Однако РТС данного вида в наибольшей степени подвержены влиянию задержек.

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

Табл. 1. Роль человека и влияние задержек при управлении РТС различного типа.

Тип РТС	Разновидности	Роль человека	Влияние задержек
Биотехнические	Командные	Управляет робототехнической системой, включен в контур обратной связи	Наиболее критичны к задержкам
	Копирующие		
	Полуавтоматические		
Автоматические	Программные	Вмешательство человека минимально	Практически отсутствует
	Адаптивные		
	Интеллектуальные		
Интерактивные	Автоматизированные	Частичное ручное управление	Может быть негативное влияние
	Супервизорные	Целеуказание	Слабое
	Диалоговые	Выбор стратегии поведения	

2. Задержки при управлении РТС

Наиболее перспективной разновидностью РТС являются системы, основанные на копирующем управлении (рис. 1). В подобных системах управление осуществляется путём захвата движений оператора с помощью таких задающих устройств (ЗУ), как тактильные перчатки [3, 4] и экзоскелеты [5-7], после чего на основе собранных данных формируются команды для исполнительных устройств. Поскольку в системах копирующего управления человек не только определяет, но и корректирует движения РТС, полное время задержки $T_{\text{полн}}$ определяется как сумма задержек:

- прямой связи $T_{\text{пс}}$ (выполнение основного движения);
- обратной связи (ОС) $T_{\text{ос}}$ (получение ответа);
- прямой связи $T_{\text{пс}}$ (выполнение корректирующего движения).

Для эффективного и безопасного использования систем копирующего управления без необходимости

долгого предварительного обучения оператора требуется соблюдение условия

$$T_{\text{полн}} = 2T_{\text{пс}} + T_{\text{ос}} < 100 \text{ мс.} \quad (1)$$

Значение верхней границы времени полной задержки обусловлено физиологией человека (в частности, α -ритм человеческого мозга имеет частоту около 10 Гц [8]). Рассмотрим подробнее задержки, возникающие при реализации прямой и обратной связи.

2.1. Задержки прямой связи

Задержка прямой связи формируется из временных интервалов, затрачиваемых на выполнение следующих операций (рис. 2):

- получение данных о состоянии задающего устройства;
- обработка данных;
- передача данных по каналу связи;
- движение механических систем АМ (задержки обусловлены инертностью механических систем и ограниченной максимальной скоростью вращения роторов электродвигателей).

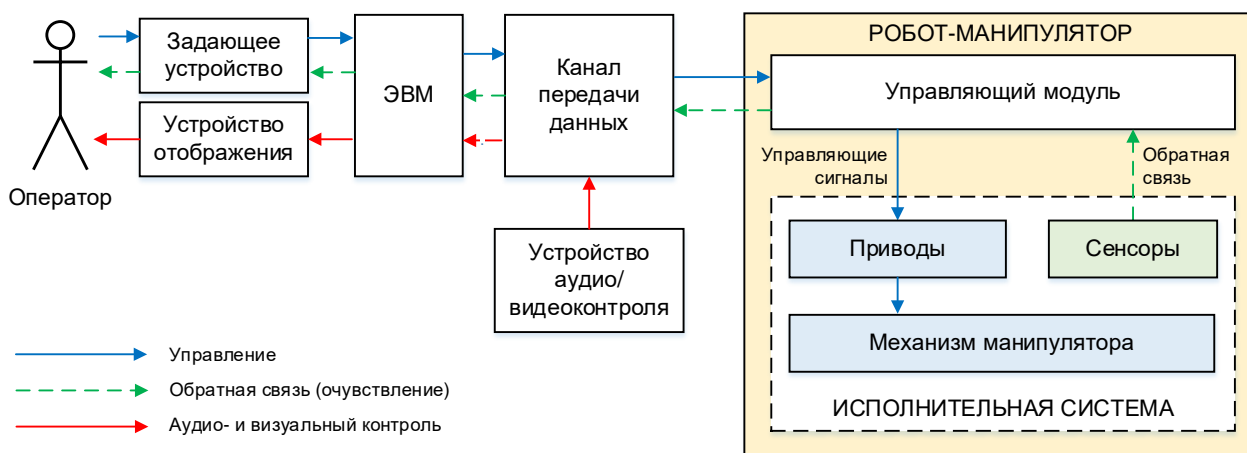


Рис. 1. Схема системы копирующего управления роботом-манипулятором

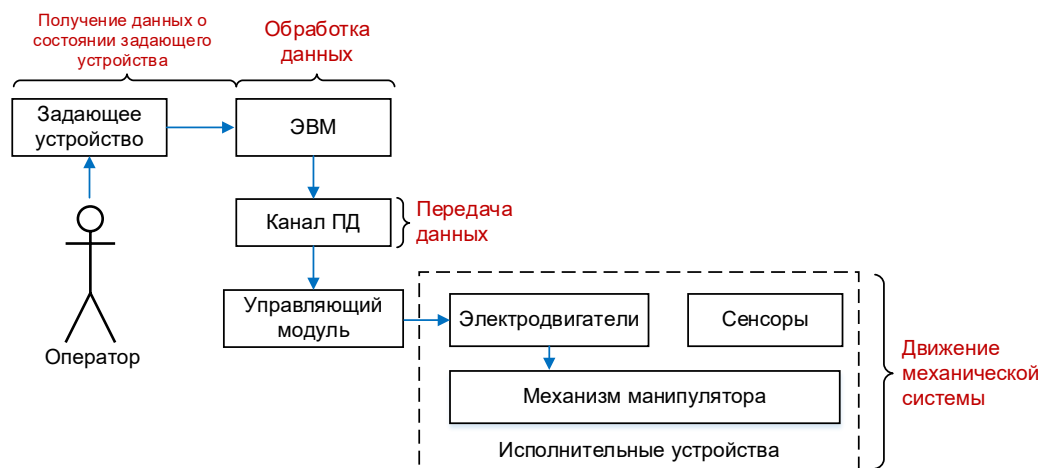


Рис. 2. Задержки прямой связи, возникающие при копирующем управлении

Оценка задержек прямой связи представлена в табл. 2. Получение и обработка данных о состоянии ЗУ осуществляется с помощью ЭВМ оператора. Получение данных производится путём периодического опроса задающего устройства с частотой $f_{3у}$. Задержка, возникающая на данном этапе, является случайной величиной, равномерно распределённой на числовом отрезке $[0; \frac{1}{f_{3у}}]$, верхняя граница которого может быть использована для оценки худшего случая.

Обработка данных заключается в исполнении алгоритма, преобразующего информацию о состоянии датчиков ЗУ в команды для исполнительного механизма. В частности, при

использовании ЗУ копирующего типа, выполненного в виде экзоскелета, необходимо преобразовывать изменение углов поворота сочленений ЗУ в соответствующие изменения углов поворота сочленений манипулятора. Причиной необходимости дополнительных вычислений является вариативность антропометрических параметров руки оператора, а также наличие гибкой сцепки между рукой и ЗУ. Поэтому при получении очередного набора данных об углах поворота сочленений задающего устройства производится расчёт положения руки оператора (углов поворота суставов) посредством решения обратной задачи кинематики. На основе рассчитанных значений вырабатываются команды для управляющего модуля манипулятора.

Табл. 2. Оценка задержек прямой связи

Операция	Оценка времени	Обозначения и комментарии
Получение данных о состоянии задающего устройства	$t_{3у} \in [0; \frac{1}{f_{3у}}]$	$f_{3у}$ – частота опроса задающего устройства, Гц
Обработка данных	Как правило, не превышает единиц миллисекунд	Определяется сложностью алгоритма, производительностью ЦП, типом ОС, приоритетом процесса, загруженностью системы побочными задачами
Передача данных	$t_{пд} = \frac{V}{q} + \frac{l}{c_{ср}}$ $T_{пд} = \sum_{i=1}^m t_{пу_i} + \sum_{j=1}^{m+1} t_{пд_j}$	V – объём информации, бит q – пропускная способность канала передачи данных, бит/с l – длина пути, проходимого сигналом, м $c_{ср}$ – скорость распространения сигнала в среде, м/с $t_{пу_i}$ – задержка, вносимая i -м промежуточным устройством, с $t_{пд_j}$ – время передачи по j -й промежуточной линии связи, с
Движение механической системы	Существуют решения, обеспечивающие задержку порядка 20 мс	Определяется конструкцией исполнительных устройств

Время выполнения данных операций, как правило, составляет не более единиц миллисекунд. Для снижения задержек, связанных с вычислениями, а также уменьшения дисперсии величины задержки, могут быть такие меры, как:

- оптимизация алгоритма (задействование многопоточной обработки [9], применение SIMD-инструкций [10, 11]);
- повышение приоритета процесса, ответственного за обработку данных;
- завершение процессов, не требуемых для работы системы управления РТС;
- использование операционных систем реального времени (RTOS) [12].

Задержка передачи данных зависит от множества факторов. В простейшем случае, когда между отправителем и получателем присутствует непосредственная связь, задержка определяется длиной пути, проходимого сигналом (ввиду ограниченной скорости распространения сигнала в среде), а также отношением объёма передаваемых данных к пропускной способности канала.

Если передача данных осуществляется посредством промежуточных устройств (ретрансляторов, коммутаторов, маршрутизаторов, сетевых шлюзов и т.п.), время передачи также зависит от задержки, вносимой каждым из них. В сетях общего назначения, таких как Ethernet [13], по физической линии связи могут передаваться данные множества абонентов, а также служебные данные. Использование механизмов мультиплексирования с разделением по времени (например, коммутации пакетов) вносит задержку, зависящую от текущей нагрузки на сеть. Рассмотрим данный случай в обобщённом виде.

Канал связи между устройством-отправителем (сетевым адаптером ЭВМ оператора) и устройством-получателем (сетевым адаптером управляющего модуля АМ) в конкретный момент времени образован последовательностью промежуточных сетевых устройств (коммутаторов, маршрутизаторов, брандмауэров и т.п.), соединённых между собой линиями связи (ЛС) (рис. 3). При этом количество линий связи на единицу превышает количество промежуточных устройств. Таким образом, задержка передачи данных определяется суммой задержек, вносимых промежуточными устройствами, и задержек в линиях связи:

$$T_{\text{ПД}} = \sum_{i=1}^m t_{\text{Пу}i} + \sum_{j=1}^{m+1} t_{\text{ПД}j}, \quad (2)$$

где $t_{\text{Пу}i}$ – задержка, вносимая i -м промежуточным устройством, с;

$t_{\text{ПД}j}$ – время передачи данных по j -й промежуточной линии связи, с.

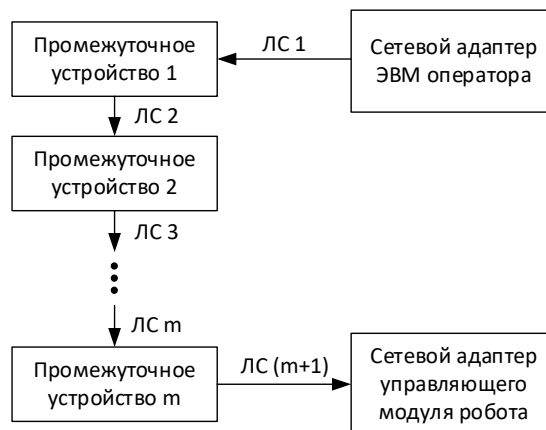


Рис. 3. Обобщённая схема канала передачи данных

Пути следования пакетов, отправляемых в различные моменты времени, могут отличаться, что обусловлено работой алгоритмов маршрутизации. Поэтому задержки, возникающие в таких сетях, являются труднопредсказуемыми. Перед началом работы с системой управления РТС, использующей для передачи данных сети общего назначения, следует производить тестирование качества соединения (скорости передачи данных, времени задержки, стабильности связи).

Время, затрачиваемое на движение механической системы РТС, определяется параметрами конкретных моделей (массогабаритными характеристиками, типом и мощностью двигателей и т.д.). Один из способов компенсации задержек такого рода состоит в исключении влияния времени разгона и остановки двигателей на процесс управления. В частности, в роботах Honda Asimo [14, 15] маховик (ротор электромотора) вращается на постоянных максимальных оборотах, а передача вращающего момента осуществляется посредством магнитореологической муфты сцепления и редуктора. При этом время соединения маховика с редуктором составляет порядка 0,02 с.

2.2. Задержки обратной связи

В системе управления РТС может присутствовать несколько контуров обратной связи, например, аудиовизуальная ОС, тактильная ОС, силомоментное оучувствление (рис. 4). Значения задержек, возникающих в различных контурах ОС, в общем случае не совпадают. Тогда задержка обратной связи может быть определена как наибольшая из задержек во всех контурах ОС (исходя из оценки худшего случая).

Оценка задержек обратной связи представлена в табл. 3. Задержка аудиовизуальной ОС определяется временем, затрачиваемым на выполнение следующих операций:

- захват и кодирование видеопотока;

- передача данных;
- декодирование видеопотока на стороне оператора;
- вывод аудиовизуального ряда устройствами отображения.

В случае реализации силомоментной и/или тактильной ОС выполняются следующие основные операции:

- получение данных от сенсоров;
- передача данных;
- обработка сигналов очувствления;
- реализация очувствления.

Задержка, обусловленная захватом видеопотока, равномерно распределена на числовом отрезке $[0; \frac{1}{f_{\text{кадр}}}]$, где $f_{\text{кадр}}$ – частота кадров. Кодирование и декодирование видеопотока осуществляется, как правило, с помощью специализированных аппаратных блоков за время, не превышающее единиц миллисекунд.

Оценка времени передачи данных ОС может быть произведена аналогично оценке времени передачи

данных при прямой связи, если информационный обмен производится в режиме полного дуплекса (что характерно для большинства современных сетей).

Задержка получения данных от сенсоров определяется аналогично задержке получения данных о состоянии задающего устройства. Оценка худшего случая составляет $\frac{1}{f_c}$, где f_c – частота опроса сенсоров.

Задержка отображения аудиовизуального ряда определяется преимущественно задержкой вывода изображения, характерной для применяемого устройства отображения (монитора, шлема виртуальной реальности и т.п.). В частности, шлем Oculus Dev kit 2 позволяет достичь задержки порядка 5 мс [16].

Задержка очувствления зависит от типа очувствления и конструкции устройства, с помощью которого оно реализовано. Например, гаптическая перчатка [17], производит виброотклик с задержкой не более 10 мс. Данное значение может быть использовано для приблизительной оценки задержки очувствления.

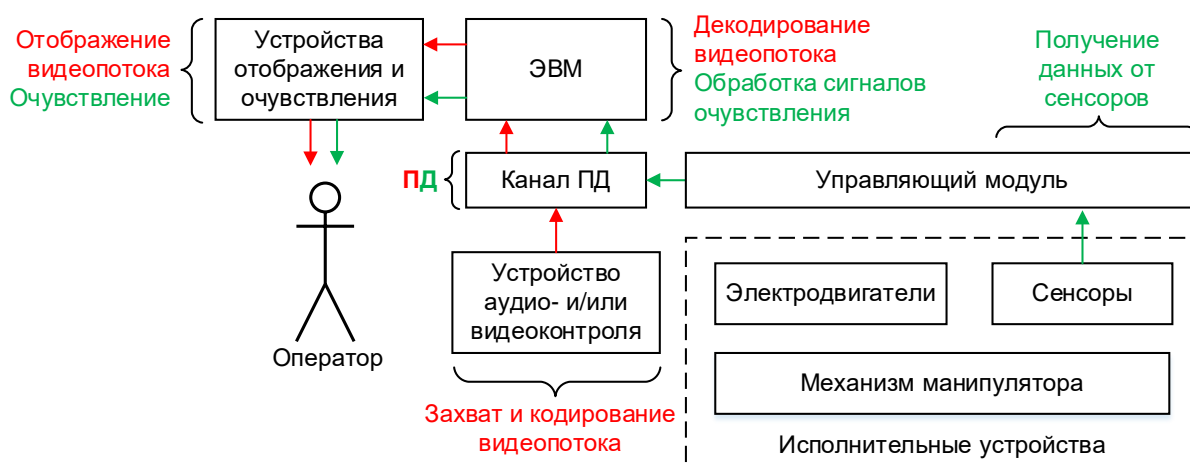


Рис. 4. Задержки обратной связи, возникающие при копирующем управлении

Табл. 3. Оценка задержек обратной связи

Операция	Оценка времени	Обозначения и комментарии
Получение данных от сенсоров Захват видеопотока	$t_c \in [0; \frac{1}{f_c}]$ $t_{\text{вид}} \in [0; \frac{1}{f_{\text{кадр}}}]$	f_c – частота опроса сенсоров, Гц $f_{\text{кадр}}$ – кадровая частота, Гц
Обработка сигналов ОС Декодирование видеопотока	Как правило, не превышает единиц миллисекунд	Определяется сложностью алгоритма, производительностью ЦП, типом ОС, приоритетом процесса, загруженностью системы побочными задачами.

Табл. 3 (продолжение)

Операция	Оценка времени	Обозначения и комментарии
Передача данных	$t_{\text{ПД}} = \frac{V}{q} + \frac{l}{c_{\text{ср}}}$ $T_{\text{ПД}} = \sum_{i=1}^m t_{\text{ПД}i} + \sum_{j=1}^{m+1} t_{\text{ПД}j}$	V – объём информации, бит q – пропускная способность канала передачи данных, бит/с l – длина пути, проходимого сигналом, м $c_{\text{ср}}$ – скорость распространения сигнала в среде, м/с $t_{\text{ПД}i}$ – задержка, вносимая i -м промежуточным устройством, с $t_{\text{ПД}j}$ – время передачи по j -й промежуточной линии связи, с
Отображение аудиовизуального ряда	Около 5 мс	Определяется характеристиками устройства отображения
Силовой моментное и/или тактильное ощущение	Около 10 мс	Определяется характеристиками устройства, реализующего ощущение

3. Результаты

На основе проведённой оценки задержек прямой и обратной связи в системе управления РТС условие (1) может быть записано в развёрнутом виде:

$$2 \left(\frac{1}{f_{\text{ЗУ}}} + T_{\text{обр}} + T_{\text{ПД}} + T_{\text{движ}} \right) + \max \left(\frac{1}{f_c} + T_{\text{ПДС}} + T_{\text{обрС}} + T_{\text{оч}}; \frac{1}{f_{\text{кадр}}} + T_{\text{ПДВ}} + T_{\text{обрВ}} + T_{\text{отобр}} \right) < 0,1 \text{ с}, \quad (3)$$

где $T_{\text{обр}}$ – время обработки данных о состоянии задающего устройства, с;

$T_{\text{движ}}$ – время движения механической системы РТС, с;

$T_{\text{ПДС}}$ – время передачи данных от сенсоров, с;

$T_{\text{обрС}}$ – время обработки данных от сенсоров и формирования сигналов для устройства ощущения, с;

$T_{\text{оч}}$ – время реализации ощущения, с;

$T_{\text{ПДВ}}$ – время передачи одного кадра видеоряда, с;

$T_{\text{обрВ}}$ – время обработки (декодирования) одного кадра видеоряда, с;

$T_{\text{отобр}}$ – задержка, вносимая устройством отображения, с.

Подставив оценочные величины задержек, рассмотренные ранее, в выражение (3), а также приняв задержки обработки данных равными 5 мс, получим систему неравенств, описывающих ограничения задержек сбора и передачи данных:

$$\begin{cases} \frac{2}{f_{\text{ЗУ}}} + 2T_{\text{ПД}} + \frac{1}{f_c} + T_{\text{ПДС}} < 0,035 \text{ с}; \\ \frac{2}{f_{\text{ЗУ}}} + 2T_{\text{ПД}} + \frac{1}{f_{\text{кадр}}} + T_{\text{ПДВ}} < 0,04 \text{ с}. \end{cases} \quad (4)$$

Поскольку объём данных, собираемых за одну итерацию (сведений о состоянии задающего устройства, данных от сенсоров, кадра видеоряда), не зависит от частоты сбора данных, время передачи данных можно принять постоянной величиной. Однако, следует учитывать, что при этом не должно

происходить превышение пропускной способности канала:

$$Vf \leq q, \quad (5)$$

где V – информационный объём данных, собираемых за одну итерацию, бит;

f – частота сбора данных, Гц;

q – пропускная способность канала передачи данных, бит/с.

Таким образом, если для уравнений системы (4) принять $2T_{\text{ПД}} + T_{\text{ПДС}} = T_1$ и $2T_{\text{ПД}} + T_{\text{ПДС}} = T_2$, можно определить взаимосвязь значений $f_{\text{ЗУ}}$, f_c и $f_{\text{кадр}}$ (рис. 5, 6). Кривые на графиках соответствуют нижним границам областей допустимых значений частот сбора данных при заданном времени передачи T_1 и T_2 .

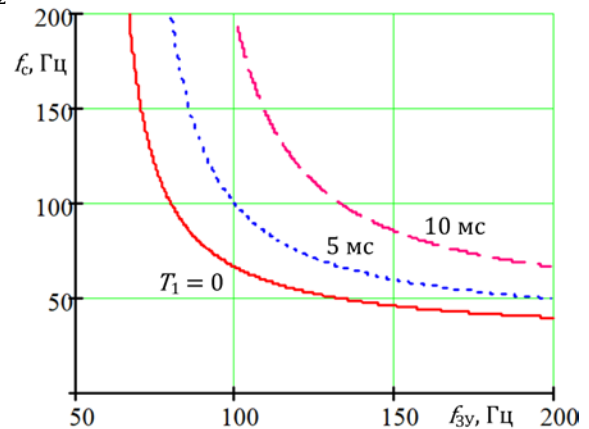


Рис. 5. Минимальные значения частот сбора данных о состоянии ЗУ и сенсоров

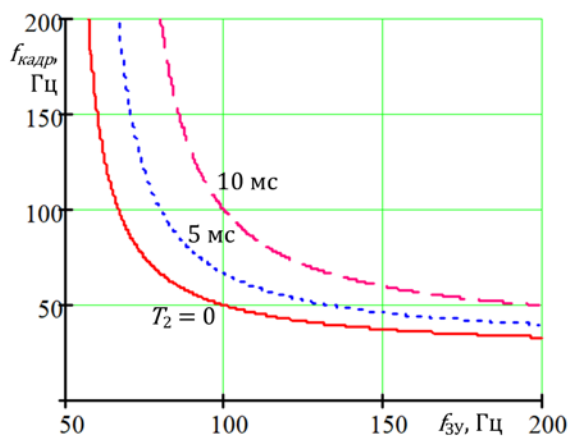


Рис. 6. Минимальные значения частоты сбора данных о состоянии ЗУ и частоты кадров

Таким образом, если T_1 не превышает 5 мс, величины $f_{зу}$ и f_c могут быть приняты равными 100 Гц. Поскольку информационный объём кадра видеоряда, как правило, значительно превосходит объём данных о состоянии ЗУ и сенсоров, целесообразно принять $T_2 > T_1$. Так, при $T_2 = 10$ мс частота кадров должна составлять не менее 100 Гц, что достижимо на современном оборудовании, а также является достаточно комфортным значением для человека.

4. Заключение

В рамках данной работы произведён анализ временных задержек, возникающих в системе «человек-робототехническое средство»:

- рассмотрены основные классы робототехнических систем с точки зрения влияния временных задержек на процесс управления;
- определено ограничение полной задержки в системе управления, выполнение которого необходимо для комфортной работы неподготовленного оператора;
- проведена оценка задержек, возникающих в контурах прямой и обратной связи;
- получены аналитические выражения, связывающие частоты сбора данных и задержки передачи данных.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем управления РТС, не требующих длительного обучения операторов.

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.

Список используемых источников

1. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами. 2-е изд. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. — 480 с.
2. Макаров А.Н., Кутлубаев И.М. Механика манипуляционных систем / А.Н. Макаров, И.М. Кутлубаев; Под общ. ред. Макарова А.Н.; Магнитогор. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова. — Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 1999. — 178 с.
3. Ma Z., Ben-Tzvi P. RML glove-an exoskeleton glove mechanism with haptics feedback // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 20(2),6750032, P. 641-652.
4. Park S., Jung Y., Bae J. A tele-operation interface with a motion capture system and a haptic glove // 2016 13th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, URAI 2016, P. 544-549.
5. Sinha A.K., Sahu S.K., Bijarniya R.K., Patra K. An effective and affordable technique for human motion capturing and teleoperation of a humanoid robot using an exoskeleton // Proceedings - 2017 2nd International Conference on Man and Machine Interfacing, MAMI 2017, 2018-March, P. 1-6.
6. Zhang J., Yang C., Chen Y. Exoskeleton arm with force feedback for robot bilateral teleoperation // Progress in Natural Science 17(8), August 2007, P. 948-955.
7. Копирующий манипулятор: Пат. 135956 Рос. Федерация. МПК В25J 3/00 / Кутлубаев И.М., Богданов А.А., Жиденко И.Г., Кияткин Д.В., Пермьяков А.Ф.; № 2013122162/02; заявл. 14.05.2013; опубл. 27.12.2013, Бюл. № 36.
8. Ishikawa Y., Takata M., Joe K. Constitution and phase analysis of alpha waves // 5th 2012 Biomedical Engineering International Conference, BMEiCON 2012.
9. Nemirovsky M., Tullsen D.M. Multithreading architecture // Synthesis Lectures on Computer Architecture 21, 2013, P. 1-111.
10. Zhou J.-P., Shi C. Efficient SIMD optimization for media processors // Journal of Zhejiang University: Science A 9(4), April 2008, P. 524-530.
11. Gao W., Zhao R.-C., Han L., Pang J.-M., Ding R. Research on SIMD auto-vectorization compiling optimization // Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software 26(6), 2015, P. 1265-1284.
12. Zabel H., Müller W., Gerstlauer A. Accurate RTOS modeling and analysis with SystemC // Hardware-dependent Software: Principles and Practice, 2009, P. 233-260.

13. Lu Z., Li M., Zhao W. Normality of Ethernet traffic at large time scales // *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 471963.
14. Chestnutt J., Michel P., Kuffner J., Kanade T. Locomotion among dynamic obstacles for the Honda ASIMO // *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2007, P. 2572-2573.
15. Yoshikawa T., Khatib O. Compliant humanoid robot control by the torque transformer // *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2009*, P. 3011-3018.
16. Raaen K. Measuring latency in virtual reality systems // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* Vol. 9353, 2015, P. 457-462.
17. K. Tanabe, S. Takei, H. Kajimoto. The Whole Hand Haptic Glove Using Numerous Linear Resonant Actuators // *Proceedings of IEEE World Haptics Conference*, 2015.